



**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DA BRECHA VÍTREA
OCORRENTE EM UMA JAZIDA DE RIODACITO - PROJETO DE EXPANSÃO DA
MINA MAESTRA - CAXIAS DO SUL - RS**

Porto Alegre, 2014

LIANA TURCATI SELMO

Caracterização geológico-geotécnica da brecha vítrea ocorrente em uma jazida de riodacito – Projeto de expansão da mina Maestra– Caxias do Sul – RS

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Prof. Dr. Antônio Pedro Viero

Prof. Dr. Clóvis Gonzatti

Porto Alegre, 2014

CIP - Catalogação na Publicação

Turcati Selmo, Liana
Caracterização geológico-geotécnica da brecha vítrea
ocorrente em uma jazida de riodacito - Projeto de
expansão da Mina Maestra - Caxias do Sul, RS / Liana
Turcati Selmo. -- 2014.
109 f.

Orientador: Clóvis Gonzatti.
Coorientador: Antônio Pedro Viero.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre, BR-
RS, 2014.

1. Brecha vítrea. 2. Base. 3. Sub-base. 4. Formação
Serra Geral. 5. Geologia de engenharia. I. Gonzatti,
Clóvis, orient. II. Pedro Viero, Antônio, coorient.
III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “Caracterização geológico-geotécnica da brecha vítrea ocorrente em uma jazida de riodacito – Projeto de expansão da mina Maestra – Caxias do Sul – RS”, elaborado por Liana Turcati Selmo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Reginato

Prof. Dr. Rualdo Menegat

Prof. Dr. Ruy Paulo Phillip

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à minha mãe pelo seu amor incondicional, por ser essa pessoa guerreira que tanto admiro, por ter me educado, pelo apoio nos momentos difíceis, pelo subsídio financeiro e por sempre ter me apoiado nas minhas escolhas. Te amo.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por me permitir realizar estudos de nível superior de qualidade.

Aos meus professores, pela dedicação e empenho no ensino.

Agradeço imensamente aos meus orientadores do projeto temático, prof. Clóvis Gonzatti e prof. Pedro Viero, pela dedicação e empenho em me ajudar a produzir um trabalho de qualidade, por todos os conhecimentos transmitidos e pelo esforço em fazer essa ponte entre universidade e empresa, permitindo que os alunos consigam um estágio mais facilmente.

À empresa Caxiense Fagundes pela oportunidade de estágio, tão importante para agregar conhecimento e experiência na minha vida profissional. Ao meu supervisor de estágio, Engenheiro Gustavo Steffen, e a todos os funcionários que conheci e que de alguma maneira contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu namorado, companheiro e amigo Edivan, por ter me esperado durante esses 4 anos de namoro à distância, por acreditar em mim, por ter me ajudado a ser uma pessoa melhor e por sempre ter me apoiado e me dado força nos momentos que eu quase surtei. Te amo.

À prof^a. Maria Luiza por ter me ajudado com seus conhecimentos no manuseio do software ArcGis.

Ao amigo Artur por toda a ajuda fornecida e por compartilhar comigo o gosto por atividades físicas.

À equipe do LAPAV. Vocês também contribuíram com o conhecimento que tenho hoje, e se não fosse pelo espaço cedido por vocês no laboratório para que eu pudesse fazer meus ensaios talvez este trabalho não tivesse sido realizado.

Aos colegas de curso, por todos os bons momentos que compartilhamos juntos.

RESUMO

Este trabalho teve como linha de temática a geologia de engenharia e visou como principal objetivo a avaliação do volume e caracterização geotécnica da unidade vulcânica, classificada como brecha vítrea, que ocorre nas cotas de fundo da mina Maestra, localizada no município de Caxias do Sul, RS. Os estudos realizados visaram o seu emprego como material de base e sub-base na pavimentação de rodovias. Os trabalhos consistiram no aproveitamento de dados publicados na literatura sobre a área de estudo, execução de mapeamento geológico de detalhe na área da mina, coleta de amostras e realização de ensaios de laboratório para a caracterização geológico-geotécnica dos materiais. Para isso foram realizados ensaios de determinação dos índices físicos (absorção de água, densidade real e aparente, porosidade), ensaios para verificar a resistência mecânica (carga pontual, desgaste por abrasão Los Angeles) e ensaios de alterabilidade (durabilidade ao sulfato de sódio e resistência ao atrito e impacto a úmido - slake-durability). A caracterização mineralógica das amostras foi realizada através das análises petrográficas, difratometria por Raios X e ensaios de perda ao fogo. Os resultados dos trabalhos de campo permitiram o modelamento geométrico da unidade vulcânica (brecha vítrea) e cubagem preliminar do volume de reserva, estimado em aproximadamente 17 milhões de m³. As características geotécnicas da rocha estudada permitem afirmar que o material pode ser utilizado como agregado de qualidade inferior, pois atende às especificações técnicas de pavimentos rodoviários para camadas de sub-base e, com limitações, para uso como camada de base.

Palavras-Chave: Brecha vítrea; base; sub-base; Formação Serra Geral; geologia de engenharia.

ABSTRACT

This work had as thematic line the engineering geology and aimed as principal objective the volume and the geotechnical characterization of a volcanic unit, classified as glassy breccia, which occurs in fund shares of Maestra mine – located in Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. The studies aimed their use as base material and sub-base road paving. The work consisted in use of published data on the study area, geological mapping execution detail in the mine area, collecting samples and conducting laboratory tests for geological and geotechnical characterization of materials. For this, tests were conducted for determination of physical indexes (water absorption, real and apparent density, porosity), tests to verify the mechanical strength (point load, abrasion LA) and changeability test (sodium sulfate durability and resistance to wear abrasion and impact – slake durability). The mineralogical characterization of the samples was carried out by petrographic analysis, X Ray diffraction and ignition loss tests. The results of field work allowed the geometric modeling of volcanic unit (glassy breccia) and preliminary scaling of reserve volume, estimated at about 17 million m³. The geotechnical characteristics of the studied rock allow to affirm that the material can be used as a coarse aggregate as it meets the specifications for road pavement sub-base layers, with limitations for use as the base layer.

Keywords: *Glassy breccia; base; sub-base; Serra Geral Formation; engineering geology.*

Lista de Figuras

Figura 1: Situação da Bacia do Paraná no continente sul-americano. Fonte: Milani (2000).....	5
Figura 2: Localização da área de estudo e distribuição das duas principais unidades geológicas. Modificado de SIAGAS/CPRM, 2006.	10
Figura 3: Coluna estratigráfica das rochas que compõem o arcabouço geológico do Município de Caxias do Sul. São indicadas as espessuras de cada unidade vulcânica e os respectivos solos derivados da alteração destas rochas. Fonte: Bressani <i>et al.</i> (2005).	12
Figura 4: Imagem aérea mostrando a localização da mina Maestra (modificada do software Google Earth).	13
Figura 5: Estrutura de pavimento-tipo. Fonte: Ceratti et al., 2008.	14
Figura 6: Estrutura de pavimento-tipo. Fonte: Ceratti et al., 2008.	15
Figura 7: Localização dos pontos onde as amostras da brecha vítrea e do riodacito foram coletadas. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	17
Figura 8: Perfuratriz hidráulica. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	18
Figura 9: Fases de confecção de uma lâmina petrográfica (Fonte: www.dct.uminho.pt/rpmic/prep_amos.html).....	20
Figura 10: Balança com pesagem por baixo, cesto cilíndrico e tanque com água utilizados no ensaio de determinação dos índices físicos. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	26
Figura 11: Aparelho utilizado no ensaio de carga pontual. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	27
Figura 12: Máquina utilizada para o ensaio de Abrasão “Los Angeles”. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	29
Figura 13: Equipamento utilizado para o ensaio de alterabilidade a úmido. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	31
Figura 14: Bloco diagrama mostrando as unidades vulcânicas que ocorrem na área da mina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	32
Figura 15: Detalhe do contato erosivo da UV1 (paleorelevo) com a UV2, destacado pela linha vermelha. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	34
Figura 16: Paleorelevo de 3 metros da UV1. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	34
Figura 17: Contato erosivo da UV1 com a UV2 destacado pela linha vermelha. Paleorelevo de 3 metros. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	35
Figura 18: Detalhe do topo da UV1, com lentes de vidro vulcânico de cor preta e brilho resinoso (pitchstones). Fonte: Dados da pesquisa (2014).	35

Figura 19: Detalhe do topo da UV1, mostrando os fragmentos de diversos tamanhos, ora afaníticos, ora vesiculares e amigdaloidais. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	36
Figura 20: Blocos pertencentes à UV1, na cota 706, onde podemos notar os mesmos fragmentos amigdalóides que ocorrem no topo dessa unidade. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	37
Figura 21: Uma das frentes de lavra onde aflora o Riodacito. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	39
Figura 22: Textura “Carijó” característica da zona maciça (intermediária) do riodacito. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	39
Figura 23: Bandamento ígneo presente na zona de base da UV2. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	40
Figura 24: Detalhe da alteração na zona de base da UV2. Bandamento ígneo dando origem ao diaclasamento horizontal, oxidado e preenchido por quartzo. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	40
Figura 25: Base da UV2, próximo ao contato com a UV1. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	41
Figura 26: Detalhe do bandamento milimétrico com dobramentos gerados por fluxo. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	41
Figura 27: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando a textura granofírica, predominante na rocha. Destaque para microfenocristal de sanidina na imagem da direita. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	43
Figura 28: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando textura glomeroporfírica dada pelo agrupamento de augita e sanidina. A imagem da direita mostra um microfenocristal de clinopiroxênio intensamente oxidado e cloritizado. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	45
Figura 29: Fotomicrografia com nicóis paralelos mostrando o vidro devitrificado com crescimento esferulítico na imagem à esquerda. À direita, fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando veio preenchido por quartzo. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	45
Figura 30: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando o bandamento ígneo marcado por diferentes níveis de oxidação e preenchimento por quartzo secundário. Na imagem à direita, micrólitos de feldspato orientados paralelamente ao bandamento ígneo. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	47
Figura 31: Amostra BRE-2, da qual foi confeccionada a lâmina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	49
Figura 32: Fotomicrografia com nicóis paralelos na imagem à esquerda mostrando a matriz composta por vidro parcialmente devitrificado. Na imagem à direita, destaque para a textura microporfírica (nicóis cruzados). Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	49
Figura 33: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando a cimentação por zeólita fibrosa. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	50

Figura 34: Amostra BRE-2A, da qual foi confeccionada a lâmina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	51
Figura 35: Fotomicrografia com nicóis cruzados ilustrando a grande quantidade de quartzo e intensa oxidação da rocha. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	52
Figura 36: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando os xenocristais de plagioclásio (esquerda) e quartzo (direita). Fonte: Dados da pesquisa (2014).	52
Figura 37: Fotomicrografia com nicóis paralelos mostrando textura glomeroporfirítica com microfenocristais de sanidina, plagioclásio e clinopiroxênio imersos em uma matriz vítrea. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	53
Figura 38: Fotomicrografia com nicóis paralelos (esquerda) mostrando um fragmento de vidro parcialmente devitrificado. Na imagem à direita, fragmento vítreo com textura microporfirítica e glomeroporfirítica (nicóis cruzados). Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	54
Figura 39: Fotomicrografia com nicóis paralelos mostrando um fragmento de vidro com forte brechação. Na imagem à direita, fragmento de vidro cristalizado para quartzo (nicóis cruzados). Fonte: Dados da pesquisa (2014).	55
Figura 40: Fotomicrografia com nicóis paralelos mostrando um fragmento de vidro parcialmente devitrificado (esquerda). Na imagem à direita, fragmento de vidro cristalizado para quartzo e cimentação por calcedônia nas bordas dos fragmentos (nicóis cruzados). Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	57
Figura 41: Difratoograma de Raios X, brecha vítrea, amostra BRE-01 coletada na profundidade 6 m. Fração < 2 μm . Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	58
Figura 42: Difratoograma de Raios X, brecha vítrea, amostra RD-02 coletada na profundidade 14 m. Fração < 2 μm . Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	59
Figura 43: Difratoograma de Raios X, brecha vítrea, amostra RD-03 coletada na profundidade 21 m. A: Rocha total; B: fração < 2 μm . Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	59
Figura 44: Difratoograma de Raios X, brecha vítrea, amostra BRE-02 coletada na cota 745 m. Fração < 2 μm . Fonte: Dados da pesquisa (2014).	60
Figura 45: Curva de perdas por fração obtidas no ensaio de durabilidade. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	62
Figura 46: Esquerda: Brecha vítrea antes do ensaio de abrasão “Los Angeles”. Direita: Após o ensaio. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	63
Figura 47: Esq.: Brecha vítrea antes do ensaio de durabilidade (frações de 50 a 9,5 mm). Dir.: Frações de 9,5 a 0,3 mm. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	63
Figura 48: Detalhe da degradação da brecha após o ensaio. A: Fração retida na peneira de abertura 19 mm. B: fração retida na peneira de abertura 9,5 mm. C: fração retida na peneira de abertura 50 mm. D: fração retida na peneira de abertura 4,8 mm. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	64
Figura 49: Amostras 1 (esquerda) e 2 (direita) da brecha vítrea antes do ensaio de alterabilidade a úmido (slak-durability). Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	64

Figura 50: Brecha vítrea após o 5° ciclo do ensaio de alterabilidade a úmido (slake-durability), pouco fragmentada e com as bordas arredondadas. Dir.: Amostra 2. Esq.: amostra 1. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	65
Figura 51: Brecha vítrea antes do ensaio de carga pontual (acima) e após o rompimento (abaixo). Fonte: Dados da pesquisa (2014).	65
Figura 52: Riodacito antes do ensaio de durabilidade com sulfato de sódio. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	66
Figura 53: Algumas frações após o ensaio. Não houve fendilhamento e a degradação foi muito baixa. A: 19 mm. B: 9,5 mm. C: 4,8 mm. D: 2,4 mm. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	66
Figura 54: Riodacito Carijó antes do ensaio de alterabilidade a úmido. Dir.: Após o 5° ciclo do ensaio, mostrando pouquíssima fragmentação. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	67
Figura 55: Riodacito antes do ensaio de carga pontual (esquerda) e após o rompimento (direita). Fonte: Dados da pesquisa (2014).	67
Figura 56: Principais direções dos lineamentos que ocorrem na área de estudo. Modificado de Bressani <i>et al.</i> (2005).....	68
Figura 57: Diagrama de densidade dos polos das principais famílias de descontinuidades presentes na mina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	69
Figura 58: Diagrama de roseta com a direção de mergulho das principais famílias de descontinuidades observadas na mina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	70
Figura 59: Gráfico das taxas de furação para as diferentes litologias ocorrentes na mina Maestra. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	73
Figura 60: Exemplo de cálculo do RQD.	75
Figura 61: Mapa de pontos e furo de sondagem rotativa utilizados para o modelamento do topo da brecha vítrea. A área do retângulo corresponde á área modelada. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	76
Figura 62: Modelamento do topo da brecha vítrea. Fonte: Dados da pesquisa (2014).....	77
Figura 63: Localização das áreas cubadas. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	78

Lista De Tabelas e Quadros

Tabela 1: Graduação para ensaio (DNER-ME 035/98).	28
Tabela 2: Carga abrasiva (DNER-ME 035/98).	28
Tabela 3: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra DCS-M. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	42
Tabela 4: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra SG3. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	44
Tabela 5: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra 026. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	46
Tabela 6: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra BRE-2. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	48
Tabela 7: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra BRE-2A. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	50
Tabela 8: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra VDR1. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	53
Tabela 9: Resultados da perda ao fogo (perda de massa em % média). Fonte: Dados da pesquisa (2014).	61
Tabela 10: Resultados dos ensaios geotécnicos para os materiais rochosos que ocorrem na mina Maestra. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	61
Tabela 11: Comparação das perdas por fração das amostras submetidas ao ensaio de durabilidade. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	62
Tabela 12: Atitudes principais de cada família de descontinuidade predominante na mina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	69
Tabela 13: Espaçamento de descontinuidades (ABGE, 1983).	71
Tabela 14: Classificação da qualidade da rocha. Fonte: DNER – PRO 102/97.	75
Tabela 15: Dados utilizados para o cálculo da cubagem mínima da brecha vulcânica. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	78
Tabela 16: Dados utilizados para o cálculo do volume estimado da brecha alterada a ser removido para chegar na zona de melhor qualidade. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	79
Tabela 17: Comparação dos resultados dos ensaios obtidos com os valores exigidos por algumas especificações técnicas.	80
Tabela 18: Critérios para a definição das 4 classes de rocha em termos de qualidade - Riodacito. Modificado de Lienhart (2003).	80
Tabela 19: Critérios para a definição das 4 classes de rocha em termos de qualidade – Brecha vítrea. Modificado de Lienhart (2003).	81

Quadro 1: Parâmetros avaliados e características modais das discontinuidades que ocorrem na mina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).	72
--	----

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	1
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.3 OBJETIVOS E METAS.....	1
1.3.1 Objetivo Geral	1
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.3.3 Metas	2
1.4 PREMISSA	2
1.5 HIPÓTESE.....	3
2 CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO.....	4
2.1 A BACIA DO PARANÁ.....	4
2.1.1 Síntese da evolução da Bacia do Paraná.....	6
2.2 O VULCANISMO DA BACIA DO PARANÁ	7
2.3 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO	9
3 LOCALIZAÇÃO DA MINA MAESTRA	12
4 ASPECTOS GEOTÉCNICOS.....	14
4.1 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	14
4.2 MATERIAIS DE BASE E SUB-BASE	15
5 METODOLOGIA	16
5.1 REVISÃO DE INFORMAÇÕES.....	16
5.2 TRABALHOS DE CAMPO	16
5.2.1 MODELAMENTO DA JAZIDA – UNIDADE VULCÂNICA BRECHADA	17
5.2.2 TÉCNICAS DE CUBAGEM	18
5.2.3 LEVANTAMENTO DE DESCONTINUIDADES	18
5.3 ENSAIOS LABORATORIAIS	19
5.3.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	19
5.3.1.1 Petrografia Microscópica	20
5.3.1.2 Difratometria por raios X	21
5.3.1.3 Perda ao fogo	23
5.3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E TECNOLÓGICA DO AGREGADO	23
5.3.2.1 Determinação da absorção e da densidade do agregado – Norma DNER-ME 195/97.....	23
5.3.2.2 Carga pontual – Norma americana ISRM (1985)	26

5.3.2.3	Abrasão “Los Angeles” – Norma DNER-ME 035/98.....	27
5.3.2.4	Sanidade com sulfato de sódio – Norma DNER-ME 089/94	29
5.3.2.5	Resistência ao atrito e impacto a úmido (Slake-Durability – Norma ISRM (1979).....	30
6	RESULTADOS	32
6.1	GEOLOGIA DA MINA	32
6.1.1	UNIDADE VULCÂNICA 1 (UV1)	33
6.1.2	UNIDADE VULCÂNICA 2 (UV2)	37
6.2	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	41
6.2.1	PETROGRAFIA.....	42
6.2.2	ANÁLISE POR DIFRATOMETRIA POR RAIOS X	57
6.2.3	PERDA AO FOGO	60
6.3	ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	61
6.4	AVALIAÇÃO DA JAZIDA.....	67
6.4.1	ANÁLISE ESTRUTURAL DA JAZIDA	68
6.4.2	MODELAMENTO E INDICAÇÃO VOLUMÉTRICA	72
7	CONCLUSÕES.....	80
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	ANEXO I – IMAGENS FOTOGRÁFICAS DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM.....	91
	APÊNDICE I – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM, FUROS REALIZADOS COM PERFURATRIZ DESTRUTIVA E SEÇÕES GEOLÓGICAS	92
	APÊNDICE II – SEÇÕES GEOLÓGICAS.....	93
	APÊNDICE III – COMPILAÇÃO DO RELATÓRIO DE SONDAGEM E RESULTADOS DO RQD E RECUPERAÇÃO	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

A Geologia de Engenharia é o campo de aplicação da Geologia que se dedica a investigação, ao estudo e a solução dos problemas de engenharia e meio ambiente decorrentes da interação entre as obras e atividades humanas e o meio físico geológico, assim como ao prognóstico e ao desenvolvimento de medidas preventivas ou reparadoras de riscos geológicos.

Os agregados para indústria da construção civil são os insumos mais consumidos no mundo. Dessa forma, são matérias granulares, sem volume definidos, com dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil. Há, portanto, uma necessidade de aumento da demanda de matéria-prima que pode ser atendida através da busca por alternativas para as obras sociais/urbanas. Somados a essa ideia, o conhecimento geológico da área em questão e a ação da geologia de engenharia, tornam clara a contribuição do conteúdo deste projeto para o aumento de conhecimento científico no ramo, bem como a utilidade socioeconômica do mesmo.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A pedreira Caxiense Fagundes opera na mina da Maestra desde o ano de 2009. A jazida é de rocha vulcânica ácida (riodacito), pertencente à Formação Serra Geral. Esse material vem sendo explorado como agregado.

A mina foi expandindo em profundidade até atingir a cota de 745 m, na qual começa a aflorar uma unidade vulcânica diferente, classificada como uma brecha vítrea, um tanto alterada e contendo lentes de vidro vulcânico (*pitchstones*). Com base no relatório de pesquisa fornecido pela empresa, esse material foi classificado como estéril, sem sequer levar em consideração a possibilidade de investigar suas características tecnológicas.

Um outro problema ligado a essa unidade vulcânica era o fato de sua espessura, geometria e volume serem desconhecidos.

1.3 OBJETIVOS E METAS

1.3.1 Objetivo Geral

- Caracterização física, mecânica e tecnológica da brecha vítrea para avaliação do seu potencial uso como agregado nas camadas de base e sub-base de rodovias.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterização física, mecânica e tecnológica do material em exploração, para efeitos de comparação com a brecha vítrea, e para manter o controle de qualidade.
- Estudar os aspectos da geologia local do corpo mineral (variações litológicas espaciais dos derrames e implicações desses aspectos na lavra).
- Mapeamento e avaliação da distribuição espacial da brecha vítrea dentro do corpo mineral atualmente em exploração.
- Cubagem da unidade brecha vítrea visando a determinação das reservas medida, inferida e estimada conforme código de mineração.

1.3.3 Metas

- Elaboração pelo menos duas seções geológicas com base nos dados de sondagens e afloramentos na área da mina em operação.
- Caracterização de pelo menos duas amostras da jazida, sendo uma do material atualmente minerado e outra da unidade vulcânica brechada abaixo do fundo da cava atual.
- Mapeamento das discontinuidades presentes no riodacito.

1.4 PREMISSA

No maciço rochoso da mina Maestra há a ocorrência de uma brecha vulcânica abaixo da cota de fundo da cava atual (745 m), provavelmente na transição entre unidades eruptivas. A geometria, espessura, volume e

características geotécnicas desse material são desconhecidos, necessitando, portanto, de estudos para determinação dessas características.

1.5 HIPÓTESE

A hipótese proposta é de que se trata de uma unidade inteira diferente das unidades superior e inferior. Uma outra hipótese, em relação à aplicação desse material na construção civil, é a de que possa ser utilizado como material de base e sub-base na pavimentação de rodovias.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO

Neste tópico é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a geologia da região de estudo, a qual está inserida na província vulcânica da Bacia do Paraná, sendo parte do pacote de rochas ácidas.

2.1 A BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná é uma ampla região sedimentar do continente sul-americano que inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, totalizando uma área que se aproxima dos 1,5 milhão de quilômetros quadrados (Fig. 1).



Figura 1: Situação da Bacia do Paraná no continente sul-americano. Fonte: Milani (2000).

O formato da bacia está relacionado a fenômenos mesozoico-cenozóicos do continente sul-americano; seu flanco leste, aí compreendido o trecho entre São Paulo e o Uruguai, foi profundamente esculpido pela erosão em função do soerguimento crustal periférico ao rifte sul-atlântico, tendo a remoção alcançado em algumas áreas pacotes da ordem de 2.500 metros. Já o flanco ocidental estabeleceu-se em função de processos erosivos sobre um bulge flexural relacionado à sobrecarga litosférica imposta ao continente pelo cinturão andino, sendo o Arco de Asunción uma feição tardia na história da Bacia do Paraná e que hoje a separa de áreas outrora a ela contíguas, no Chaco paraguaio-boliviano (Milani, 2000).

O registro estratigráfico da Bacia do Paraná compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima em torno dos 7 mil metros, coincidindo geograficamente o depocentro estrutural da sinéclise com a região da calha do rio que lhe empresta o nome. Milani (1997) reconheceu no registro estratigráfico da Bacia do Paraná seis unidades de ampla escala ou Superseqüências, na forma de pacotes rochosos materializando cada um deles em intervalos temporais com algumas dezenas de milhões de anos de duração e envelopados por superfícies de discordância de caráter inter regional: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As três primeiras superseqüências são representadas por sucessões sedimentares que definem ciclos transgressivo-regressivos ligados a oscilações do nível relativo do mar no Paleozóico, ao passo que as demais correspondem a pacotes de sedimentitos continentais com rochas ígneas associadas.

2.1.1 Síntese da evolução da Bacia do Paraná

A geodinâmica da borda ativa do Gondwana influenciou decisivamente na história evolutiva paleozóica-mesozóica da Bacia do Paraná. A análise integrada da subsidência da bacia, confrontada às grandes orogêneses acontecidas na borda continental (Milani, 1997), revelou uma relação entre ciclos de criação de espaço deposicional na área intracratônica e os referidos episódios orogênicos. A flexura litosférica por sobrecarga tectônica, propagada continente adentro a partir da calha de antepaís desenvolvida na porção ocidental do Gondwana foi interpretada como tendo sido um importante mecanismo de subsidência durante a evolução da Bacia do Paraná.

Outros investigadores interpretaram diferentemente a origem e evolução da bacia: para Zalán et al. (1990), a contração térmica que teria sucedido aos fenômenos tectonomagmáticos do Ciclo Brasileiro seria um importante mecanismo ligado à implantação da sinéclise. Já para Fulfaro et al. (1982), um conjunto de calhas aulacogênicas orientadas segundo a direção NW-SE teriam sido “as precursoras da sedimentação cratônica”.

No Eocretáceo, a crosta terrestre foi submetida a um colossal fendilhamento, associado a magmatismo basáltico de proporções sem similares na história do

planeta. Neste evento rompeu-se o megacontinente Gondwana e iniciou-se a evolução do oceano Atlântico Sul.

O magmatismo Serra Geral marcou o fim de eventos de sedimentação extensiva na grande área interior do megacontinente. Após a abertura do Oceano Atlântico, a Plataforma Sul-Americana manteve o caráter ascensional generalizado - iniciado ainda ao tempo da sedimentação Botucatu - até que o acúmulo de quase 2.000 m de espessura de lavas basálticas determinasse a inversão deste comportamento, na busca de novo ajuste isostático da porção litosférica onde agora estavam acumulados os derrames Serra Geral (Milani *et al.*, 2007).

2.2 O VULCANISMO DA BACIA DO PARANÁ

O vulcanismo da Bacia do Paraná, na América do Sul, e o vulcanismo da Bacia de Etendeka, na África Ocidental, foram originados no Cretáceo Inferior e formam uma província magmática única, associada à tectônica distensiva que ocasionou a ruptura do continente gondwânico e a consequente abertura do Oceano Atlântico Sul.

No Rio Grande do Sul, mais da metade da área do Estado, na região setentrional, é recoberta por uma pilha vulcânica de derrames basálticos sobrepostos ou intercalados com unidades ácidas, que constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná (Roisenberg *et al.* 2000). O magmatismo recobre 1,2x10⁶ km² da Bacia do Paraná, possui espessura máxima em torno de 1.720 m no depocentro da bacia e concentra-se na região centro-sul do Brasil e ao longo das fronteiras do Paraguai, Uruguai e Argentina (Nardy *et al.* 2008).

Este magmatismo, de características claramente bimodais, é constituído predominantemente por basaltos e basaltos andesíticos de filiação toleítica, que contrastam com os riolitos e riodacitos aflorantes nas regiões serranas do estado do Rio Grande do Sul, entre as localidades de Palmas e Guarapuava (estados de Santa Catarina e Paraná) e também na região fronteira do Uruguai. Este magmatismo bimodal caracteriza um *gap* praticamente completo de rochas com composições entre 60-64% de SiO₂ (Milner *et al.* 1995).

De modo geral, a observação macroscópica das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral permite individualizar três tipos petrográficos principais, facilmente reconhecíveis. O primeiro deles, majoritário, corresponde ao dos

basaltos, que exibem predominantemente textura intergranular e suas variações (intersertal, hialofítica, etc). Os outros dois são representados por rochas de natureza ácida, denominadas de Palmas e Chapecó. As rochas do tipo Palmas são maciças e afíricas, e as do tipo Chapecó são porfíricas.

Conforme Roisenberg *et al.* (2000), a anatomia interna só aparece completa nas unidades ácidas tipo Palmas e pode ser esquematicamente dividida em três zonas. A zona basal é constituída por vitrófiros e brechas de fluxo dispostos sem padrão definido e destituídos de diaclasamento característico, correspondendo de 5 a 10% da espessura total da unidade. Estruturas de fluxo são notadamente perceptíveis nos vitrófiros e o bandamento é ubíquo nas brechas, tornando-se mais intenso e contorcido à medida que diminui o conteúdo de fragmentos. O vitrófiro consiste em lentes irregulares ou camadas descontínuas com até seis metros de espessura, mostrando frequentes filonetes avermelhados resultantes da alteração e cristalização do vidro. As brechas apresentam tonalidades acastanhadas a avermelhadas, em resposta a diferentes intensidades de alteração ao longo das bandas de fluxo. Os fragmentos, não raro pumicíticos, são irregulares e possuem dimensões variáveis que alcançam até quinze centímetros, representando, em sua maioria, clastos conatos, aos quais se somam outros não conatos de basaltos, arenitos e granitos, os dois últimos presentes, em geral, na primeira unidade ácida a partir do topo do pacote basáltico. A ação térmica, neste caso, é marcada por feições de fusão parcial nos feldspatos e formação de franjas de vidro no quartzo, cujo contorno mostra-se, muitas vezes, amebóide. É ainda frequente o registro de feições típicas de ignimbritos, como shards e fiammés, ressaltadas pelos processos de desvitrificação.

A zona central é a mais expressiva e constitui cerca de 70% da espessura total da unidade, caracterizando-se por granófiros acinzentados que apresentam um pronunciado e fino diaclasamento tabular na base, semelhante à estratificação de camadas sedimentares ou piroclásticas, podendo alcançar 30 metros de espessura. Na parte intermediária desta zona, a rocha passa a exibir aspecto maciço e caráter finamente cristalino, com fraturamento discreto a colunar dominante. No topo da zona central, uma nova zona tabular, semelhante à anteriormente descrita, aparece de forma característica.

A zona superior é a mais delgada e possui espessura de até oito metros e padrão litológico semelhante à zona basal, da qual se distingue pela presença de vesículas e amígdalas com até dez milímetros de diâmetro, que não ultrapassam

15% do volume global da rocha, preenchidas parcialmente por quartzo, calcita e esporádicas zeolitas.

Estudos sobre a geoquímica das rochas ácidas do tipo Palmas revelaram que elas não são homogêneas. Há dois grandes grupos, um deles baixo em Ti ($TiO_2 \leq 0,87\%$), é formado por dois subgrupos, ou subtipos, distintos, denominados Santa Maria ($P_2O_5 \leq 0,21\%$) e Clevelândia ($0,21\% < P_2O_5 \leq 0,23\%$), conforme Nardy *et al.* (2008). O grupo alto em Ti ($TiO_2 \geq 0,90\%$) é representado por três subgrupos, ou subtipos, denominados Caxias do Sul ($0,91\% < TiO_2 < 1,03\%$ e $0,25\% < P_2O_5 < 0,28\%$), Anita Garibaldi ($1,06\% < TiO_2 < 1,25\%$ e $0,32\% < P_2O_5 < 0,36\%$) e Jacuí ($1,05\% < TiO_2 < 1,16\%$ e $0,28\% < P_2O_5 < 0,31\%$).

As idades das rochas vulcânicas, obtidas por meio de datações $40Ar/39Ar$, revelam que o pico de atividade ígnea ocorreu num curto espaço de tempo, entre 133 e 130 Ma (Nardy *et al.*, 2008).

2.3 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Caxias do Sul ocupa uma área territorial de 1.648.60 km², que corresponde a 0,55% da área total do Estado. Limita-se a noroeste com os municípios de Flores da Cunha, São Marcos, Campestre da Serra e Monte Alegre dos Campos; a leste, com São Francisco de Paula; a sudeste, com Gramado e Canela; a sul, com Nova Petrópolis e Vale Real e a oeste com o município de Farroupilha. Os limites extremos do município encontram-se delimitados entre os paralelos 28° 19' e 29° 19' de latitude sul e entre os meridianos 50° 46' e 51° 91' de longitude oeste de Greenwich. Caxias do Sul situa-se a 127 km de Porto Alegre, a capital gaúcha. As principais vias de acesso são a BR 116 e RS 122.

Na região do município de Caxias do Sul predominam como litologia aflorante rochas vulcânicas do tipo Palmas, que recebem localmente a denominação de Fácies Caxias (Fig. 2).

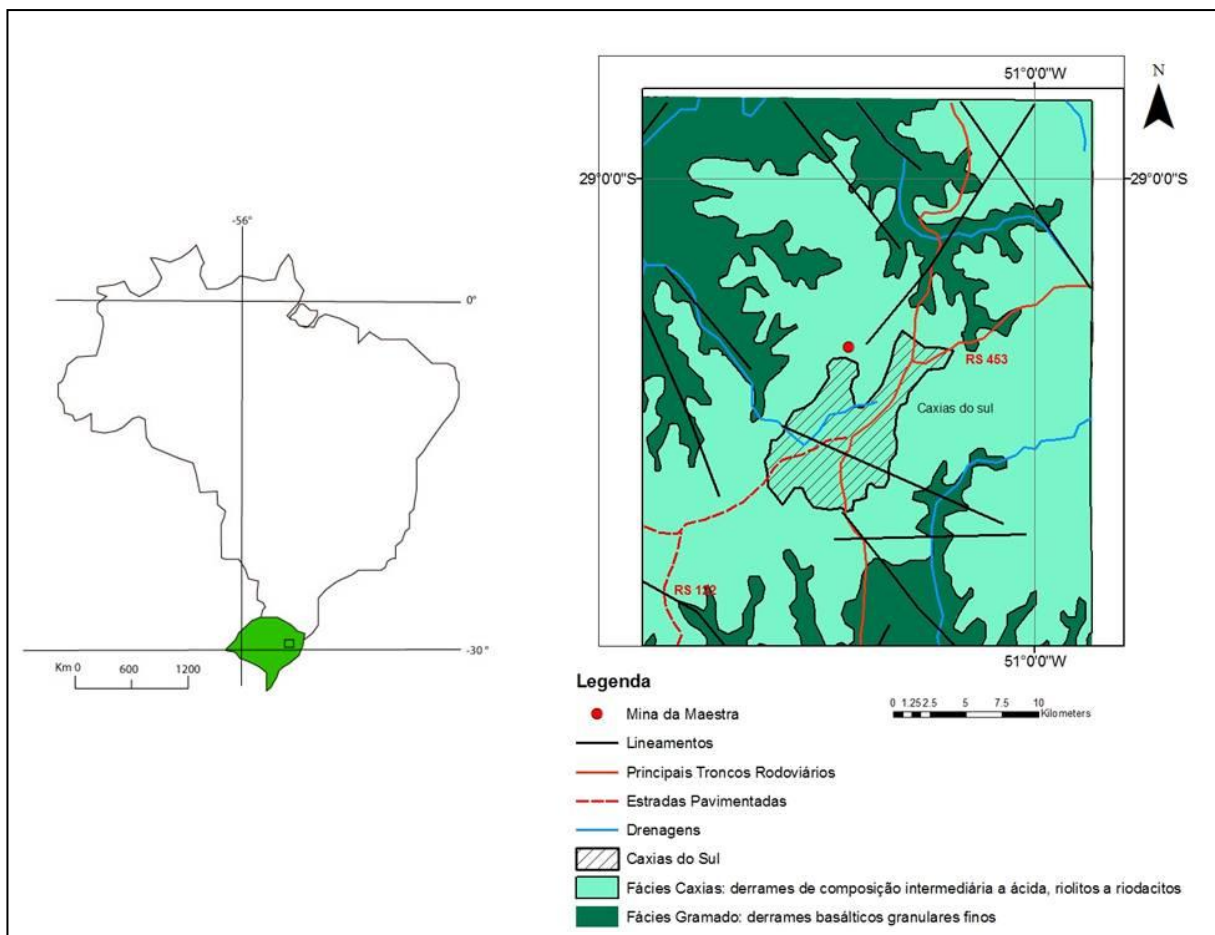


Figura 2: Localização da área de estudo e distribuição das duas principais unidades geológicas. Modificado de SIAGAS/CPRM, 2006.

O subtipo Caxias do Sul foi inicialmente reconhecido por Peate *et al.* (1992) e recobre uma área total de 16.000 km² e ocupa volume de 4.832 km³, sendo observado em cinco platôs distintos denominados de Serra da Farofa (1.384 km² e 304 km³), São Joaquim (580 km² e 230 km³), Bento Gonçalves (8.929 km² e 2.257 km³), Antonio Prado (1.133 km² e 453 km³) e Nova Prata (3.974 km² e 1.588 km³).

O subtipo Anita Garibaldi, individualizado por Garland *et al.* (1995), cobre área de 4.486 km² e ocupa volume de 1.008 km³. Ele está representado por cinco platôs distintos, distribuídos pelos estados do Paraná (Bituruna, 716 km² e 84 km³), Santa Catarina (Matos Costa, 241 km² e 42 km³; Machadinho, 366 km² e 99 km³; Anita Garibaldi, 246 km² e 54 km³) e Rio Grande do Sul (o maior de todos, Bom Jesus, 2.917 km² e 729 km³).

Por fim, o subtipo Jacuí, que recobre a área aproximada de 3.451 km², com um volume de 1.058 km³, que se estende por três regiões distintas no estado do

Rio Grande do Sul (Flores da Cunha, 961 km² e 398 km³; Veranópolis, 1.326 km² e 544 km³; Salto do Jacuí, 1.164 km² e 116 km³).

Desta forma, da base para o topo da sequência vulcânica, a partir do contato inferior com as vulcânicas basálticas foram definidas as seguintes unidades (Bressani *et al.*, 2005):

- Dacito Galópolis: Caracteriza-se por apresentar uma espessura da ordem 70 metros. É representado por rochas dacíticas, em que se destaca o intervalo basal do vulcanito com um vidro vulcânico característico.
- Dacito Canyon: Esse substrato rochoso caracteriza-se, do ponto de vista estrutural, pela presença de marcantes estruturas de fluxo subverticais, que definem bandas com coloração que variam de cinza escura a marrom-avermelhada. Essa diferença de coloração é relacionada ao estado de oxidação da rocha, sendo que as porções mais sãs têm cor cinza escura e as porções oxidadas (alteradas) possuem tonalidades mais avermelhadas. Este intervalo vulcânico, pelo predomínio de estruturas de fluxo verticalizado e granulação fina, favoreceu o desenvolvimento de espesso solo.
- Dacito Caxias: Neste pacote de vulcanitos ocorrem vitrófiros, caracterizados por uma coloração preta e constituídos por fenocristais e microfenocristais de plagioclásio e piroxênio numa matriz vítrea. Esta unidade litológica possui no máximo algumas dezenas de metros de espessura. A sua principal área de ocorrência é nas localidades de Criúva, Ilhéus e São Jorge ao norte do município, na unidade geomorfológica Planalto dos Campos Gerais-Antas, aflorando nestes locais principalmente acima da cota de 920 metros. Estas rochas são mais suscetíveis às alterações intempéricas e geram solos do tipo latossolo amarelo.

As litologias que ocorrem no município de Caxias do Sul são mostradas na figura 3.

PERÍODO	IDADE Ma	UNIDADE LITOES- TRATIGRÁ- FICA	ROCHAS		ESPESSUR	SOLOS
			T I P O			
CRETÁCIO INF.	128	FORMAÇÃO SERRA GERAL	C A X I A S	DACITO ANA RECH	80m	ANA RECH
				DACITO CAXIAS/ CARIJÓ	170m	FORQUETA CAXIAS/CAR
				DACITO CANYON	70m	CANYON
				DACITO GALÓPOLIS	70m	GALOPOLIS
			BASALTOS E ANDESIBASALTOS TIPO GRAMADO		450m	
JURÁS- SICO	138	FORMAÇÃO BOTUCATU	ARENITOS EÓLICOS		160	

Figura 3: Coluna estratigráfica das rochas que compõem o arcabouço geológico do Município de Caxias do Sul. São indicadas as espessuras de cada unidade vulcânica e os respectivos solos derivados da alteração destas rochas. Fonte: Bressani *et al.* (2005).

3 LOCALIZAÇÃO DA MINA MAESTRA

Localiza-se ao norte do município de Caxias do Sul, na Vila Maestra, próximo à Barragem da Maestra, conforme ilustra a figura 4.

Na área ocorrem rochas vulcânicas ácidas pertencentes à Fácies Caxias da Formação Serra Geral, que foram caracterizadas em seus aspectos macroscópicos e estruturais com base em afloramentos nas frentes de lavra, a serem discutidos no item 5.

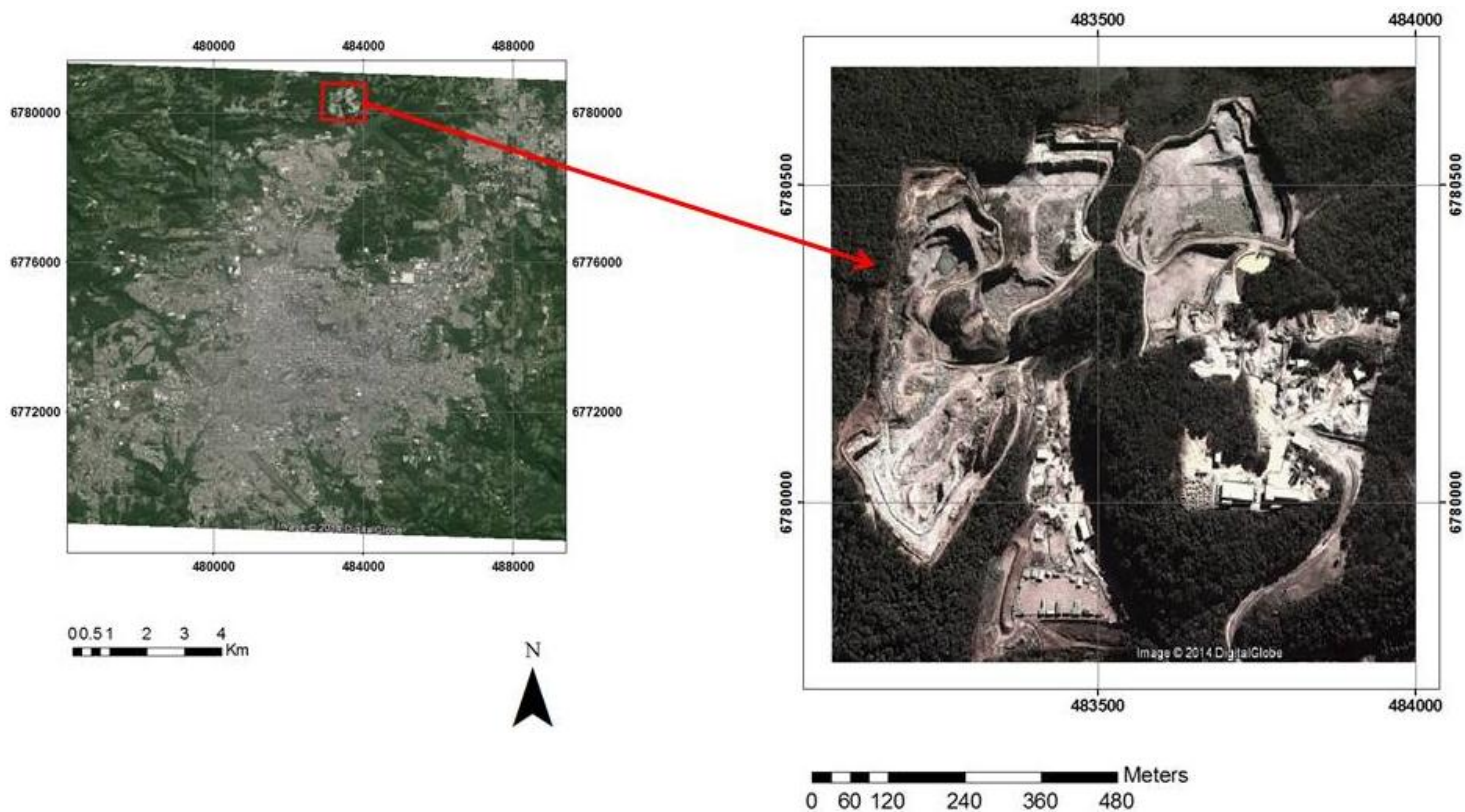


Figura 4: Imagem aérea mostrando a localização da mina Maestra (modificada do software Google Earth).

4 ASPECTOS GEOTÉCNICOS

4.1 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Segundo Ceratti *et al.* (2008), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: *rígidos* e *flexíveis*. Os pavimentos rígidos, em geral associados aos de concreto de cimento Portland, são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (em geral placas, armadas ou não), apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário. A Figura 5 mostra uma estrutura-tipo de pavimento de concreto de cimento Portland.

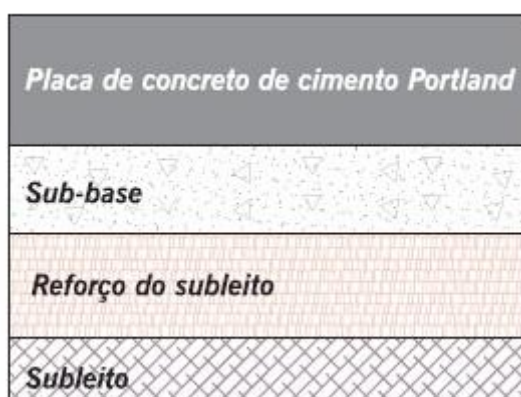


Figura 5: Estrutura de pavimento-tipo. Fonte: Ceratti et al., 2008.

Os pavimentos flexíveis, em geral associados aos pavimentos asfálticos, são compostos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes. Dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas, e condições ambientais, uma ou mais camadas podem ser suprimidas. A Figura 6 mostra uma estrutura-tipo.

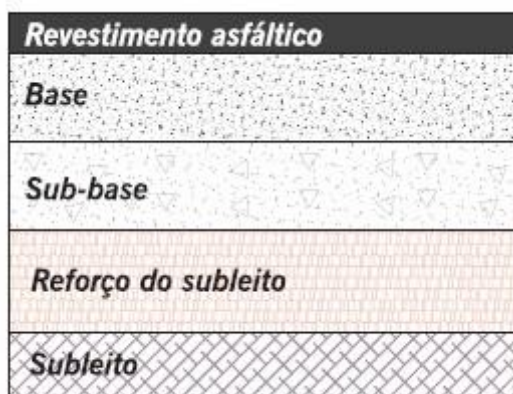


Figura 6: Estrutura de pavimento-tipo. Fonte: Ceratti et al., 2008.

4.2 MATERIAIS DE BASE E SUB-BASE

Por definição (DNIT – ES 141/2010), base é uma camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado. Sub-base é uma camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta, executada sobre o subleito ou reforço do subleito devidamente compactado e regularizado (DNIT – ES 139/2010).

Os materiais de base e sub-base são classificados segundo seu comportamento frente aos esforços em: materiais granulares e solos, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados, e materiais asfálticos.

Os materiais mais empregados em pavimentação da classe dos granulares e solos são: brita graduada simples (BGS) e bica ou brita corrida; macadame hidráulico; macadame a seco; misturas estabilizadas granulometricamente (estabilizadas por combinação de materiais para atender certos requisitos ou mecanicamente); solo-agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal (Ceratti *et al.* 2008).

5 METODOLOGIA

Este item abordará detalhadamente a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

5.1 REVISÃO DE INFORMAÇÕES

Esta etapa inicial do projeto constituiu na revisão bibliográfica de estudos já publicados pertinentes à área de estudo, tais como artigos, dissertações, livros e relatórios geológico-geotécnicos fornecidos pela empresa para compilação de informações cartográficas/estruturais da região e de testemunhos de sondagens, normas técnicas ABNT/DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes) referentes ao conjunto de ensaios a serem realizados, bem como o uso de mapas geológicos e imagens aéreas da região.

5.2 TRABALHOS DE CAMPO

Atividades que consistiram no mapeamento geológico de detalhe, modelamento e cubagem da unidade vulcânica sotoposta ao corpo mineral atualmente em exploração, bem como na coleta de amostras das litologias ocorrentes na mina para ensaios laboratoriais, a qual foi realizada conforme os procedimentos recomendados pela norma ABNT NBR NM 26/2001. A figura 7 mostra a localização dos pontos onde as amostras foram coletadas. Também foi feito um levantamento das estruturas/descontinuidades do maciço onde ocorre a lavra atualmente através do método *scanline*.

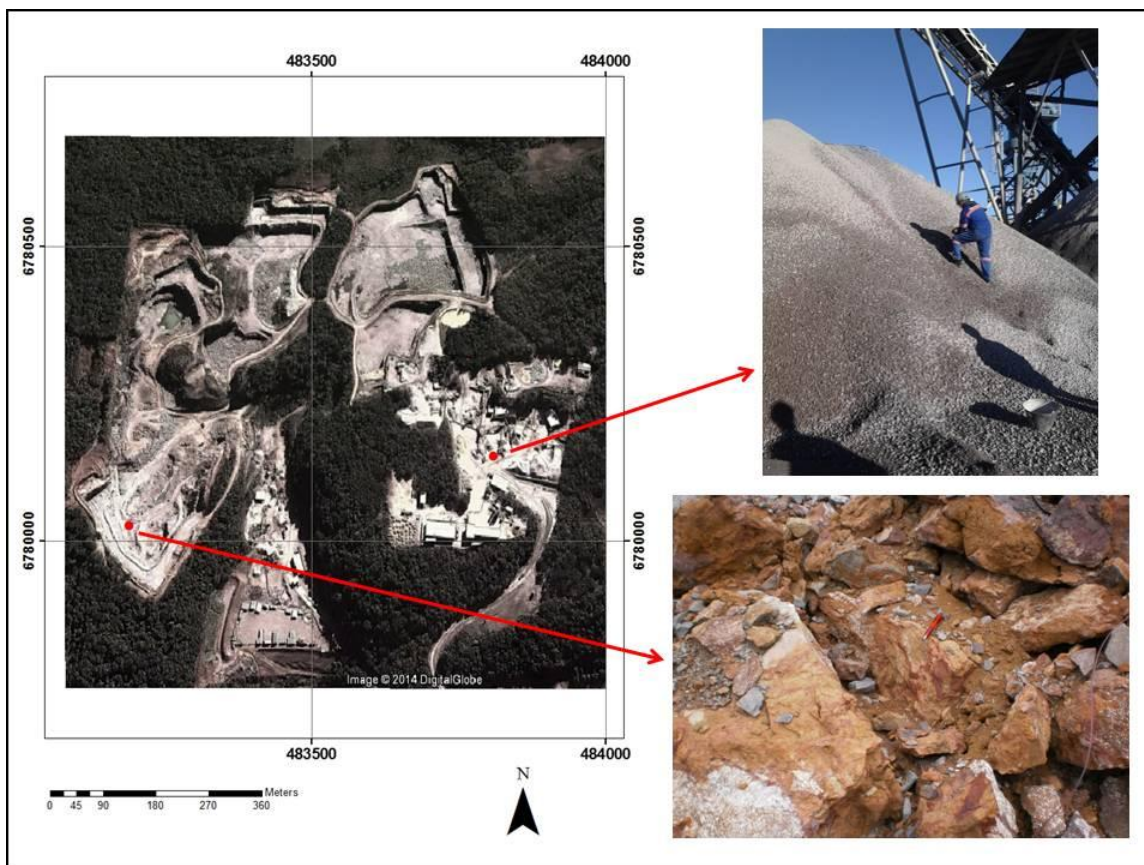


Figura 7: Localização dos pontos onde as amostras da brecha vítrea e do riodacito foram coletadas. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

5.2.1 MODELAMENTO DA JAZIDA – UNIDADE VULCÂNICA BRECHADA

Para o modelamento da unidade vulcânica brechada foram elaboradas duas seções geológicas com base em afloramentos na mina, compilação dos dados do relatório de sondagem fornecido pela empresa e também nos furos de sondagem destrutiva realizados com perfuratriz hidráulica (Fig. 8). A partir dos trabalhos de mapeamento dos afloramentos da brecha vítrea ocorrentes na mina, foi realizado o modelamento do topo dessa unidade, que será discutido em maior detalhe na seção 5.3.2.

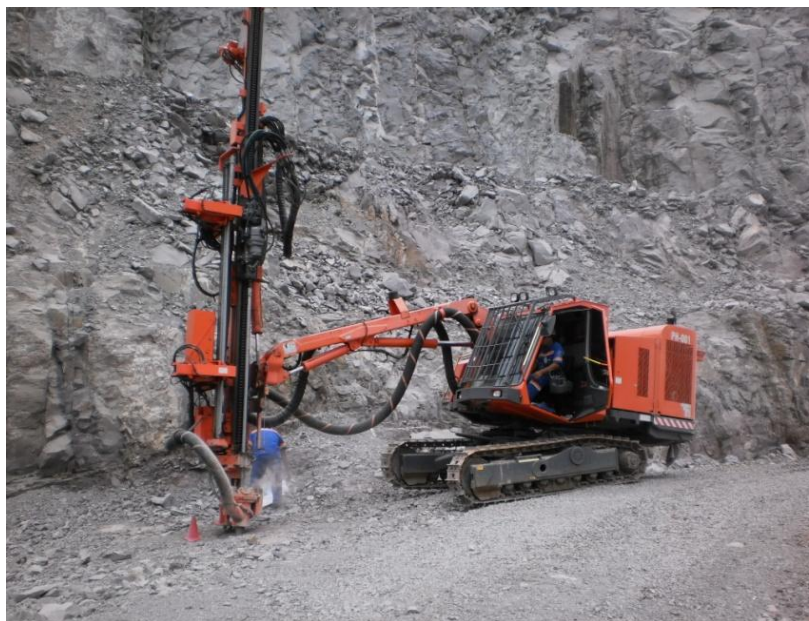


Figura 8: Perfuratriz hidráulica. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

5.2.2 TÉCNICAS DE CUBAGEM

A cubagem da reserva foi realizada a partir da área de influência da seção geológica AB (Apêndice II). A maior profundidade atingida nas sondagens rotativas para esse derrame foi de 33,2 metros (correspondente ao furo de sondagem 3). Provavelmente essa espessura se estende por toda a área da mina. Visto que quando foram feitas as sondagens na brecha não se chegou no fim desta unidade, a indicação volumétrica estimada neste trabalho é considerada como uma cubagem mínima. O mapa de localização das seções geológicas realizadas encontra-se no Apêndice I.

5.2.3 LEVANTAMENTO DE DESCONTINUIDADES

O projeto de qualquer estrutura a implantar no terreno, seja localizada na superfície ou no espaço subterrâneo, deve incluir um minucioso estudo das estruturas geológicas do local da construção. A descrição da qualidade de um maciço, especialmente de um maciço rochoso, inclui por sistema a análise das características das descontinuidades ocorrentes nesses locais. São as descontinuidades, com efeito, que condicionam as propriedades geotécnicas de grande número de terrenos (maciços terrosos rijos e maciços rochosos) conferindo-

lhes um comportamento em termos de deformabilidade, resistência ao corte e permeabilidade substancialmente diferente do material que constitui esses maciços. O método escolhido para o levantamento das descontinuidades do maciço rochoso da mina Maestra foi o método *scanline*. Esse método consiste, basicamente, na colocação de uma fita graduada em faces expostas do maciço e no registo de algumas características (geométricas e geomecânicas) de todas as descontinuidades por ela intersectadas.

O método *scanline* é extremamente expedito e versátil para o estudo da compartimentação de maciços rochosos, bem como fornece informações fulcrais sobre o estado da fraturação e a geologia estrutural do maciço rochoso.

Como principais desvantagens desta técnica podemos apontar (Peacock *et al.* (2003): i) no caso das descontinuidades (sub-)horizontais predominarem no maciço, a sua representatividade não ser valorizada; ii) o arqueamento por vezes descrito pela fita graduada na face exposta da rocha, pelo fato de esta não se encontrar suficientemente esticada.

As atitudes foram medidas pelo método Clar com uma bússola modelo Bruntom.

5.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

Foi efetuada uma série de ensaios para a fundamentação da caracterização geológico-geotécnica do material brechado visando seu uso como material de base e sub-base na pavimentação de rodovias, bem como ensaios para a caracterização física e mecânica do material em exploração e o seu aproveitamento para usos diversos na construção civil.

Os ensaios foram divididos em dois níveis, de acordo com o tipo de classificação almejada:

5.3.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Este subitem visa a identificação das características mineralógicas das litologias amostradas em campo. Segue a lista de ensaios bem como a sua metodologia de aplicação.

5.3.1.1 Petrografia Microscópica

O estudo de rochas e minerais com a ajuda do microscópio petrográfico é um procedimento obrigatório para quase todos os tipos de trabalho que o geólogo desenvolve. Com este instrumento é possível observar aspectos que, devido à sua reduzida dimensão, não podem ser observados nas amostras de mão.

O microscópio petrográfico de luz transmitida possui uma fonte de luz na parte inferior do microscópio, sendo a luz conduzida por um sistema de lentes que, atravessando a amostra de rocha, permite que esta seja observada. A imagem resultante deste processo é ampliada por um sistema de objetivas e oculares. Desta forma são observadas as características das rochas e minerais quando estes são atravessados pela luz.

Para a confecção das lâminas petrográficas a amostra é sujeita a várias fases até atingir as condições ideais para a microscopia (Fig. 9). Também foram confeccionadas lâminas impregnadas a partir da coleta de amostras das sondagens destrutivas para identificar a mineralogia da rocha a diferentes profundidades. A laminação foi feita no anexo do instituto de geociências da UFRGS e a descrição nos microscópios ópticos do DEMIPE/ UFRGS.

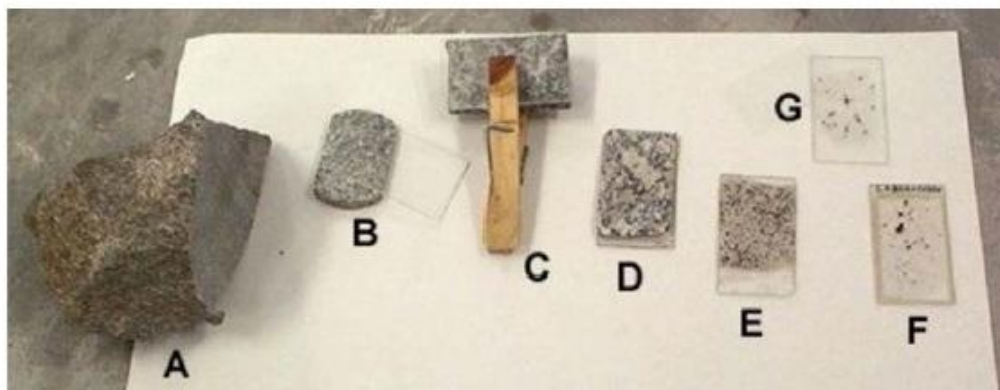


Figura 9: Fases de confecção de uma lâmina petrográfica (Fonte: www.dct.uminho.pt/rpmic/prep_amos.html).

A – Amostra de mão de onde foi cortada uma esquírola.

B – Esquírola de rocha (cerca de 5 mm de espessura) e lâmina de vidro de onde vai ser colada a esquírola.

C – Colagem da esquírola à lâmina de vidro.

D – Amostra já colada na lâmina de vidro.

E – Amostra já depois de ser desgastada.

F – Lâmina delgada já finalizada, depois de polida e com lamela de vidro já colada.

G – Lâmina polida já finalizada.

5.3.1.2 Difratometria por raios X

Raios X são ondas eletromagnéticas e, como tais, acompanhadas por um campo elétrico em flutuação periódica. Um elétron de um átomo, influenciado pelos raios X, é excitado pelo campo elétrico flutuante, tornando-se uma fonte de ondas eletromagnéticas de mesma frequência e mesmo comprimento de onda que os raios X incidentes. Assim, o elétron dispersa o feixe incidente. As ondas dispersas pelos diversos elétrons do átomo combinam-se, daí podendo-se dizer que o átomo difrata a radiação X. A intensidade da dispersão é dependente do número de elétrons no átomo, mas, como os elétrons são distribuídos em todo o seu volume, e não em um ponto, a intensidade varia com a direção. Quando um feixe de raios X atinge um conjunto de átomos (por exemplo, em uma estrutura cristalina), cada átomo difrata raios X (Formoso, M. L. L., 1984).

Se um feixe de raios X atingir um plano de átomos, estes difratam raios X em duas direções principais. Essas direções correspondem, respectivamente, à do prolongamento de feixe incidente e à da reflexão pelo plano. Qualquer plano de cristal correspondente a uma face (hkl) pode ser considerado e o arranjo completo seria um conjunto de planos paralelos ao primeiro. A condição de difração é dada pela lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$$

onde λ é o comprimento de onda da radiação X (aprox. monocromático), d_{hkl} a distância interplanar e θ o ângulo de Bragg, que é o complemento do ângulo de incidência i da óptica geométrica, e n é um número inteiro correspondente à ordem de difração.

Quando um cristal difrata raios X de acordo com a equação de Bragg, cada feixe difratado constitui uma reflexão. Cada reflexão é atribuída a um conjunto de planos (hkl) e, em consequência, a reflexão é designada hkl .

Na equação de Bragg, λ é conhecido porque, na difração de raios X, se usa radiação monocromática; θ pode ser medido no difratograma; e n , número de ordem de difração, também é conhecido. Dessa forma, d_{hkl} passa a ser o único

valor não determinado. As distâncias interplanares de um mineral são características do mesmo modo como o são a densidade, $2V$ e outras constantes, de maneira que um conjunto de valores de d_{hkl} pode identificá-lo.

Os ângulos θ , em que o cristal pode difratar raios X, dependem fundamentalmente dos espaçamentos interplanares d_{hkl} do retículo. Os valores de d , por outro lado, dependem das dimensões da estrutura, significando que as posições de todas as reflexões de raios X de um cristal dependem só das dimensões da célula unitária.

Conforme Formoso (1984), dos métodos de difração de raios X, o de pó é o de uso mais amplo. Os métodos de monocristal são aplicáveis à determinação de estrutura cristalina.

Por outro lado, para o estudo específico de argilominerais, é comum o uso de amostras orientadas com a finalidade de evidenciar as reflexões basais, facilitando, assim, a identificação dos grupos presentes.

A caracterização de minerais (ou fases) pode ser efetuada com o auxílio da difração de raios X.

A primeira fase na identificação dos minerais é a medida das distâncias interplanares e das intensidades relativas dos arcos nos filmes das câmaras de pó ou dos picos nos difratogramas. Diagramas ou tabelas, com resolução direta da equação de Bragg, permitem transformar 2θ (ou θ) em valores de d . Obtidos esses valores, são comparados com difratogramas ou filmes-padrão ou, então, levados a tabelas especialmente preparadas para a identificação de minerais.

Na amostra a identificar, selecionam-se as três reflexões mais intensas, que são comparadas com valores de três reflexões em um volume-índice, tomando como indicadora a reflexão mais forte. Se houver, no volume-índice, valores de três reflexões muito semelhantes às da amostra, ter-se-á um número que indicará o cartão a ser selecionado na coleção. Selecionado o cartão, pode ser feita a comparação com as demais reflexões. A coincidência de valores, ou a quase coincidência, leva à identificação do mineral.

Para a preparação das amostras que foram selecionadas para a identificação de argilominerais foi feita a cominuição até as mesmas atingirem um tamanho de 200 mesh, posterior pesagem e separação de 10 g por amostra.

As análises foram feitas no Laboratório de Difração de raios X do Instituto de Geociências da UFRGS, onde o equipamento disponível é um SIEMENS, Modelo D5000, ano 1992, com goniômetro θ - θ . A radiação é $K\alpha$ em tubo de Cobre nas condições de 40 kV e 25 Ma.

5.3.1.3 Perda ao fogo

Este ensaio foi feito para a verificação dos minerais de alteração das amostras em condições naturais, tendo em vista o padrão de alteração da rocha. O procedimento de preparação de amostras é idêntico ao de difração de raios X e a técnica consiste na exposição das amostras à temperaturas elevadas (1000 °C) por um período de uma hora, e na sequencial pesagem das mesmas em intervalos de tempo também previamente definidos.

As análises foram executadas no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS.

5.3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E TECNOLÓGICA DO AGREGADO

Esta caracterização tem o intuito de identificar as propriedades físicas, a resistência mecânica e durabilidade do material brechado e do material resultante da britagem (minério) extraído da área de estudo. Os ensaios por meio de qualquer teste de resistência são os mais difundidos índices de qualidade de rochas e grau de alteração. Portanto, estes ensaios são importantes para a definição da qualidade do agregado gerado e tem uma metodologia muito detalhada que segue normas específicas para a sua execução. A pesquisa se utilizou das normas do DNER ou ISRM para os ensaios a seguir listados:

5.3.2.1 Determinação da absorção e da densidade do agregado – Norma DNER-ME 195/97

Este ensaio tem como objetivo a determinação da densidade aparente do agregado graúdo e da absorção d'água. A absorção de água de um agregado é usualmente considerada como uma medida de sua porosidade. O grau de saturação, atingido em 24 horas de imersão em água, será diferente de agregado para agregado e será afetado por suas dimensões.

A execução do ensaio consiste em lavar a amostra sobre a peneira 4,8 mm e secar até constância de massa, à temperatura entre 105°C e 110°C. Resfriar, ao ar, à temperatura ambiente entre 1 h a 3 h, para amostra de dimensão máxima característica até 38 mm ou períodos maiores para dimensão maior, de modo que o agregado atinja uma temperatura que permita sua manipulação, cerca de 50°C.

Subsequentemente, imergir o agregado em água, à temperatura ambiente, por um período de (24 ± 4) h. Remover a amostra da água e espalhá-la sobre um pano absorvente no tamanho adequado ate que as películas visíveis de água sejam eliminadas. Enxugar as partículas maiores uma a uma. Tomar os cuidados necessários para evitar a evaporação de água dos poros durante a operação de secagem da superfície dos grãos. Após, determinar a massa da amostra na condição saturada superfície seca e registrar o valor obtido (B), com aproximação de 1 grama. Imediatamente após, colocar o material no recipiente para amostra e imergi-lo completamente em água potável, a temperatura de $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$. Acoplar a haste do recipiente no prato da balança, colocada em nível acima do tanque, e proceder a leitura (C) na sua escala. A balança deve ter sido previamente zerada com o recipiente para amostra, vazio e imerso em água. Secar a amostra em estufa até 24onstancia de massa, à temperatura entre 105°C e 110°C e resfriá-la ao ar à temperatura ambiente entre 1 hora e 3 horas ou até o agregado atingir uma temperatura conveniente para sua manipulação. Determinar, em sequencia, a massa do agregado seco (A). Após determinados os valores medidos no laboratório, aplica-se a seguinte fórmula para o cálculo da massa específica na condição seca:

$$\gamma_s = \frac{A}{B - C}$$

Onde:

γ_s = massa específica do agregado na condição seca, em kg/dm^3 ou em g/cm^3 ;

A = massa do agregado seco, em kg ou g;

B = massa do agregado na condição saturada superfície seca, em kg ou em g;

C = leitura correspondente ao agregado imerso em água, em kg ou em g.

Fórmula para o cálculo da massa específica na condição saturada superfície seca:

$$\gamma_{\text{sss}} = \frac{A}{B - C}$$

Onde:

γ_{sss} = massa específica do agregado na condição saturada superfície seca, em kg/dm^3 ou em g/cm^3 . O valor da diferença numérica $B - C$ é igual ao volume do agregado, aplicado na expressão acima, em dm^3 ou cm^3 .

A absorção é obtida pela expressão abaixo:

$$a = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Onde:

a = absorção do agregado, em porcentagem.

A porosidade da amostra é calculada conforme a fórmula:

$$\eta_a (\%) = \frac{\text{Massa}_{\text{saturada}} - \text{Massa}_{\text{seca}}}{\text{Massa}_{\text{saturada}} - \text{Massa}_{\text{imersa}}}$$

A figura 10 mostra os equipamentos utilizados neste ensaio:



Figura 10: Balança com pesagem por baixo, cesto cilíndrico e tanque com água utilizados no ensaio de determinação dos índices físicos. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

5.3.2.2 Carga pontual – Norma americana ISRM (1985)

O ensaio de carga pontual é um método indireto e mais barato para calcular a resistência à compressão uniaxial das rochas, podendo ser realizado no campo com corpos de prova irregulares. O procedimento sugerido pela ISRM ("International Society for Rock Mechanics") para este ensaio consiste em provocar a ruptura de amostras de rochas com diâmetros variando entre 25 e 100 mm, aplicando uma força pontual crescente. A amostra de rocha é comprimida entre duas ponteiros cônicas de metal duro, que provocam a ruptura por desenvolvimento de fissuras de tração paralelas ao eixo da carga, sendo registrado o valor da carga P que provoca a quebra do corpo de prova. Após uma série de cálculos, levando em consideração as medidas de altura e largura dos corpos de prova e o valor da carga P , determina-se o índice $Is(50)$ médio, que é então multiplicado por uma constante igual a 24 para se obter o valor aproximado da resistência à compressão uniaxial. A figura 11 ilustra o equipamento utilizado para o ensaio. Conforme recomenda a norma, o número de corpos de prova para este ensaio é 10, porém,

para a brecha vulcânica, tendo em vista sua heterogeneidade, utilizou-se 20 corpos de prova.



Figura 11: Aparelho utilizado no ensaio de carga pontual. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

5.3.2.3 Abrasão “Los Angeles” – Norma DNER-ME 035/98

Este ensaio quantifica a resistência à degradação do material sob a ação de esforço mecânico. Calcula-se o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malha quadrada de 1,7 mm (ABNT nº 12). A massa do agregado a ser ensaiado é determinada pela tabela 1.

Neste ensaio foi utilizada a graduação B para as amostras do riocacito e graduação G para a brecha vulcânica alterada devido à dificuldade de se obter material passante na peneira de abertura 12,7 e retido na peneira 9,5 mm para compor a graduação B.

A figura 12 ilustra o equipamento utilizado neste ensaio.

Tabela 1: Graduação para ensaio (DNER-ME 035/98).

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
63	50	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
50	38	—	—	—	—	5000 ± 50	5000 ± 50	—
38	25	1250 ± 25	—	—	—	—	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	—	—	—	—	—	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
9,5	6,3	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
6,3	4,8	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
4,8	2,4	—	—	—	5000 ± 10	—	—	—
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

A carga abrasiva a ser usada para cada graduação deve ser a da Tabela 2.

Tabela 2: Carga abrasiva (DNER-ME 035/98).

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

A abrasão “Los Angeles” do agregado é calculada pela fórmula seguinte:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100$$

Em que:

A_n = abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm).



Figura 12: Máquina utilizada para o ensaio de Abrasão “Los Angeles”. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

5.3.2.4 Sanidade com sulfato de sódio – Norma DNER-ME 089/94

Este método fixa a determinação da resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio.

A amostra deve ser imersa na solução por um período de 16 a 18 horas, de modo que o nível da solução fique 1 cm acima da amostra. O recipiente que contém a amostra imersa na solução deve ser coberto para reduzir a evaporação e evitar a contaminação. Durante o período de imersão a temperatura da solução deve ser mantida a 21°C. Após o período de imersão a amostra deve ser retirada da solução, drenada durante 15 min. E colocada em estufa para secar a 105°C -

110°C, até constância de peso. Depois da secagem, a amostra deve ser esfriada até a temperatura ambiente. O processo de imersão e secagem alternadas constitui um ciclo, que deve ser repetido até que o número desejado de ciclos seja completado, para a pesquisa optou-se por 5 ciclos. As frações maiores que 19 mm devem ser examinadas qualitativamente após cada imersão.

O exame quantitativo é feito, com as amostras já devidamente secas, através do peneiramento com peneiras específicas para cada dimensão de partículas obtidas através do ensaio. A partir disso calcula-se a perda, e a perda ponderada, sendo estas obtidas pela razão da diminuição do tamanho das partículas antes e depois do ensaio.

O exame qualitativo e seu registro devem consistir na observação do efeito da ação do Sulfato de sódio e a natureza dessa ação e contagem do número de partículas afetadas pelo ensaio.

Após o término do último ciclo, calcula-se as perdas por fração e a perda ponderada.

5.3.2.5 Resistência ao atrito e impacto a úmido (Slake-Durability – Norma ISRM (1979))

Uma abundante classe de materiais rochosos, notavelmente aqueles com alto conteúdo de argilas, são propensos ao inchaço, enfraquecimento ou desintegração quando expostos a processos de intemperismo de curto prazo de molhagem e secagem naturais. Testes especiais são necessários para prever esse aspecto do comportamento mecânico. Este ensaio, portanto, tem como objetivo avaliar a resistência oferecida por uma amostra de rocha ao enfraquecimento e desintegração quando submetida a dois ou mais ciclos de umedecimento e secagem.

O ensaio consiste em anotar a massa de 10 fragmentos de rocha, cada um com uma pesando entre 40 e 60 g para fornecer uma massa inicial total de 600 g no máximo, e colocá-los dentro de um tambor revestido com uma malha quadrada de abertura 2 mm e acoplá-lo no equipamento ilustrado na figura 13. O tanque deve ser preenchido com água da torneira até que o nível d'água fique 20 mm abaixo do eixo do tambor. Liga-se o aparelho e a amostra gira a uma velocidade de 20 rpm durante um período de 10 minutos. Ao final desse tempo a amostra é colocada para secar até massa constante em estufa à 105 °C, depois anota-se a massa. Ensaia a amostra e anotar sua massa após secagem em estufa consiste em um ciclo. Para

este trabalho foram realizados cinco ciclos em cada amostra, sendo que para a brecha utilizou-se 20 fragmentos devido à heterogeneidade do material.

O índice de durabilidade de cada ciclo é calculado como a razão percentual das massas da amostra seca final e inicial pela fórmula:

$$I_{dx} = \frac{B - D}{A - D} \times 100\%$$

Onde:

I_{dx} = Índice de durabilidade do ciclo x, onde x = 1, 2, 3....;

A = Massa do tambor mais massa da amostra;

B = Massa do tambor mais porção retida da amostra após resfriamento;

D = Massa do tambor.

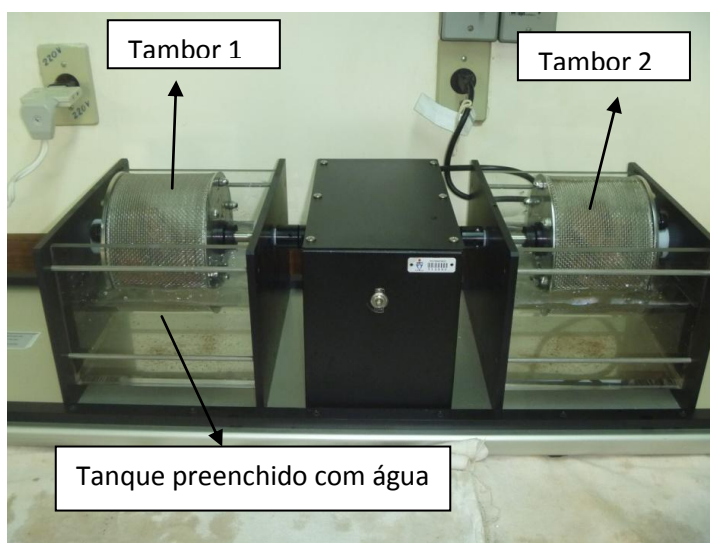


Figura 13: Equipamento utilizado para o ensaio de alterabilidade a úmido.

Fonte: Dados da pesquisa (2014).

6 RESULTADOS

Este item abordará os resultados obtidos nos trabalhos de mapeamento de detalhe da jazida, análises petrográficas e ensaios geotécnicos. Também serão mostrados os resultados do modelamento, indicação volumétrica mínima da brecha vítrea e avaliação estrutural da jazida. As seções geológicas elaboradas com base nos furos de sondagem destrutiva e compilação dos dados do relatório de sondagem se encontram no Apêndice II.

6.1 GEOLOGIA DA MINA

Os trabalhos de mapeamento geológico de detalhe na mina permitiram a identificação de duas unidades vulcânicas, que serão abordadas a seguir (Fig. 14).

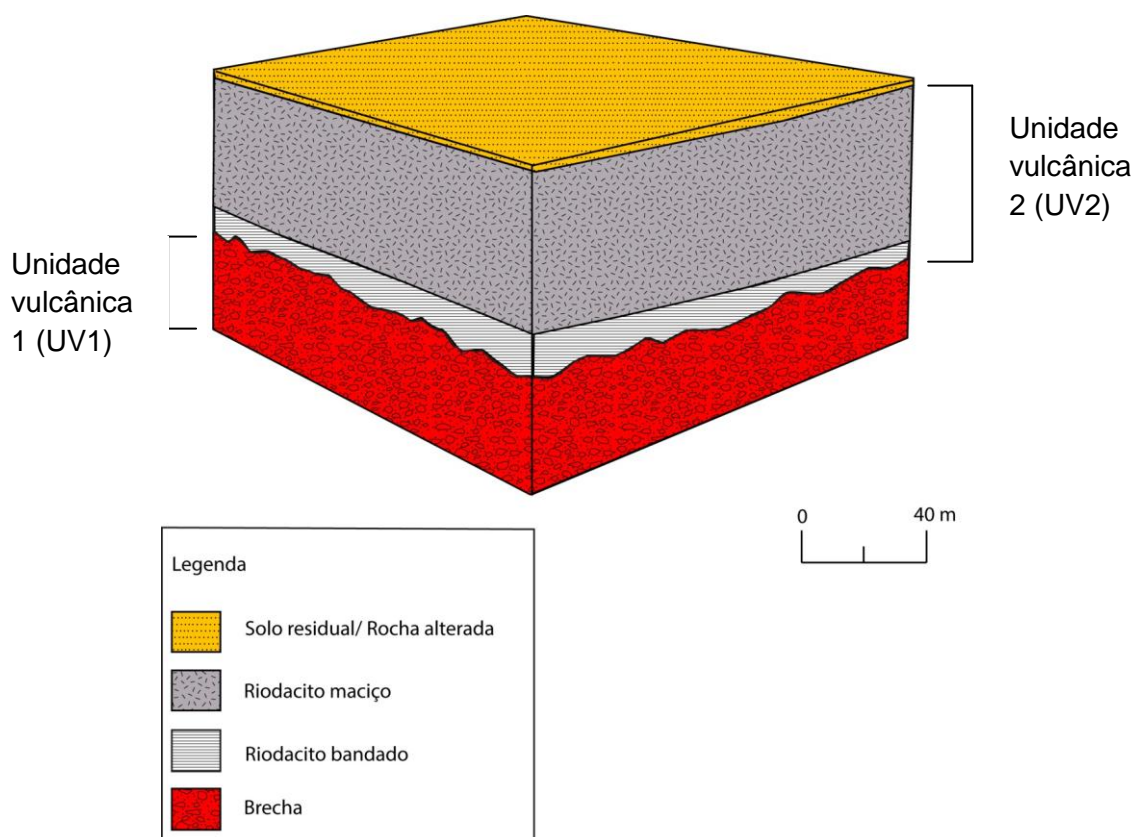


Figura 14: Bloco diagrama mostrando as unidades vulcânicas que ocorrem na área da mina.

Fonte: Dados da pesquisa (2014).

6.1.1 UNIDADE VULCÂNICA 1 (UV1)

Essa unidade aflora nas cotas de fundo das frentes de lavra (745 m) na forma de paleorelevos que variam entre 1 a 3 metros de altura (Fig. 15, 16 e 17) tendo, portanto, contato erosivo com a unidade superior. Trata-se de uma rocha afanítica de cor vermelha, amigdaloidal, com amígdalas milimétricas preenchidas por quartzo, zeólitas e carbonatos, contendo zonas brechadas (autobrechação) que se repetem ao longo de toda a unidade e associada a lentes de vidro vulcânico (pitchstones) de cor preta e brilho resinoso (Fig. 18). As zonas brechadas possuem matriz afanítica de cor vermelha, fragmentos de cor marrom escuro a claro, que variam de 25 a até 50 cm, angulosos a sub-angulosos, afaníticos a vesiculares (pumicíticos) e amigdaloidais (Fig. 19). Quando amigdaloidais, constituem amígdalas milimétricas, ora achatadas, ora arredondadas, preenchidas por carbonatos, zeólitas e quartzo. Esta rocha, por ser muito heterogênea, conter material vítreo e ter porosidade elevada, que será discutida nos resultados, é muito suscetível à alteração intempérica, encontrando-se em estágio mediano de alteração nos afloramentos que ocorrem na mina. Esta unidade também ocorre nas cotas de 706 m, nas proximidade da mina, aflorando como lajeados, porém não se sabe se trata-se da base dessa unidade ou se ainda está na sua zona intermediária. A rocha aflorante nessa cota (Fig. 20) certamente possui melhor qualidade para uso como agregado do que a rocha que ocorre nas cotas de 745 m, pois encontra-se em estado são.

Segundo Bressani *et al.* (2005) e Borsatto (2010), que realizaram trabalhos de mapeamento na região de Caxias do Sul, esta unidade trata-se do Dacito Canyon. Neste trabalho foi adotado o termo **brecha vítrea**.



Figura 15: Detalhe do contato erosivo da UV1 (paleorelevo) com a UV2, destacado pela linha vermelha. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 16: Paleorelevo de 3 metros da UV1. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 17: Contato erosivo da UV1 com a UV2 destacado pela linha vermelha. Paleorelevo de 3 metros. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

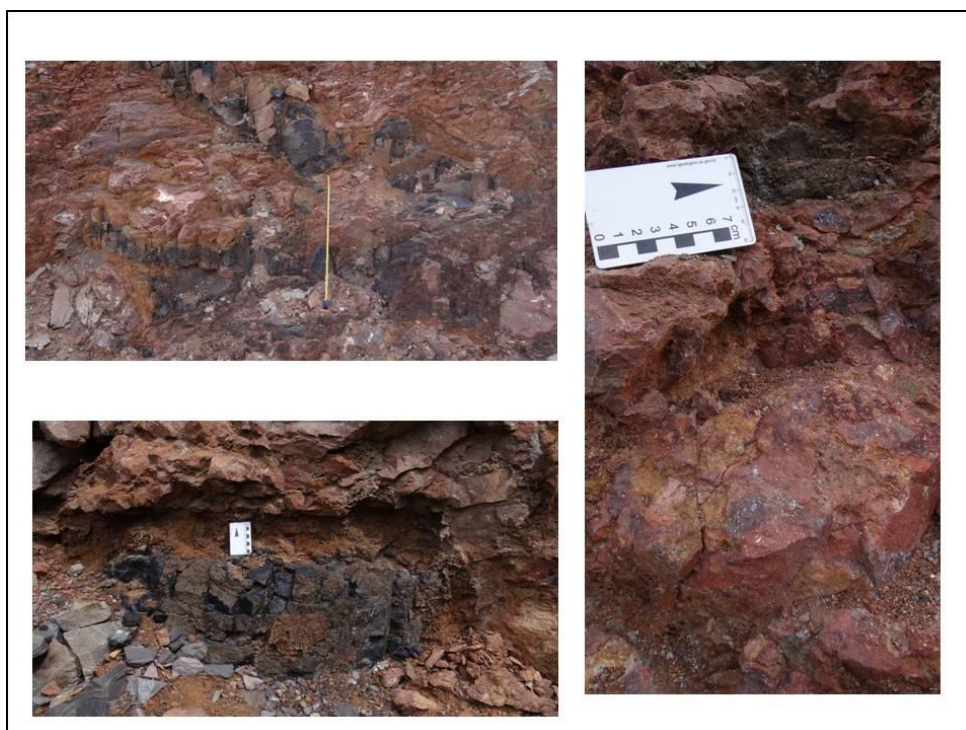


Figura 18: Detalhe do topo da UV1, com lentes de vidro vulcânico de cor preta e brilho resinoso (pitchstones). Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 19: Detalhe do topo da UV1, mostrando os fragmentos de diversos tamanhos, ora afaníticos, ora vesiculares e amigdaloidais. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 20: Blocos pertencentes à UV1, na cota 706, onde podemos notar os mesmos fragmentos amigdalóides que ocorrem no topo dessa unidade. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

6.1.2 UNIDADE VULCÂNICA 2 (UV2)

Essa unidade, aflorante acima da cota 745 m e atingindo até a cota de 785 m, ocorre por toda a área da mina. Possui geometria tabular e trata-se de uma rocha de composição riodacítica, mais homogênea em relação à unidade vulcânica 1 (Fig. 21). A coloração é cinza quando são e cinza escuro amarronzado quando alterada. É leucocrática, holocristalina com estrutura maciça e textura fanerítica fina. É composta por plagioclásio milimétrico de cor esbranquiçada, arredondado, que ocorre com intercrescimento de quartzo, dando um aspecto de textura “sal e pimenta”, também conhecida como textura “carijó” (Fig. 22) que constituem 39% da composição. A matriz da rocha é afanítica, de cor cinza escuro, correspondendo a 60% da composição. Há também esparsos minerais castanhos, ora prismáticos ora mais arredondados, milimétricos, provavelmente correspondendo ao piroxênio e representando 1% da composição da rocha. Ocorre diaclasamento horizontal no topo dessa unidade, com espaçamento centimétrico, atingindo até 7 cm, onde a

rocha está mais alterada. Na zona intermediária ocorrem fraturas com predominância sub-vertical a vertical. As características dessas fraturas (espaçamento, persistência, etc.) serão discutidas na seção 5.3.1.

Na base dessa unidade começa a ocorrer um bandamento ígneo horizontal que atinge cerca de 6 metros de altura, possui continuidade lateral e contato gradacional (Fig. 23). Esse bandamento caracteriza-se por bandas claras alternando-se com bandas de cor escura. As bandas de cor clara são compostas por feldspato com formato esferulítico (textura “carijó”) e medem de poucos centímetros a até 8 cm de espessura. As bandas escuras são afaníticas e medem cerca de 2 a 4 cm de espessura, provavelmente contendo material vítreo em sua composição. Onde a rocha está mais alterada esse bandamento dá origem a um diaclasamento horizontal com espaçamento médio variando entre 5 a 7 cm e a rocha adquire uma coloração cinza escuro a marrom (Fig. 24). À medida que se aproxima do contato com a unidade vulcânica 1, esse bandamento vai ficando mais apertado, com bandas de espessura milimétrica que variam de uma coloração cinza claro a lilás e marrom escuro, aparecendo dobrado algumas vezes (Fig. 25 e Fig. 26). Essa zona atinge uma espessura de 2 m no máximo. Abaixo dessa zona onde o bandamento é milimétrico, a rocha adquire uma coloração marrom avermelhada, com estrutura maciça e textura afanítica, com algumas vesículas esparsas, milimétricas, de formato achatado a esférico. Essa zona é pouco espessa, atingindo 20 cm.



Figura 21: Uma das frentes de lavra onde aflora o Riodacito. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 22: Textura “Carijó” característica da zona maciça (intermediária) do riodacito. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 23: Bandamento ígneo presente na zona de base da UV2.
Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 24: Detalhe da alteração na zona de base da UV2. Bandamento ígneo dando origem ao diaclasamento horizontal, oxidado e preenchido por quartzo. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 25: Base da UV2, próximo ao contato com a UV1. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 26: Detalhe do bandamento milimétrico com dobramentos gerados por fluxo. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

6.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Foram confeccionadas 9 lâminas petrográficas, sendo duas pertencentes ao topo da unidade vulcânica brechada, uma pertencente ao vidro que ocorre associado a essa unidade, três pertencentes ao Riodacito Carijó e três pertencentes ao material coletado em um dos furos realizados com a perfuratriz destrutiva na unidade brechada, em 3 profundidades diferentes.

As amostras da brecha vítrea enviadas para as análises por difratometria por Raios X consistiram em 4.

6.2.1 PETROGRAFIA

Nesta seção são apresentadas as descrições das análises petrográficas microscópicas que foram baseadas na norma NBR 7389/92.

Amostra DCS-M - coletada na zona intermediária da UV2, na cota 760 m.

Composição mineralógica:

A mineralogia da amostra é caracterizada por minerais primários de natureza ígnea e minerais secundários de natureza intempélica e hidrotermal. A contagem modal de cada fase mineral é apresentada na tabela 3.

Tabela 3: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra DCS-M. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

	Fase mineral	Abundância (%)
Minerais primários (magmáticos)	Feldspato alcalino	35
	Quartzo	30
	Plagioclásio	22
	Augita	7
	Minerais opacos	5
	Microfenocristais (feldspato alcalino e augita)	1
Minerais secundários (alteração)	Clorita	<1

Texturas:

A textura predominante é a granofírica (Fig. 27), dada pelo intercrescimento de quartzo e feldspato alcalino. Localmente, ocorre textura microporfirítica (Fig. 27). A matriz é equigranular com textura fina a média.

Estruturas:

Maciça.

Minerais magmáticos:

Ocorrem microfenocristais de sanidina euédricos e de hábito prismático, esparsos, medindo entre 0,3 e 1 mm. A sanidina também ocorre na matriz como

micrólitos euédricos, prismáticos, com dimensões da ordem de 0,15 mm. O plagioclásio também ocorre como micrólitos prismáticos, possuindo dimensões semelhantes a sanidina. O quartzo é residual e proveniente da cristalização do vidro. O clinopiroxênio ocorre como cristálitos na matriz e possui oxidação juntamente com os minerais opacos e ambos ocorrem de forma disseminada. Também ocorre de forma subordinada como microfenocristais de hábito prismático medindo 0,3 mm, apresentando alto grau de oxidação e cloritização de moderada a forte.

Minerais de alteração:

A clorita compõe a fase secundária, formada pela alteração intempérica e hidrotermal do clinopiroxênio.

Classificação petrográfica: Riodacito

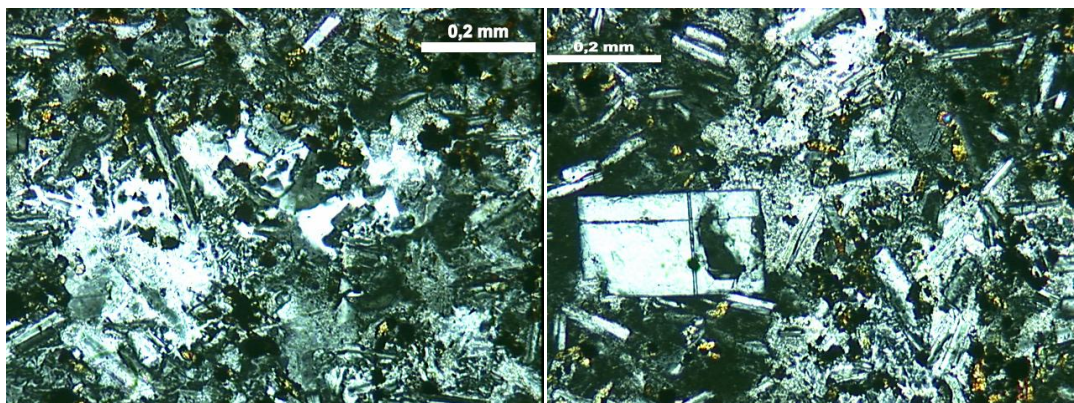


Figura 27: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando a textura granofírica, predominante na rocha. Destaque para microfenocristal de sanidina na imagem da direita. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra SG3 - coletada na zona basal da unidade vulcânica 2.

Composição mineralógica:

A mineralogia da amostra é caracterizada por minerais primários de natureza ígnea, minerais secundários de natureza intempérica e hidrotermal e vidro devitrificado. A contagem modal de cada fase mineral é apresentada na tabela 4.

Tabela 4: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra SG3. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Fase mineral		Abundância (%)
Minerais primários (magmáticos)	Feldspato alcalino	30
	Quartzo	20
	Plagioclásio	17
	Augita	10
	Minerais opacos	7
	Microfenocristais (feldspato alcalino e augita)	1
Minerais secundários (alteração)	Clorita	<1
	Mica branca	<1
Vidro devitrificado		15

Texturas:

A textura granofírica é predominante, ocorrendo também texturas microporfirítica e glomeroporfirítica subordinadas. A matriz é equigranular com textura fina a média.

Estruturas:

Possui bandamento ígneo marcado por diferentes níveis de oxidação.

Minerais magmáticos:

A amostra é composta por microfenocristais de sanidina euédricos a subédricos, prismáticos, da ordem de até 1 mm. Os microfenocristais de clinopiroxênio são subédricos com dimensões de 0,3 mm, e ocorrem intensamente oxidados e cloritizados, formando textura glomeroporfirítica em porções localizadas (Fig. 28). A matriz é composta por vidro devitrificado, oxidado, com crescimento esferulítico de opacos (Fig. 29), quartzo residual e oriundo da cristalização do vidro, micrólitos de sanidina e plagioclásio de hábito prismático e cristálitos de clinopiroxênio.

Minerais de alteração:

A clorita e mica branca compõem a fase secundária, formadas pela alteração intempérica e hidrotermal do clinopiroxênio e da sanidina, respectivamente. A clorita ocorre nas porções do núcleo do clinopiroxênio, e a mica branca ocorre nas microfissuras da sanidina. Também ocorre quartzo secundário preenchendo veios com

espessura próxima de 0,1 mm (Fig. 40), gerados pela percolação de fluídos através das zonas de fraqueza oriundas do bandamento ígneo que ocorre na rocha.

Classificação petrográfica: Riodacito

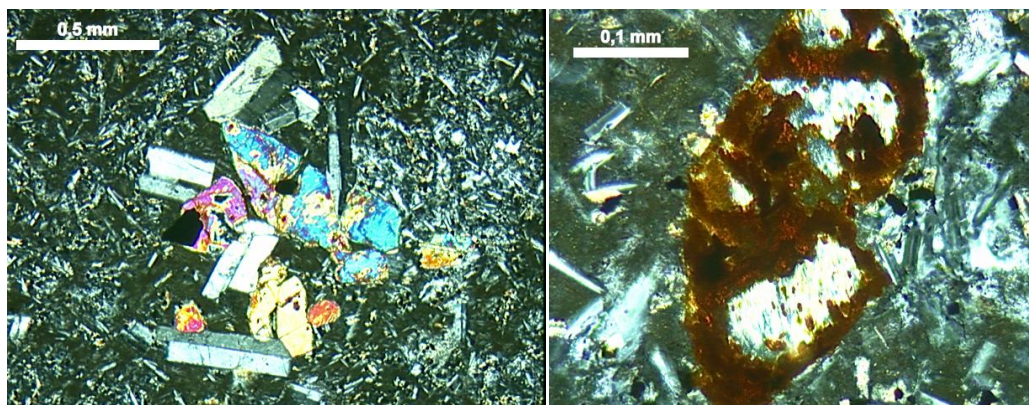


Figura 28: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando textura glomeroporfírica dada pelo agrupamento de augita e sanidina. A imagem da direita mostra um microfenocristal de clinopiroxênio intensamente oxidado e cloritizado. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

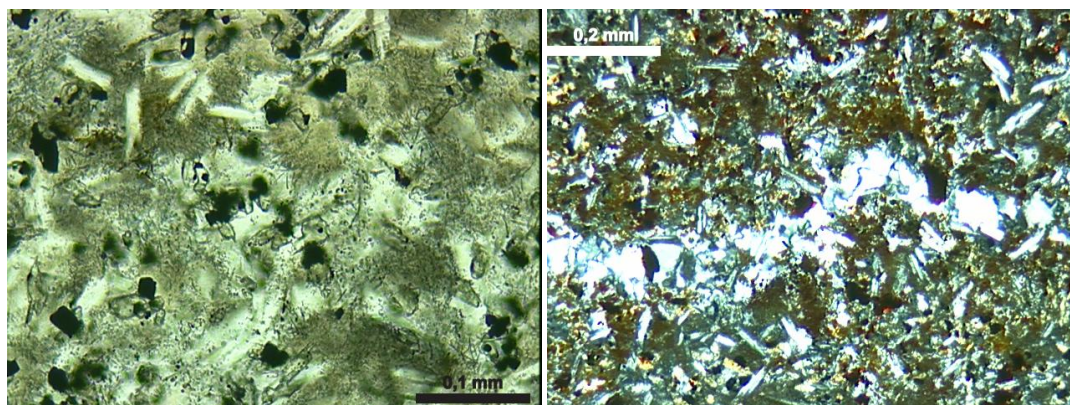


Figura 29: Fotomicrografia com nicóis paralelos mostrando o vidro devitrificado com crescimento esferulítico na imagem à esquerda. À direita, fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando veio preenchido por quartzo. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra 026 - coletada na zona basal da unidade vulcânica 2, próximo ao contato com a unidade vulcânica 1.

Composição mineralógica:

A mineralogia da amostra é caracterizada por minerais primários de natureza ígnea e minerais secundários de natureza intempérica e hidrotermal. A contagem modal de cada fase mineral é apresentada na tabela 5.

Tabela 5: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra 026. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

	Fase mineral	Abundância (%)
Minerais primários (magmáticos)	Feldspato alcalino	37
	Quartzo	35
	Plagioclásio	15
	Augita	7
	Minerais opacos	5
	Microfenocristais (feldspato alcalino e augita)	1
Minerais secundários (alteração)	Clorita	<1

Texturas:

Possui textura microporfirítica formada por microfenocristais de sanidina e augita, textura glomeroporfirítica dada pelo agrupamento desses microfenocristais. E textura granofírica. A matriz é equigranular com textura fina a média.

Estruturas:

Possui bandamento ígneo milimétrico marcado por diferentes níveis de oxidação dos minerais (Fig. 30).

Minerais magmáticos:

Os microfenocristais de sanidina são euédricos, de hábito prismático e ocorrem dispersos, medindo entre 0,6 e 1 mm, apresentando bordas corroídas. Os microfenocristais de clinopiroxênio são subédricos, ocorrem disseminados e medem entre 0,6 e 0,16 mm e estão intensamente oxidados e cloritizados. A matriz da rocha é composta predominantemente por quartzo e micrólitos de sanidina, subordinadamente por micrólitos de plagioclásio, cristálitos de piroxênio e minerais

opacos. O feldspato alcalino e o plagioclásio que ocorrem na matriz são euédricos, de hábito prismático e apresentam orientação segundo o bandamento em algumas porções localizadas da lâmina (Fig. 30).

Minerais de alteração:

A clorita compõe a fase secundária, formada pela alteração intempérica e hidrotermal do clinopiroxênio. Algumas bandas possuem preenchimento por quartzo secundário gerado pela percolação de fluídos e possuem as bordas oxidadas (Fig. 30).

Classificação petrográfica: Riodacito

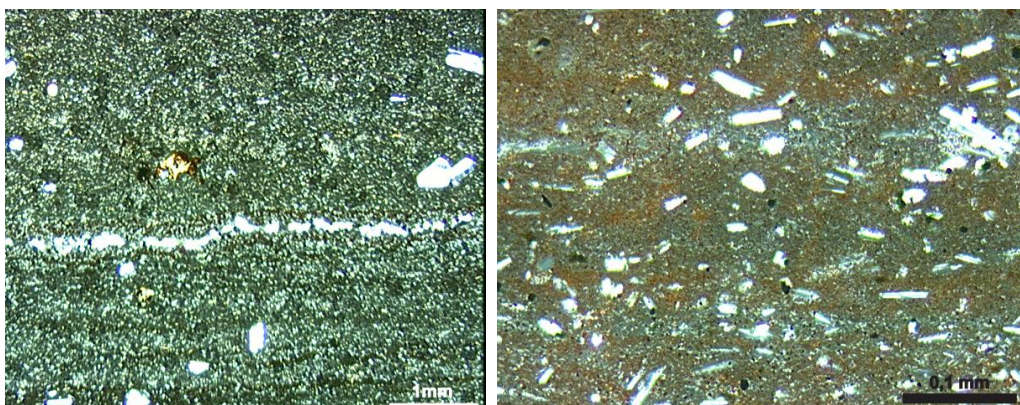


Figura 30: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando o bandamento ígneo marcado por diferentes níveis de oxidação e preenchimento por quartzo secundário. Na imagem á direita, micrólitos de feldspato orientados paralelamente ao bandamento ígneo. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra BRE-2 - coletada em um dos afloramentos da brecha vítrea que ocorrem na mina, na cota 745 m (topo da unidade).

Tendo em vista a grande heterogeneidade dessa rocha, foram coletadas diversas amostras para uma melhor análise dos minerais constituintes.

Composição mineralógica:

Esta amostra corresponde a um dos fragmentos brechados (Fig. 31). A mineralogia da amostra é caracterizada por minerais primários de natureza ígnea, minerais secundários de natureza intempérica e hidrotermal e por vidro parcialmente devitrificado. A contagem modal de cada fase mineral é apresentada na tabela 6.

Tabela 6: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra BRE-2. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Fase mineral		Abundância (%)
Minerais primários (magmáticos)	Microfenocristais (feldspato alcalino e augita)	3
Minerais secundários (alteração)	Clorita	<1
	Mica branca	<1
Vidro parcialmente devitrificado		97%

Texturas:

Possui textura microporfirítica (Fig. 32) em porções localizadas da lâmina e matriz composta por vidro parcialmente devitrificado com crescimento esferulítico, formando uma textura vitrofírica (Fig. 32). A textura glomeroporfirítica também está presente na amostra.

Estruturas:

A estrutura amigdaloidal é registrada na amostra, com amígdalas medindo de 0,5 a 5,0 mm de diâmetro e preenchidas por quartzo e zeólitas secundários.

Minerais magmáticos:

Os microfenocristais são de sanidina e clinopiroxênio e têm tamanhos entre 0,3 e 1,2 mm. A sanidina é euédrica e de hábito prismático, possuindo microfissuras ao longo do mineral e apresenta pequena alteração para mica branca, enquanto o clinopiroxênio é subédrico a anédrico e ocorre parcialmente oxidado e cloritizado.

Minerais de alteração:

Quartzo e zeólita fibrosa de natureza secundária aparecem cimentando os fragmentos da brecha (Fig. 33), formados pelo rápido resfriamento da lava que

posteriormente sofreu o processo de brechação. A mica branca aparece nas microfissuras dos microfenocristais de sanidina.



Figura 31: Amostra BRE-2, da qual foi confeccionada a lâmina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

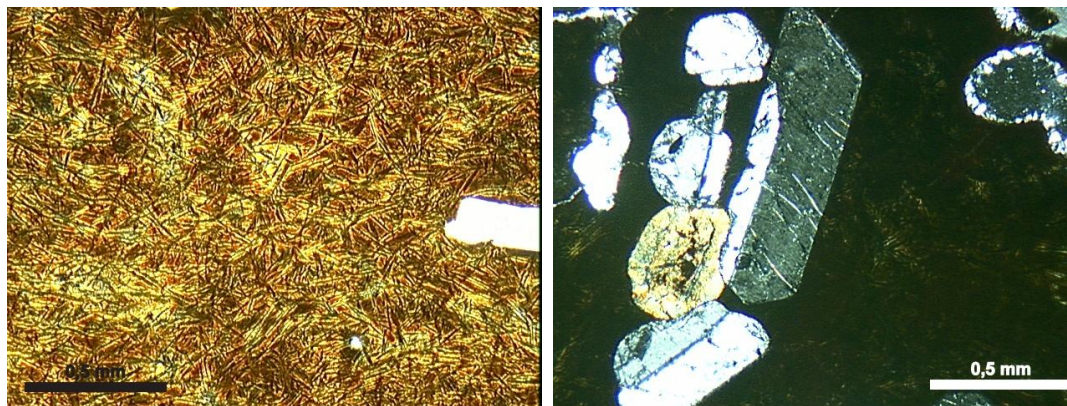


Figura 32: Fotomicrografia com nicóis paralelos na imagem à esquerda mostrando a matriz composta por vidro parcialmente devitrificado. Na imagem à direita, destaque para a textura microporfirítica (nicóis cruzados). Fonte: Dados da pesquisa (2014).

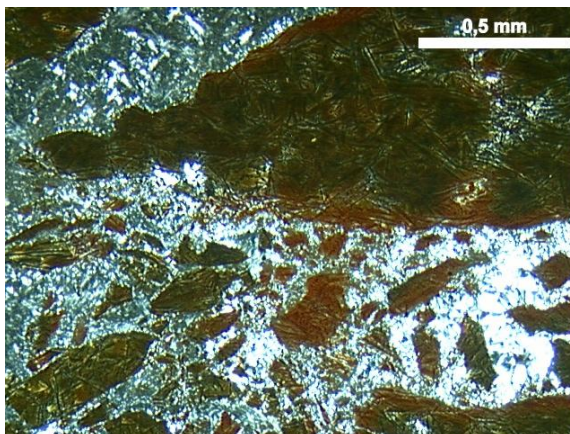


Figura 33: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando a cimentação por zeólita fibrosa.

Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra BRE2-A - coletada em um dos afloramentos da brecha vítrea que ocorrem na mina, na cota de 745 m (topo da unidade).

Composição mineralógica:

Esta é uma amostra da matriz da brecha vítrea (Fig. 34). A mineralogia da amostra é caracterizada por minerais primários de natureza ígnea e por minerais secundários de natureza intempélica e hidrotermal. A contagem modal de cada fase mineral é apresentada na tabela 7.

Tabela 7: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra BRE-2A. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Fase mineral		Abundância (%)
Minerais primários (magmáticos)	Quartzo	50
	Piroxênio	15
	Minerais oxidados	31
Minerais secundários (alteração)	Quartzo e zeólitas	3
Xenocristais	Plagioclásio e quartzo	1%

Texturas:

Apresenta textura equigranular fina.

Estrutura:

Possui estrutura vesicular. As vesículas medem entre 0,14 e 2,4 mm, predominantemente. Há também algumas vesículas que estão preenchidas por zeólitas e quartzo em suas bordas.

Mineralogia:

A amostra apresenta intensa oxidação por toda a lâmina. É composta predominantemente por quartzo oriundo da cristalização do vidro, quartzo secundário (Fig. 35), apresentando cristálitos de piroxênio esqueléticos, com hábito acicular. Ocorrem xenocristais de quartzo e plagioclásio da ordem de 0,1 mm (Fig. 36), que podem estar associados a arenitos de intertraps.



Figura 34: Amostra BRE-2A, da qual foi confeccionada a lâmina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

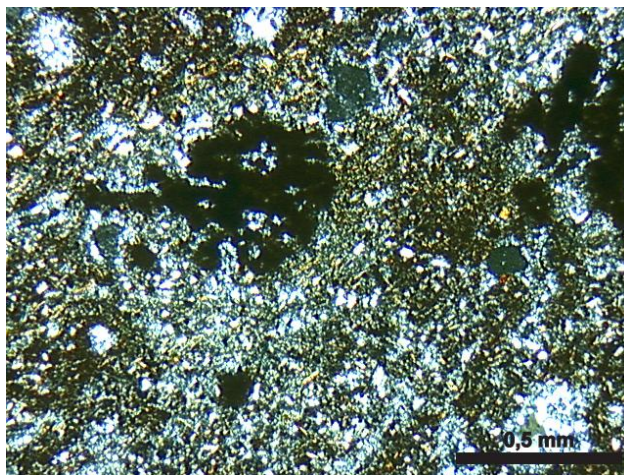


Figura 35: Fotomicrografia com nicóis cruzados ilustrando a grande quantidade de quartzo e intensa oxidação da rocha. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

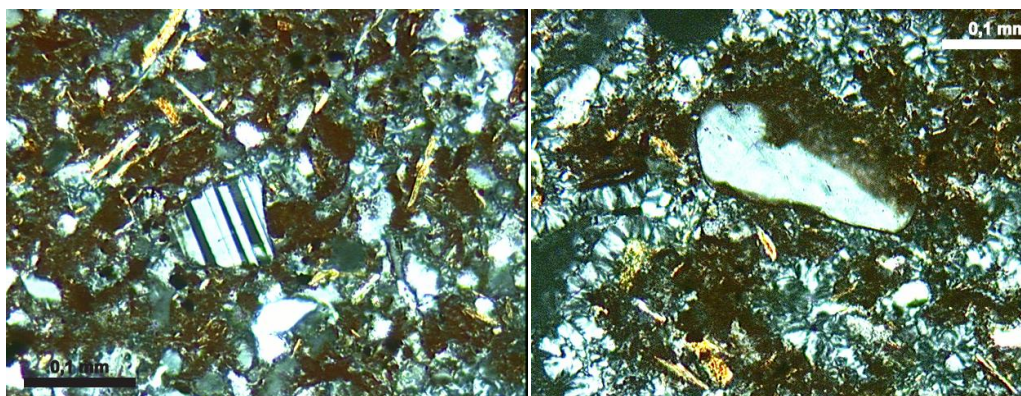


Figura 36: Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando os xenocristais de plagioclásio (esquerda) e quartzo (direita). Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra VDR1 - coletada em um dos afloramentos da brecha vítrea que ocorrem na mina, na cota 745 m (topo da unidade).

Composição mineralógica:

A mineralogia da amostra é caracterizada por minerais primários de natureza ígnea e principalmente por material vítreo (vidro vulcânico). A contagem modal de cada fase mineral é apresentada na tabela 8.

Tabela 8: Contagem modal dos minerais constituintes da amostra VDR1. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Fase mineral		Abundância (%)
Minerais primários (magmáticos)	Microfenocristais (feldspato alcalino e clinopiroxênio)	3
Material vítreo		97

Texturas:

Ocorrem texturas microporfírica e glomeroporfírica.

Estrutura:

Maciça.

Mineralogia:

A amostra possui matriz holohialina (Fig. 37). Os microfenocristais são compostos por sanidina, plagioclásio e clinopiroxênio. A sanidina é euédrica e possui dimensões entre 0,2 a 1,2 mm e possui macla Carlsbad. O plagioclásio é subordinado, euédrico, e varia de 0,3 a 0,7 mm, enquanto o clinopiroxênio é subédrico a anédrico e possui dimensões da ordem de 0,5 mm.

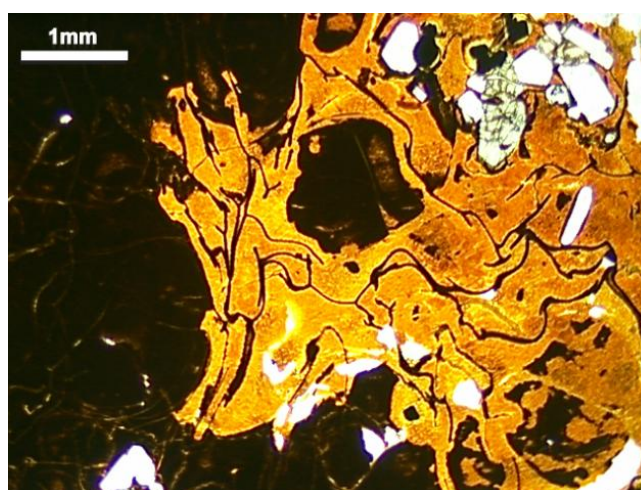


Figura 37: Fotomicrografia com nicóis paralelos mostrando textura glomeroporfírica com microfenocristais de sanidina, plagioclásio e clinopiroxênio imersos em uma matriz vítrea.

Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra BRE1 - fragmentos da brecha vítrea coletados do furo FP1 realizado com a perfuratriz hidráulica na profundidade de 6 metros (localização do furo no apêndice I).

Mineralogia:

Os fragmentos analisados constituem-se de material vítreo, por vezes amigdaloides, com preenchimento de quartzo secundário, zeólitas e brechação intensa. Predominam fragmentos vítreos e subordinadamente fragmentos de vidro parcialmente cristalizado e parcialmente devitrificado, com forte oxidação (Fig. 38). Para esta amostra não foi feita a composição modal, visto que a lâmina foi confeccionada a partir de pequenos fragmentos da unidade. Alguns fragmentos vítreos apresentam alteração para esmectita por todo o fragmento e também ao longo de fraturas perlíticas.

Texturas:

Ocorrem também fragmentos vítreos contendo microfenocristais de sanidina e clinopiroxênio, formando texturas glomeroporfírica e microporfírica, com dimensões entre 0,16 e 0,5 mm (Fig. 38).

Estruturas:

Amigdalóide. Amígdalas preenchidas por quartzo e zeólitas de origem secundária.

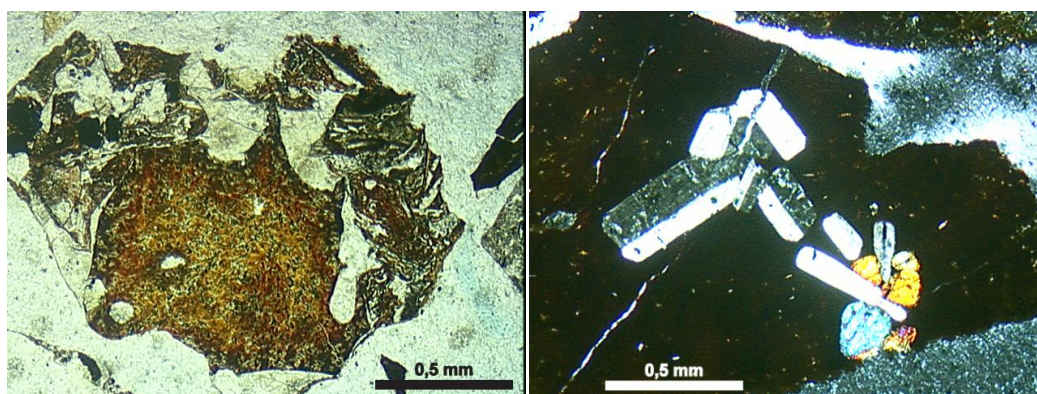


Figura 38: Fotomicrografia com nicóis paralelos (esquerda) mostrando um fragmento de vidro parcialmente devitrificado. Na imagem à direita, fragmento vítreo com textura microporfírica e glomeroporfírica (nicóis cruzados). Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra RD2 - fragmentos da brecha vítrea coletados do furo FP1 realizado com a perfuratriz hidráulica, correspondente à profundidade de 14 metros.

Mineralogia:

Os fragmentos analisados apresentam brechação e são constituídos por vidro (Fig. 39), vidro devitrificado, por vezes com crescimento esferulítico e vidro cristalizado para quartzo (Fig. 39), apresentando forte oxidação. Ocorre quartzo secundário criptocristalino (calcedônia) cimentando os fragmentos. Nos fragmentos coletados nesta profundidade a brechação é mais intensa. Também ocorrem fragmentos de vidro devitrificado com microfenocristais de sanidina e piroxênio da ordem de 0,3 mm. Para esta amostra não foi feita a composição modal, visto que a lâmina foi confeccionada a partir de pequenos fragmentos da unidade. Alguns fragmentos vítreos possuem alteração para esmectita e celadonita.

Texturas:

Ocorrem texturas microporfírica e glomeroporfírica, com os microfenocristais imersos em uma matriz vítrea parcialmente devitrificada.

Estruturas:

Alguns fragmentos apresentam estrutura amigdaloidal, com amígdalas da ordem de 1,2 mm preenchidas por zeólitas e calcedônia.

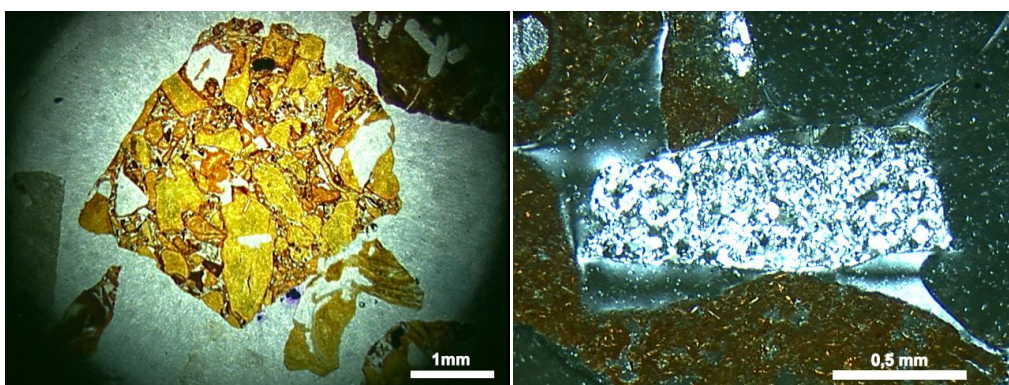


Figura 39: Fotomicrografia com nicóis paralelos mostrando um fragmento de vidro com forte brechação. Na imagem á direita, fragmento de vidro cristalizado para quartzo (nicóis cruzados). Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra RD3 - fragmentos da brecha vítrea coletados do furo FP1 realizado com a perfuratriz hidráulica, correspondente à profundidade de 21 metros.

Mineralogia:

Predominam fragmentos de vidro cristalizado para quartzo, parcialmente cristalizado para feldspato e vidro devitrificado com crescimento esferulítico, apresentando forte oxidação (Fig. 40). Também ocorre quartzo secundário criptocristalino (calcedônia) cimentando os fragmentos. Os fragmentos constituídos por material vítreo e com brechação ocorrem subordinadamente. Alguns fragmentos de vidro devitrificado possuem microfenocristais de sanidina e piroxênio da ordem de 0,3 mm. Há fragmentos vítreos com alteração para esmectita e celadonita ao longo de todo o fragmento e nas fraturas perlíticas. Para esta amostra não foi feita a composição modal, visto que a lâmina foi confeccionada a partir de pequenos fragmentos da unidade.

Texturas: As texturas microporfirítica e glomeroporfirítica se repetem, com os microfenocristais imersos em uma matriz vítrea parcialmente devitrificada.

Estruturas:

Alguns fragmentos apresentam estrutura amigdaloidal, com amígdalas da ordem de 1,2 mm preenchidas por zeólitas e calcedônia.

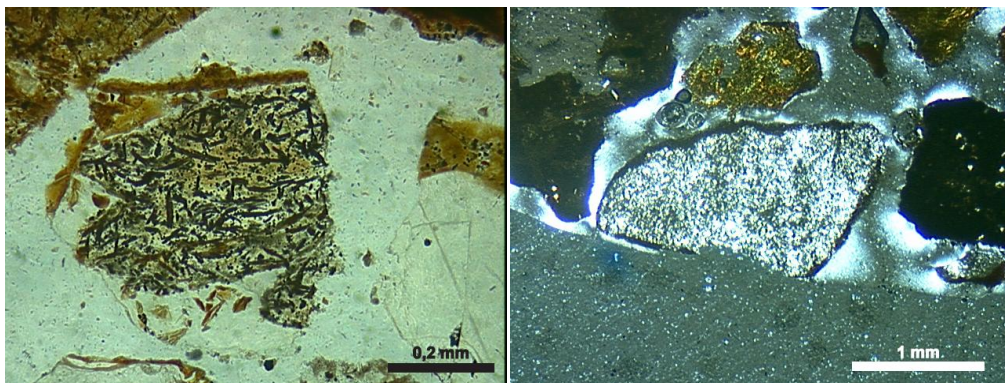


Figura 40: Fotomicrografia com nicóis paralelos mostrando um fragmento de vidro parcialmente devitrificado (esquerda). Na imagem à direita, fragmento de vidro cristalizado para quartzo e cimentação por calcedônia nas bordas dos fragmentos (nicóis cruzados).

Fonte: Dados da pesquisa (2014).

6.2.2 ANÁLISE POR DIFRATOMETRIA POR RAIOS X

As amostras analisadas consistiram em 4 e foram identificadas como BRE-1, RD-2, RD-3 e BRE-2. As amostras BRE-1, RD-2 e RD-3 correspondem às amostras da brecha vítrea coletadas do furo FP1 realizado com a perfuratriz destrutiva nas profundidades de 6 m, 14 m e 21 m, respectivamente. A amostra BRE-2 corresponde à brecha vítrea coletada nos afloramentos da mina na cota 745 m.

Os minerais secundários são argilominerais, silicatos não cristalinos, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e carbonatos. Os de maior importância aqui encontrados são os minerais de argila. Estes compostos (argilominerais) apresentam propriedades de expansão quando em contato com a água, fato que os torna muito importantes para a engenharia civil.

Argilominerais do grupo das esmectitas possuem carga elétrica, alto poder de retenção de água e expansibilidade levada. Caracterizam-se por apresentar em sua estrutura moléculas de água entre as unidades estruturais (2:1) e, como a água penetra com grande facilidade entre essas camadas, as esmectitas são de fácil dispersão na água, grande expansão e alta plasticidade.

As ílitas são estruturalmente análogas às esmectitas, sendo porém menos expansivas porque as duas camadas de tetraedros de sílica que envolvem a lâmina

de octaedros de alumínio possuem mais rigidez e impõem maior dificuldade à penetração da água.

As análises revelaram a presença de argilominerais do grupo das esmectitas e ilitas nas amostras BRE-01 (Fig. 41), RD-02 (Fig. 42) e RD-03 (Fig. 43). Na amostra BRE-02 ocorrem argilominerais do grupo das ilitas (Fig. 44).

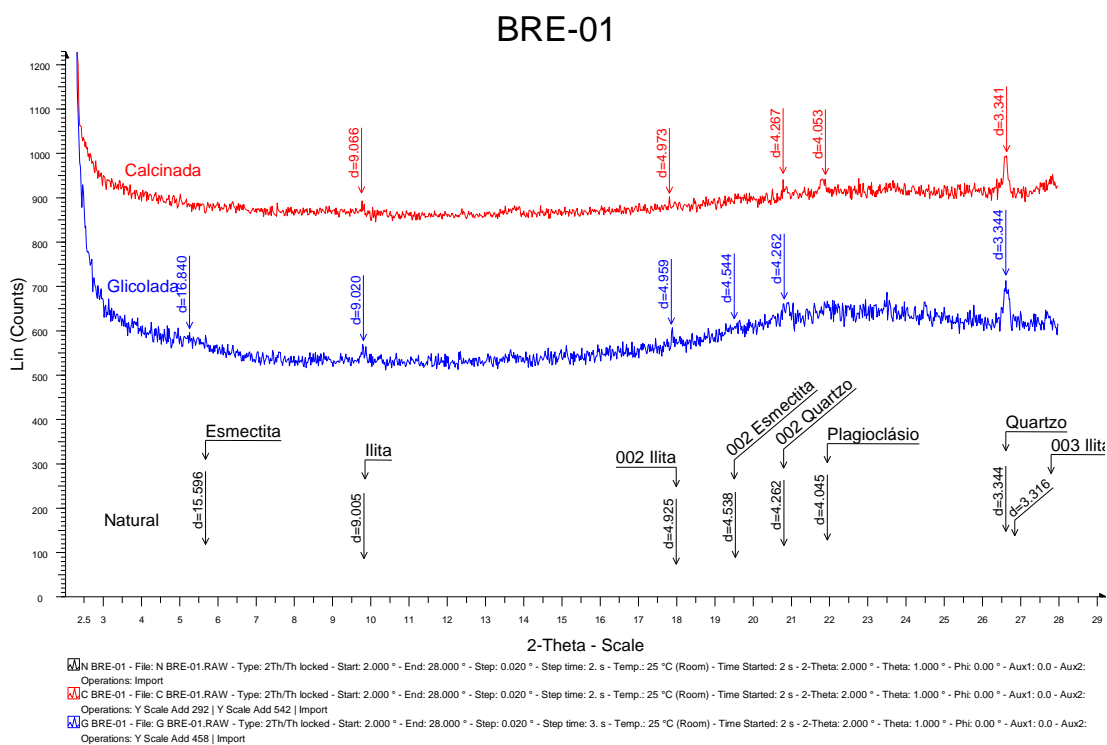


Figura 41: Difratoograma de Raios X, brecha vítrea, amostra BRE-01 coletada na profundidade 6 m. Fração < 2 µm. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

RD-02

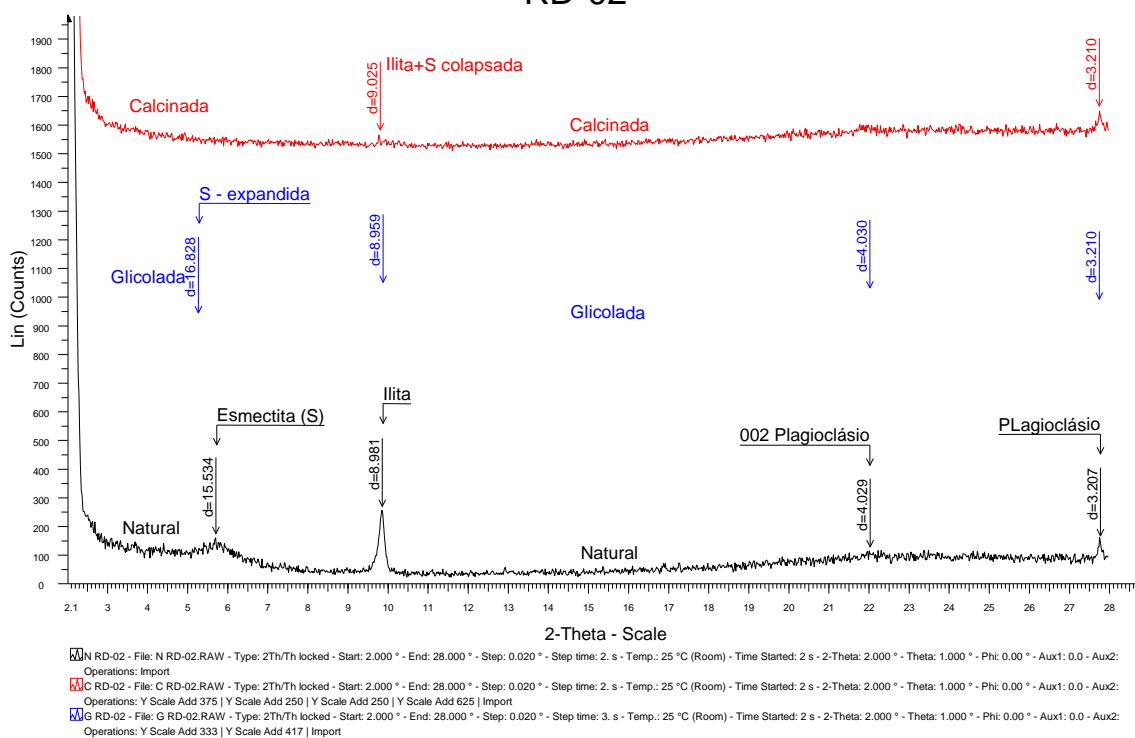


Figura 42: Difratoograma de Raios X, brecha vítrea, amostra RD-02 coletada na profundidade 14 m. Fração < 2 μm . Fonte: Dados da pesquisa (2014).

RD-03

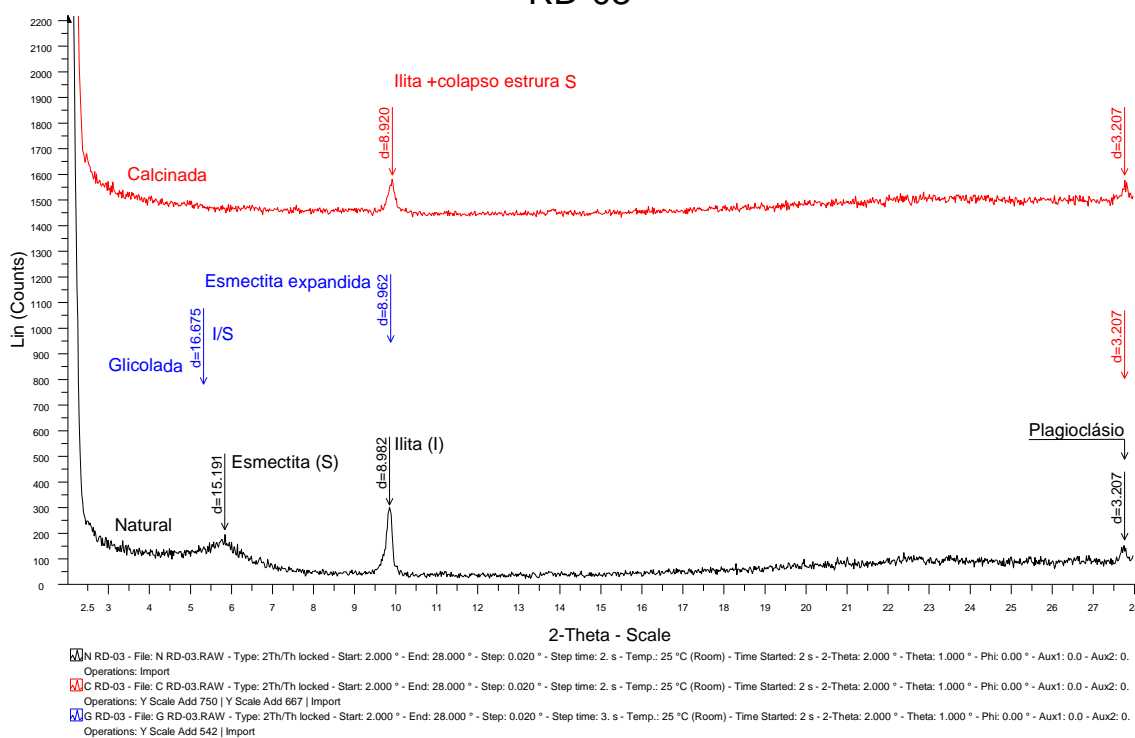


Figura 43: Difratoograma de Raios X, brecha vítrea, amostra RD-03 coletada na profundidade 21 m. A: Rocha total; B: fração < 2 μm . Fonte: Dados da pesquisa (2014).

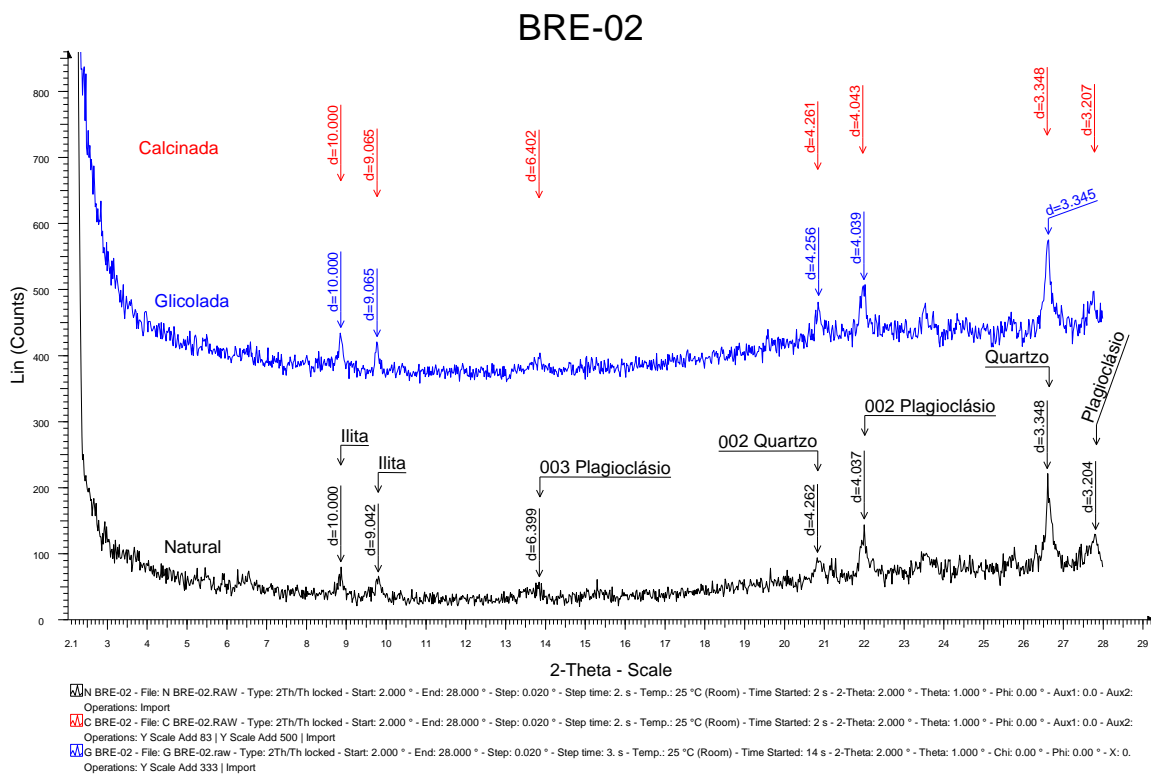


Figura 44: Difratoograma de Raios X, brecha vítrea, amostra BRE-02 coletada na cota 745 m. Fração < 2 µm. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

6.2.3 PERDA AO FOGO

A tabela 9 mostra os resultados no ensaio de perda ao fogo. As amostras BRE-1, RD-2 e RD-3 correspondem às amostras da brecha vítrea coletadas em furo FP1 realizado com a perfuratriz destrutiva nas profundidades de 6 m (cota 739), 14 m (cota 731) e 21 (cota 724) m, respectivamente. As amostras VDR-1 e BRE-2 correspondem ao vidro (*pitchestone*) e à brecha vítrea, respectivamente, coletadas nos afloramentos da mina (cota 745). A amostras DCSM corresponde ao riodacito maciço.

Tabela 9: Resultados da perda ao fogo (perda de massa em % média). Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Amostra	% Média
BRE-1	1,50
RD-2	4,77
RD-3	5,05
VDR-1	4,25
BRE-2	1,50
DCSM	0,76

6.3 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

A tabela 10 compara os resultados dos ensaios realizados para as unidades vulcânicas que ocorrem na mina.

Tabela 10: Resultados dos ensaios geotécnicos para os materiais rochosos que ocorrem na mina Maestra. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Ensaio	Riodacito Carijó		Brecha vítrea	
Desgaste por abrasão “Los Angeles” (%)	13,6		30	
Índice de durabilidade (%)	Ciclo1	99,85	Ciclo 1	99,17
	Ciclo2	99,74	Ciclo 2	98,03
	Ciclo3	99,63	Ciclo 3	97,64
	Ciclo 4	99,60	Ciclo 4	96,61
	Ciclo 5	99,48	Ciclo 5	95,92
Absorção de água (%)	2,6		8,2	
Massa específica aparente (g/cm³)	2,5		2,2	
Porosidade (%)	6,7		17,4	
Índice de carga pontual Is50 (MPa)	6,7		3,1	
Resistência à compressão uniaxial estimada (MPa)	161,6		75,2	
Perda ponderada no ensaio de sanidade com sulfato de sódio (%)	3		25	

A tabela 11 mostra as perdas por fração obtidas no ensaio de durabilidade ao sulfato de sódio, que também são mostradas no gráfico da figura 45.

Tabela 11: Comparação das perdas por fração das amostras submetidas ao ensaio de durabilidade. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Abertura das peneiras (preparação das frações)				Perda em massa (%)	
Passado		Retido		Riodacito Carijó	Brecha vítrea
(mm)	peneira	(mm)	peneira		
63,5	2 ½"	50	2"	0,7	11,6
50	2"	38	1 ½"	0,4	22,7
38	1 ½"	25	1"	1,6	20,2
25	1"	19	¾"	6,5	40,1
19	¾"	12,7	½"	5,4	28,7
12,7	½"	9,5	3/8"	8,8	58,8
9,5	3/8"	4,8	malha nº 4	2,6	33,2
9,5	3/8"	4,8	malha nº 4	4,4	42,4
4,8	malha nº 4	2,4	malha nº 8	5	32,6
2,4	malha nº 8	1,2	malha nº 16	8,9	38,4
1,2	malha nº 16	0,6	malha nº 30	3,5	28,3
0,6	malha nº 30	0,3	malha nº 50	6,9	23,8

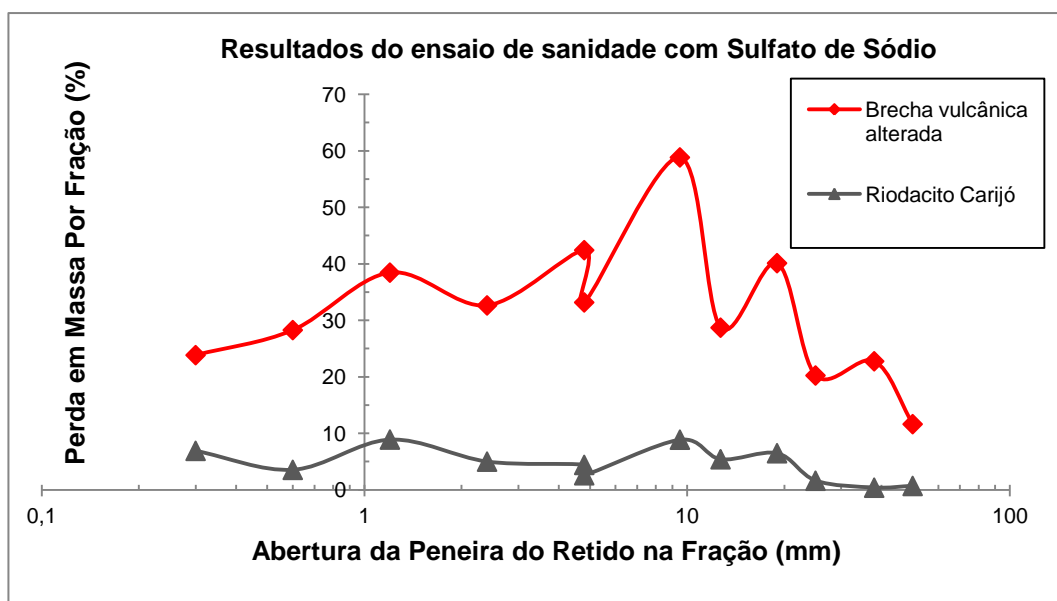


Figura 45: Curva de perdas por fração obtidas no ensaio de durabilidade. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

As figuras 46 a 55 ilustram o antes e o depois das amostras submetidas aos diferentes ensaios tecnológicos.



Figura 46: Esquerda: Brecha vítrea antes do ensaio de abrasão “Los Angeles”. Direita: Após o ensaio. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 47: Esq.: Brecha vítrea antes do ensaio de durabilidade (frações de 50 a 9,5 mm). Dir.: Frações de 9,5 a 0,3 mm. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

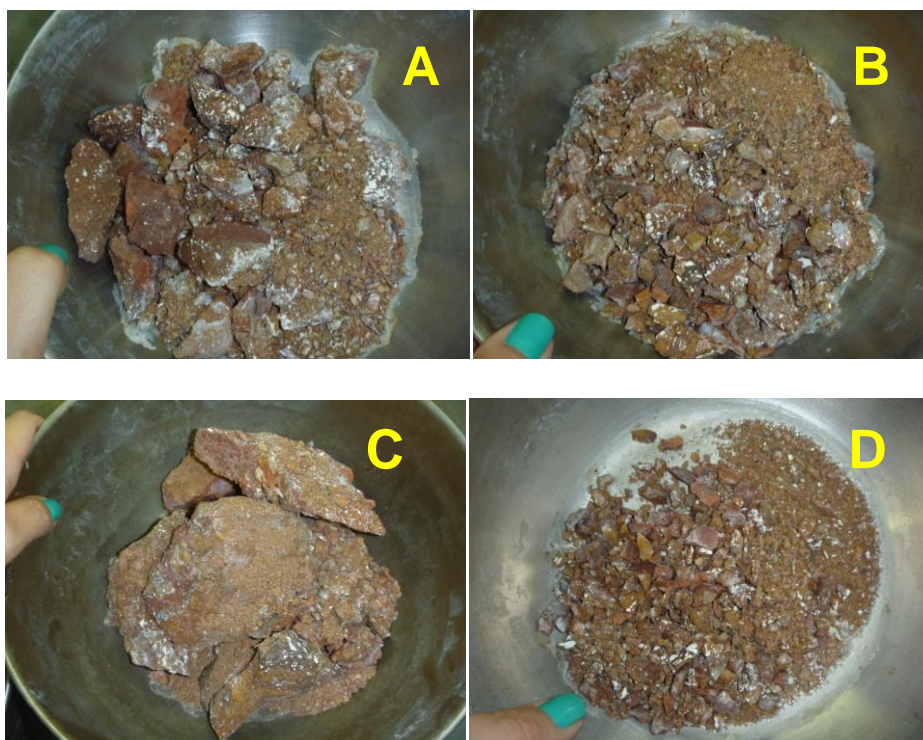


Figura 48: Detalhe da degradação da brecha após o ensaio. A: Fração retida na peneira de abertura 19 mm. B: fração retida na peneira de abertura 9,5 mm. C: fração retida na peneira de abertura 50 mm. D: fração retida na peneira de abertura 4,8 mm. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 49: Amostras 1 (esquerda) e 2 (direita) da brecha vítrea antes do ensaio de alterabilidade a úmido (slak-durability). Fonte: Dados da pesquisa (2014).

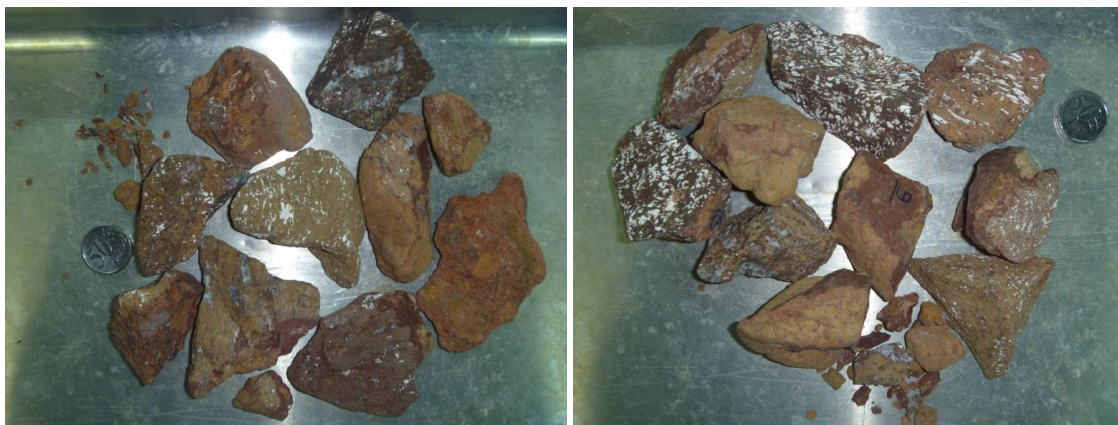


Figura 50: Brecha vítrea após o 5º ciclo do ensaio de alterabilidade a úmido (slake-durability), pouco fragmentada e com as bordas arredondadas. Dir.: Amostra 2. Esq.: amostra 1. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 51: Brecha vítrea antes do ensaio de carga pontual (acima) e após o rompimento (abaixo). Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 52: Riodacito antes do ensaio de durabilidade com sulfato de sódio. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 53: Algumas frações após o ensaio. Não houve fendilhamento e a degradação foi muito baixa. A: 19 mm. B: 9,5 mm. C: 4,8 mm. D: 2,4 mm. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 54: Riodacito antes do ensaio de alterabilidade a úmido. Dir.: Após o 5º ciclo do ensaio, mostrando pouquíssima fragmentação. Fonte: Dados da pesquisa (2014).



Figura 55: Riodacito antes do ensaio de carga pontual (esquerda) e após o rompimento (direita).
Fonte: Dados da pesquisa (2014).

6.4 AVALIAÇÃO DA JAZIDA

Este sub-item tratará dos resultados do levantamento estrutural da jazida, realizado no riodacito, cubagem e modelamento da brecha vítrea. O levantamento estrutural torna-se importante porque terá influência na adequada orientação dos planos de fogo, a serem realizados por um profissional da Engenharia de Minas.

6.4.1 ANÁLISE ESTRUTURAL DA JAZIDA

A figura 56 mostra as principais direções dos lineamentos que ocorrem nas proximidades da mina Maestra, com base nos trabalhos de Bressani *et al.* (2005), no qual predominam as direções NE-SW e NW-SE.

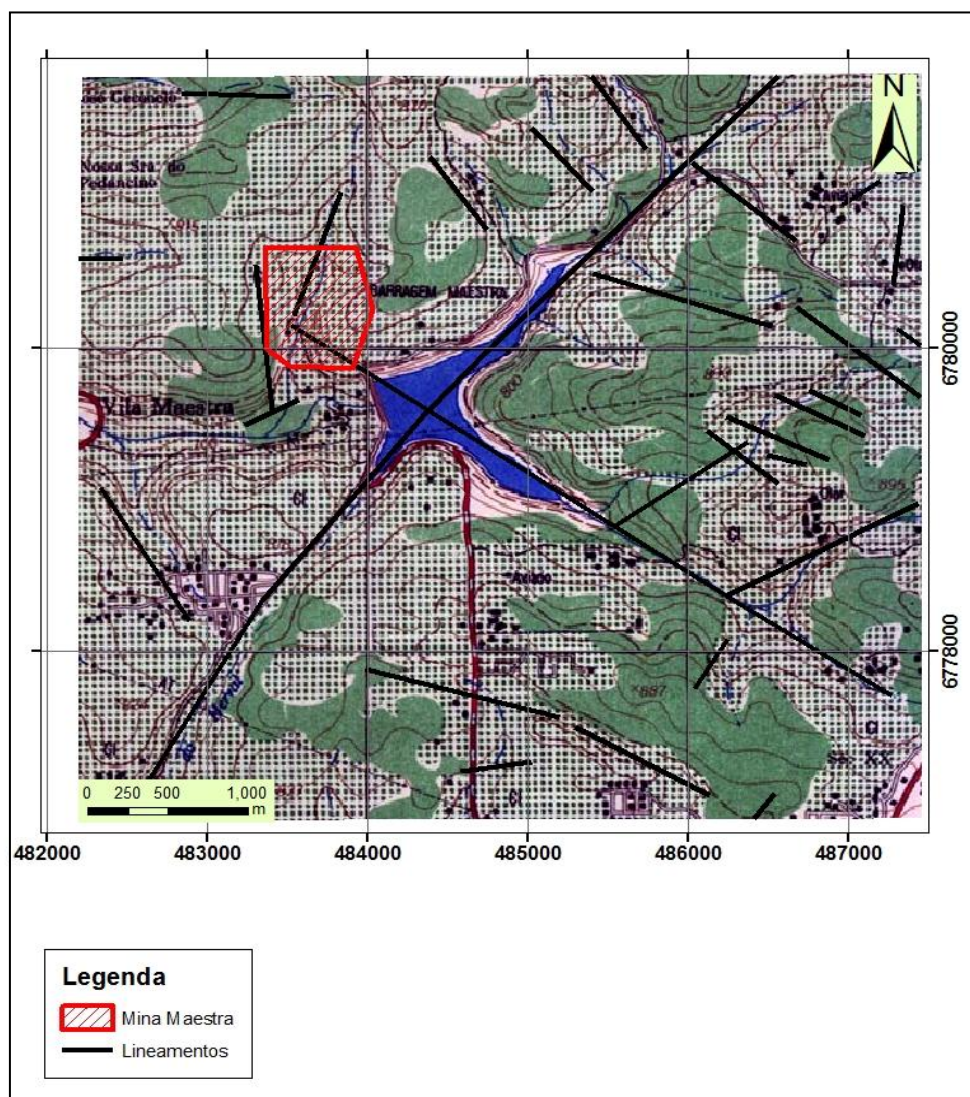


Figura 56: Principais direções dos lineamentos que ocorrem na área de estudo. Modificado de Bressani *et al.* (2005).

Os resultados do levantamento estrutural efetuado na mina são apresentados em diagramas de densidade de pólos (Fig. 57) e de roseta (Fig. 58), obtidos através do *software* Stereo32. Pela análise desses diagramas, as atitudes das descontinuidades obtidas foram agrupadas em duas famílias, todas com ângulo de mergulho elevado. A tabela 12 mostra as principais atitudes dessas famílias.

Tabela 12: Atitudes principais de cada família de descontinuidade predominante na mina.

Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Famílias	Rumo do mergulho (°)	Ângulo do mergulho (°)
Família 1	5	88
	195	88
	165	85
	345	88
Família 2	75	88
	250	85

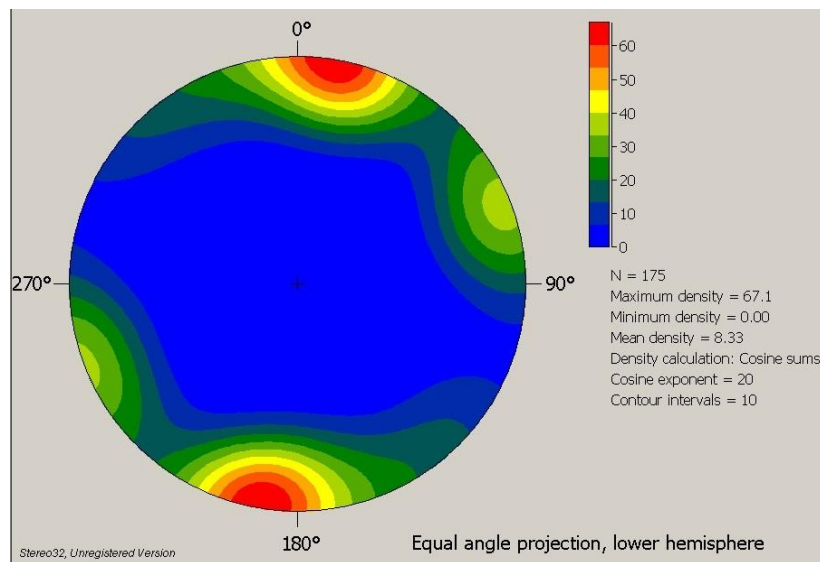


Figura 57: Diagrama de densidade dos pólos das principais famílias de descontinuidades presentes na mina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

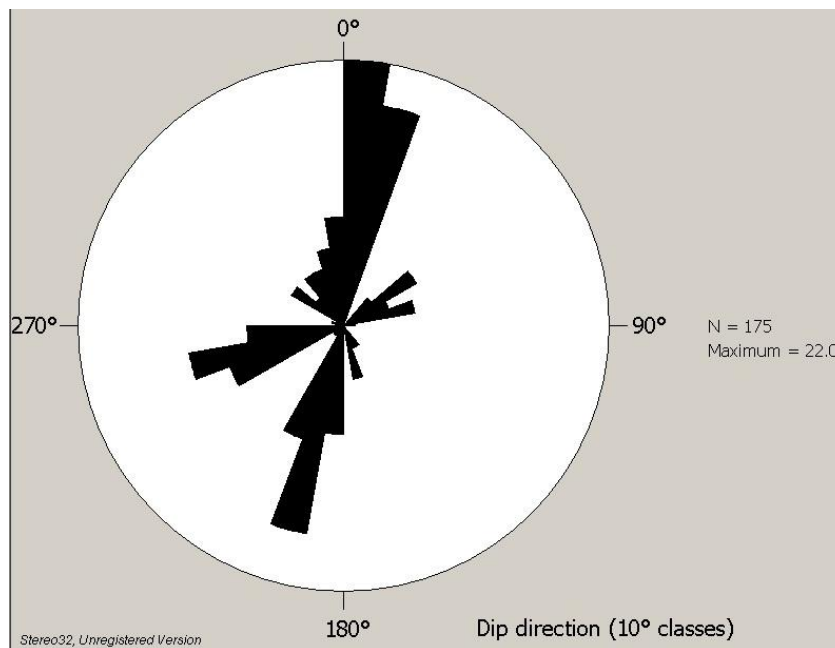


Figura 58: Diagrama de roseta com a direção de mergulho das principais famílias de descontinuidades observadas na mina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

O quadro 1 apresenta os parâmetros avaliados e as características modais observadas nas descontinuidades do maciço rochoso. Esses parâmetros foram avaliados de acordo com a norma ISRM (1978).

A extensão em área de uma descontinuidade corresponde à sua **persistência** ou **continuidade**. Como o acesso aos meios rochosos, usualmente, limita-se a poucas superfícies, sua determinação é feita medindo-se a extensão do traço do plano. A persistência tem especial influência na resistência ao cisalhamento dos maciços rochosos.

O **espaçamento** corresponde à distância entre duas descontinuidades adjacentes de uma mesma família. Em termos práticos, considera-se a distância entre quaisquer duas descontinuidades contíguas. A tabela 13 mostra como o espaçamento pode ser expresso por meio da adoção de intervalos de variação numérica, que contém um critério muito usual, mas não único.

Tabela 13: Espaçamento de descontinuidades (ABGE, 1983).

Siglas	Espaçamento (cm)	Denominações
E1	>200	Muito afastadas
E2	60 a 200	Afastadas
E3	20 a 60	Medianamente afastadas
E4	6 a 20	Próximas
E5	<6	Muito próximas

Esta característica interfere significativamente no comportamento do meio rochoso, em relação à deformabilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade.

A **rugosidade**, correspondente a ondulações nas superfícies das descontinuidades, influencia especialmente a resistência ao cisalhamento, sobretudo quando se trata de descontinuidades não-preenchidas, conferindo um incremento ao ângulo de atrito, até um nível de tensões a partir do qual verifica-se a sua ruptura.

A distância entre as paredes de uma descontinuidade, medida no sentido ortogonal, corresponde à sua **abertura**. Quando as descontinuidades, que ocorrem num meio rochoso se encontram fechadas, as propriedades do maciço podem ser equiparadas às do material que o constitui. Se ocorrem abertas, a sua influência poderá ser muito importante consoante elas se encontrem preenchidas ou não.

O tipo de **preenchimento** tem influência notável nos parâmetros geotécnicos de uma descontinuidade. É evidente a diferença de comportamento, quanto à resistência ao cisalhamento e à deformabilidade, entre uma descontinuidade preenchida por material argiloso mole e por material pétreo, por vezes, mais resistente e menos deformável que o próprio material que constitui o maciço rochoso. É também evidente a diferença de comportamento, em termos hidráulicos, de uma descontinuidade preenchida por um material poroso e permeável, de outra preenchida um material impermeável (ABGE, 1998).

Parâmetros avaliados	Características predominantes das discontinuidades
Espaçamento médio	2,01 metros
Persistência	3 a 10 metros
Terminações	1
Rugosidade	Rugosa, planar
Umidade	Seca, raramente pequeno fluxo de água
Resistência das paredes	Extrema resistência
Abertura	0,5 a 2,5 mm
Espessura do preenchimento	A maioria não apresenta preenchimento, mas quando este ocorre sua espessura atinge até 10 mm
Material do preenchimento	Carbonatos, eventualmente quartzo

Quadro 1: Parâmetros avaliados e características modais das discontinuidades que ocorrem na mina. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

6.4.2 MODELAMENTO E INDICAÇÃO VOLUMÉTRICA

A figura 59 mostra o gráfico das taxas de perfuração para cada litologia, gerado a partir do registro da taxa a cada metro perfurado, em m/min, indicado no visor da perfuratriz. Também foram anotados os valores anômalos de taxa, isto é, cada vez que o valor mostrado no visor aumentava ou baixava bruscamente.

Valores de taxa de perfuração mais elevadas indicam que a rocha possui menor resistência mecânica. Já valores de taxas mais baixos indicam maior resistência da rocha.

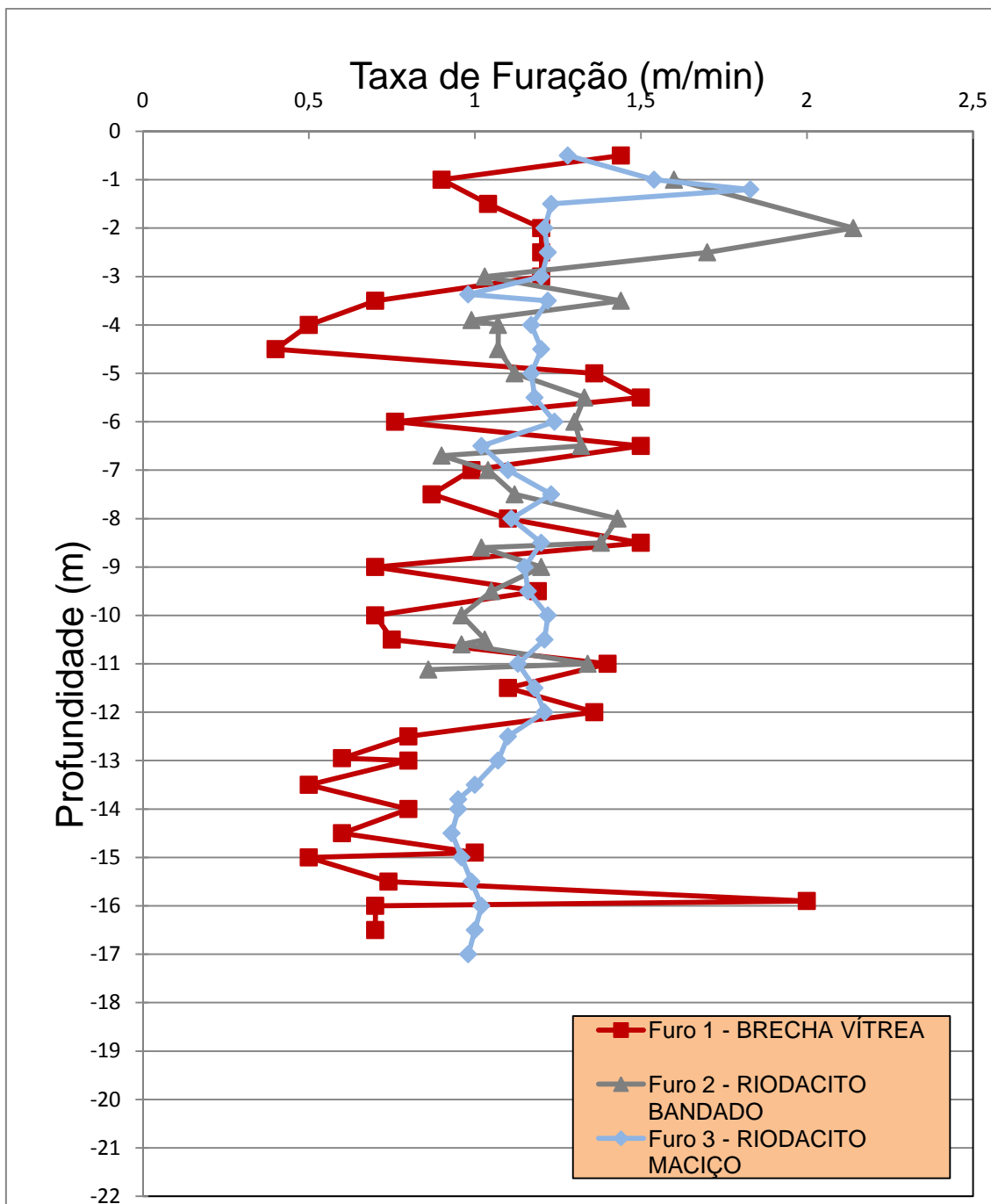


Figura 59: Gráfico das taxas de furação para as diferentes litologias ocorrentes na mina Maestra. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Neste gráfico, podemos observar que as velocidades para o Riodacito maciço e para o Riodacito com bandamento ígneo as taxas de perfuração são semelhantes e se mantêm entre 1 e 1,5 m/min ao longo de todo o furo. Já a brecha

mostrou diferença nos valores das taxas. Para o furo 1, realizado na cota 745 m, a taxa de perfuração se manteve entre 1 e 1,4 m/min até os 12 metros perfurados. A partir dessa profundidade a taxa de perfuração diminuiu, mantendo-se abaixo de 1 m/min, com exceção de algumas anomalias onde a taxa aumentou. Isso indica que abaixo dessa profundidade a rocha tem maior resistência em relação ao Riodacito. Outra característica que pôde ser observada foi a abrasividade da rocha abaixo da zona mais alterada, pois com a realização de apenas dois furos de cerca de 17 metros cada o desgaste gerado no equipamento foi maior em relação ao desgaste gerado pela perfuração no Riodacito. Essa resistência e abrasividade maiores nos dão uma ideia da composição da rocha, que deve conter um teor mais elevado de sílica cristalizada. Com isso é possível ter uma ideia da heterogeneidade dessa unidade vulcânica, que apresenta zonas de alteração que se alternam com zonas onde a rocha possui maior resistência provavelmente está menos alterada.

Da junção dos dados gerados pelas sondagens destrutivas com a compilação dos dados disponíveis do relatório dos testemunhos de sondagem foram elaboradas duas seções geológicas, uma no sentido NE-SW e outra no sentido E-W. Nessas seções foi possível inferir as zonas onde a brecha está mais alterada através do cálculo da recuperação dos testemunhos e do RQD (Rock Quality Designation).

O RQD é determinado pela medição da principal porcentagem de recuperação de pedaços do núcleo com mais de 100 mm de comprimento (Fig. 60). Um núcleo que não seja duro ou sólido não deve ser levado em conta, mesmo que ele tenha 100 mm de comprimento. O RQD é um indicador importante para as zonas de rochas de baixa qualidade.

O percentual de recuperação dos testemunhos é a relação percentual entre o comprimento dos testemunhos obtidos resultantes da manobra pelo comprimento da própria manobra e multiplicando-se o resultado por 100.

Algumas zonas da brecha, apesar de terem um RQD baixo, apresentaram boa recuperação. Isso provavelmente ocorre por causa do diâmetro do testemunho de sondagem, não significando que a rocha seja de qualidade ruim, pois o RQD foi introduzido para uso com diâmetros de núcleo de 54,7 mm (NX). O diâmetro dos testemunhos das sondagens realizadas, conforme consta no relatório de sondagens, era de 30,09 mm. Logo, é de se esperar que os valores de RQD seriam mais elevados se o diâmetro dos testemunhos fosse o recomendado.

Deve-se ressaltar que o correto é realizar esses cálculos a partir dos testemunhos, e não por fotos, como foi feito neste trabalho. Porém como os

testemunhos de sondagem foram descartados pela empresa que prestou esse serviço, ficando apenas o registro fotográfico dos mesmos, esta foi a única alternativa disponível. As imagens de cada furo de sondagem contendo a compilação das informações geológicas retiradas do relatório, RQD e recuperação encontram-se no Apêndice III. As fotografias dos testemunhos de sondagem utilizadas para o cálculo do RQD, disponibilizadas pela empresa, encontram-se no Anexo I.

A tabela 14 mostra a classificação da qualidade da rocha com base no resultado do RQD.

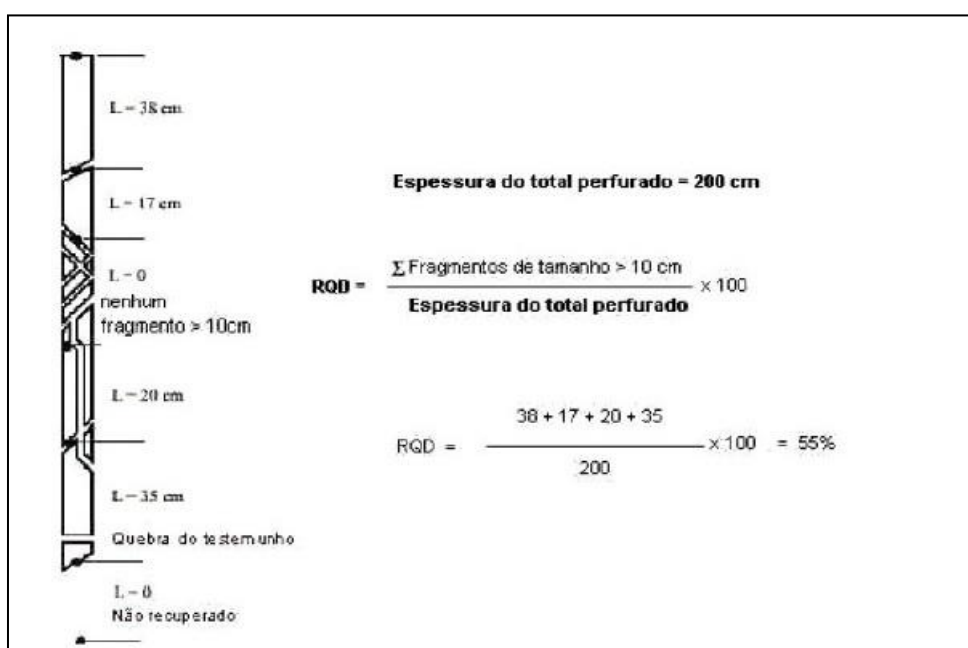


Figura 60: Exemplo de cálculo do RQD.

Tabela 14: Classificação da qualidade da rocha. Fonte: DNER – PRO 102/97.

Qualidade da rocha	RQD (%)
Muito pobre	0 a 25
Pobre	25 a 50
Regular	50 a 75
Boa	75 a 90
Excelente	90 a 100

Para o modelamento do topo da unidade vulcânica brechada foram realizados trabalhos de mapeamento dos afloramentos ocorrentes na mina e foram plotadas as localizações dos furos de sondagem rotativa (Fig. 61). A interpolação dos pontos

e furos de sondagem foi realizada no software ArcGis versão 9.3 e o modelamento do topo da unidade (Fig. 62) foi realizado com a ferramenta 3D Analyst do ArcScene.

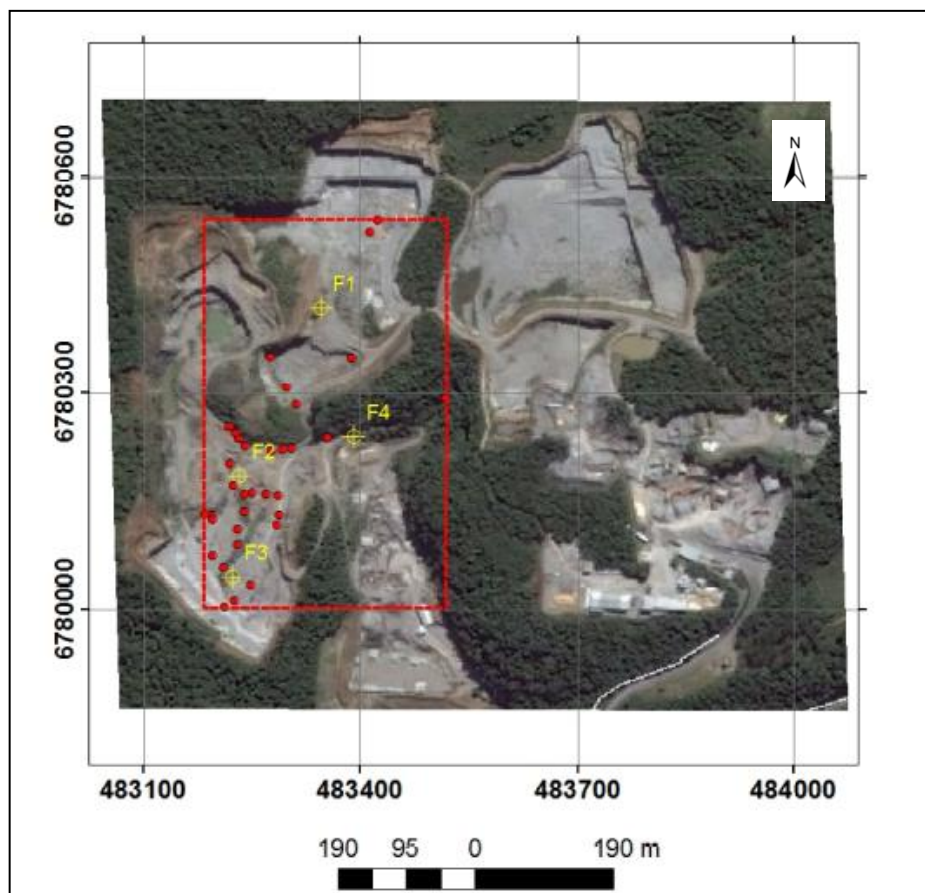


Figura 61: Mapa de pontos e furo de sondagem rotativa utilizados para o modelamento do topo da brecha vítrea. A área do retângulo corresponde à área modelada. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

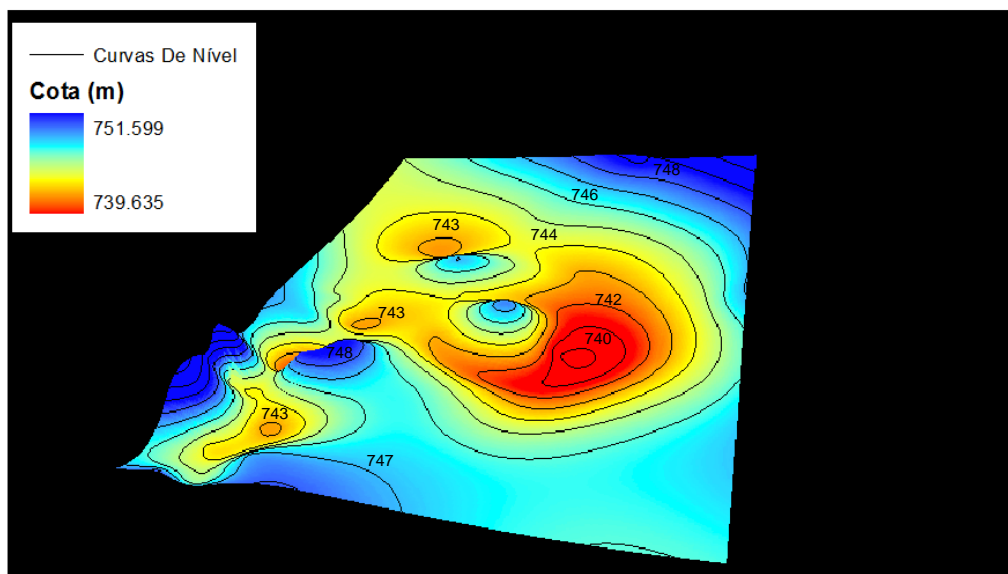


Figura 62: Modelamento do topo da brecha vítrea. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

No que diz respeito à indicação volumétrica da unidade vulcânica 1, a tabela 15 apresenta os resultados dos cálculos e a figura 63 ilustra as áreas cubadas. A área A2 foi dividida em A2A e A2B, pois a área A2B possui maior quantidade de dados de sondagem, o que permitiu fazer uma cubagem da zona onde a rocha está mais alterada e a cubagem mínima da zona onde a rocha possui melhor qualidade. A tabela 16 mostra a cubagem estimada da zona de brecha alterada correspondente à área A2B.

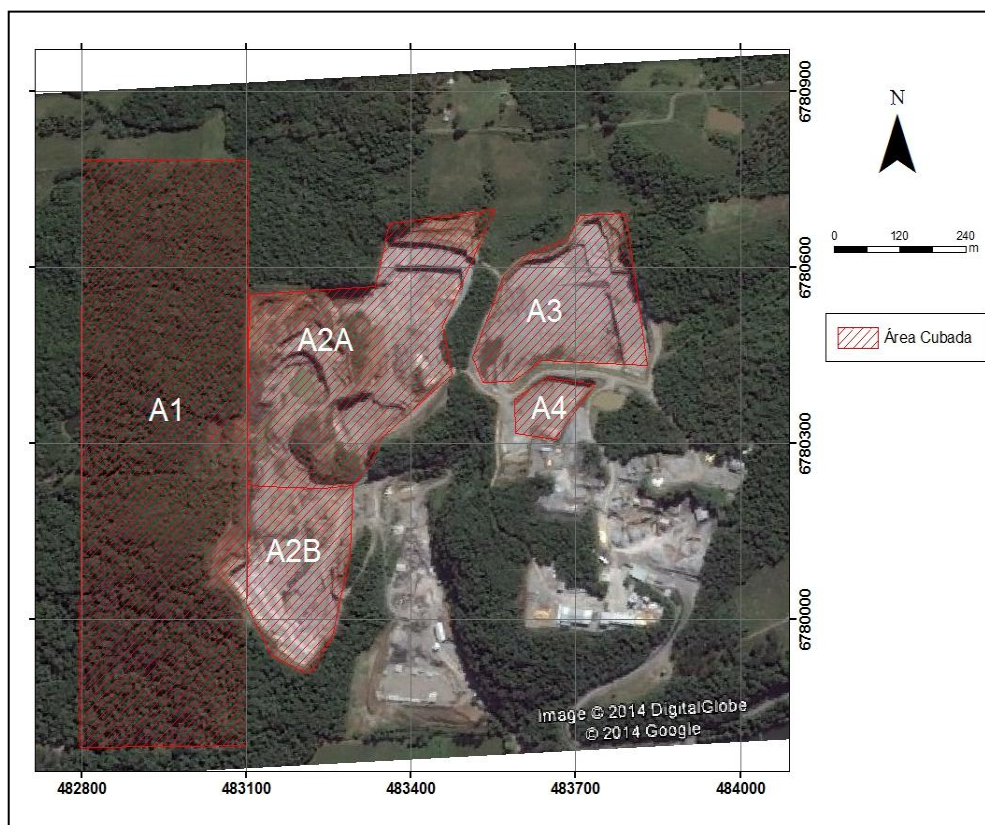


Figura 63: Localização das áreas cubadas. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Tabela 15: Dados utilizados para o cálculo da cubagem mínima da brecha vulcânica. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Área Cubada	Área do polígono (m ²)	Espessura considerada (m)	Volume (m ³)	Densidade média ponderada (g/m ³)	Massa Cubada Brecha (Mt)
A1	291.422	33,2	9.675.210	2,26	21,8
A2A	123.391	33,2	4.096.581	2,26	9,2
A2B	52.985	21,2	1.123.282	2,26	2,5
A3	60.077	33,2	1.994.556	2,26	4,5
A4	10.028	33,2	332.929	2,26	0,75
Total:	537.903		17.222.559		38,75

Tabela 16: Dados utilizados para o cálculo do volume estimado da brecha alterada a ser removido para chegar na zona de melhor qualidade. Fonte: Dados da pesquisa (2014).

Área Cubada	Área do polígono (m²)	Espessura considerada (m)	Volume (m³)	Densidade (g/m³)	Massa cubada da Brecha alterada (Mt)
A2B	52.985	12	635.820	2,17	1,4

O valor calculado para a área A2A, devido à técnica de cubagem utilizada, pode ser considerado como o resultado de uma reserva indicada, e o da área A2B, reserva medida. Os valores encontrados para as áreas A1, A3 e A4 podem ser considerados como valores de reserva inferida, visto que essas áreas ainda não possuem dados gerados por métodos diretos de investigação geológica. A densidade média ponderada utilizada para o cálculo da massa cubada foi obtida utilizando-se as densidades aparentes calculadas através do ensaio de índices físicos nas amostras da brecha alterada e nas amostras onde a brecha aparenta ter melhor qualidade. A densidade aparente utilizada nos cálculos da tabela 8 corresponde à brecha alterada e a espessura média considerada foi obtida dos dados das seções geológicas.

7 CONCLUSÕES

A tabela 17 faz uma comparação com os resultados obtidos nos ensaios de desgaste por abrasão Los Angeles e durabilidade ao sulfato de sódio com os valores exigidos por algumas especificações técnicas.

Visto que as especificações não envolvem todos os ensaios realizados, foram montadas tabelas de classificação de qualidade para cada amostra que abrangem toda a gama de ensaios tecnológicos (Tabelas 18 e 19). Salienta-se que o ensaio de sanidade considerado nessas tabelas utiliza o sulfato de magnésio, que é muito mais agressivo do que o sulfato de sódio. Logo, os valores nas colunas de classe de qualidade seriam menores, caso o sal em consideração fosse o sulfato de sódio.

Tabela 17: Comparação dos resultados dos ensaios obtidos com os valores exigidos por algumas especificações técnicas.

Ensaio	Sub-base ou base - brita graduada (ABNT NBR 12264/91)	Concreto asfáltico (DNIT - ES 031/2006)	Revestimento de macadame betuminoso (DNER - ES 311/97)	Riodacito	Brecha vítrea
Abrasão "Los Angeles"	< 50%	<50%	< 40%	13,6 %	30%
Sanidade com sulfato de sódio	< 20%	<12%	<12%	3 %	25 %

Tabela 18: Critérios para a definição das 4 classes de rocha em termos de qualidade - Riodacito. Modificado de Lienhart (2003).

Critério	Classe de Qualidade				Riodacito
	Excelente	Boa	Marginal	Pobre	
Massa específica aparente seca, ρ_a (g/cm ³)	3,3 - 2,9	2,6 - 2,9	2,5 - 2,6	<2,5	2,5
Absorção de água, α_a (%)	<0,5	0,5 - 2,0	2,0 - 6,0	>6,0	2,6
Resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$ (MPa)	>8,0	4,0 - 8,0	1,5 - 4,0	<1,5	6,7
Desgaste por abrasão Los Angeles (%)	<15	15 - 25	25 - 35	>35	13,6
Slake-durability, I_{d2} (%)	>80	65 - 80	52 - 65	<52	99,7

Sanidade com sulfato de magnésio (MgSO ₄) (%)	<2	2 - 10	10 - 30	>30	3
---	----	--------	---------	-----	---

Tabela 19: Critérios para a definição das 4 classes de rocha em termos de qualidade – Brecha vítrea. Modificado de Lienhart (2003).

Critério	Classe de Qualidade				Brecha vítrea
	Excelente	Boa	Marginal	Pobre	
Massa específica aparente seca, ρ_a (g/cm ³)	3,3 - 2,9	2,6 - 2,9	2,5 - 2,6	<2,5	2,2
Absorção de água, α_a (%)	<0,5	0,5 - 2,0	2,0 - 6,0	>6,0	8,2
Resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$ (MPa)	>8,0	4,0 - 8,0	1,5 - 4,0	<1,5	3,1
Desgaste por abrasão Los Angeles (%)	<15	15 - 25	25 - 35	>35	30
Slake-durability, I_{d2} (%)	>80	65 - 80	52 - 65	<52	98
Sanidade com sulfato de magnésio (MgSO ₄) (%)	<2	2 - 10	10 - 30	>30	25

A análise dos elementos geológicos e geotécnicos obtidos nos estudos realizados na Mina Maestra permitem as seguintes considerações e conclusões:

- 1) Caracterização do agregado produzido pela mina atualmente (riodacito):
 - a) Ao confrontar os resultados obtidos nos ensaios tecnológicos para o Riodacito com as especificações técnicas e a tabela de classificação da qualidade, podemos observar que a rocha atende a todas as exigências, apresentando qualidade de excelente a boa, sugerindo o seu uso pleno para pavimentação rodoviária, conforme especificações apresentadas na tabela 17.
 - b) Composicionalmente, o riodacito também possui boa qualidade, pois nas análises petrográficas não foi observada a ocorrência de argilominerais.

c) Os resultados do ensaio de perda ao fogo mostraram que o riódacito possui baixas perdas, indicando que há uma baixíssima quantidade de minerais secundários e que a rocha encontra-se em estado são.

2) Caracterização da brecha vítrea:

a) Em relação às especificações técnicas, o único ensaio no qual esse material não atendeu as exigências para ser usado como brita de qualidade inferior (material de base e sub-base em pavimentos flexíveis) foi o de sanidade com sulfato de sódio. Como mostram as curvas de perda na figura 45, o material é bastante sensível aos esforços cíclicos de cristalização e hidratação dos sais. Essas perdas elevadas são decorrentes da elevada porosidade da rocha e do grau de alteração.

b) De acordo com a classificação de Lienhart (2003), conforme a tabela 19, a rocha é classificada como de qualidade marginal a pobre.

c) Com relação às análises petrográficas, a composição vítrea da brecha apresenta problema para a geotecnia, já que o vidro é um material que quando exposto aos agentes intempéricos sofre alteração. Entretanto, na composição desta rocha também há bastante vidro parcialmente devitrificado e quartzo gerado pela cristalização do vidro, e este, por ser um mineral estável, não apresenta problemas para a geotecnia. Os fragmentos analisados coletados no furo de sondagem destrutiva feito com a perfuratriz mostraram a ocorrência de esmectita e celadonita como produto de alteração do vidro.

d) As análises por difratometria de raios X revelaram a ocorrência de argilominerais do grupo das esmectitas e ilitas. Argilominerais do grupo das ilitas não apresentam problemas para a geotecnia. Já argilominerais do grupo das esmectitas podem apresentar problemas de alterabilidade da rocha, principalmente se ocorrerem em grandes quantidades, pois tratam-se de argilominerais muito expansivos.

e) Os valores obtidos no ensaio de perda ao fogo revelaram altas perdas nas amostras RD-1 e RD-2, que podem ser justificadas pela presença dos

argilominerais. Entretanto, a ocorrência da calcedônia (quartzo criptocristalino de origem secundária), que é um mineral poroso e pode acumular água, contribuiu com os valores elevados de perda.

f) As baixas taxas de perfuração medidas durante os furos realizados com a perfuratriz destrutiva, em profundidade abaixo de 12 metros, podem ser justificadas pela maior ocorrência de quartzo oriundo da cristalização do vidro e presença da calcedônia, que ocorre cimentando os fragmentos da brecha vítrea. A estrutura criptocristalina desse mineral aumenta a resistência e abrasividade da rocha. Esses aspectos evidenciam a presença de uma rocha de melhor qualidade geotécnica a partir dessa profundidade.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio de durabilidade ao sulfato de sódio é um ensaio muito agressivo e as especificações técnicas brasileiras foram elaboradas com base em especificações estrangeiras, onde o clima e geologia são diferentes do clima e geologia característicos das regiões tropicais e sub-tropicais (Arnold, 1993). Com isso, o uso de muitos materiais que poderiam ter aproveitamento na construção civil torna-se muito restrito.

Nos estudos de Wayhs (2004) sobre materiais alternativos utilizados na pavimentação de baixo custo, o autor obteve resultados piores para os basaltos decompostos nos ensaios de desgaste no equipamento Los Angeles e durabilidade ao sulfato de sódio, mas teve bons resultados nos ensaios complementares de compactação e suporte e determinação do módulo de resiliência, o que classificou o material como pertinente para o uso em sub-bases. É de se esperar que o produto resultante da britagem da brecha vítrea também venha a apresentar bons resultados nesses ensaios complementares.

Tendo em vista que a brecha vítrea ficaria confinada ao ser utilizada como material de sub-base, ficando isolada dos agentes intempéricos, que a estrada não ficaria por longos períodos sem a manutenção do pavimento e que o material estudado apresenta resistência mecânica relativamente boa, seu uso deve ser discutido para aproveitamento em estradas vicinais, as quais tem como característica baixo volume de tráfego.

Há especificações técnicas para o uso como base e sub-base, aplicadas para materiais constituintes como solos, mistura de solos, materiais britados e escórias, que levam em consideração outros ensaios que não foram realizados neste projeto. São elas a DNIT 139/2010-ES (uso como sub-base estabilizada granulometricamente), DNIT 141/2010-ES (uso como base estabilizada granulometricamente) e DNER-ES 316/97 (uso como camada de base de macadame hidráulico).

Sugere-se, portanto, que para uma melhor caracterização da brecha vítrea sejam realizados os seguintes estudos complementares no produto resultante da britagem da rocha:

- Ensaio de Compactação (DNER-ME 129/94);
- Ensaio de Índice Suporte Califórnia e expansão (DNER-ME 049/94);
- Análise granulométrica (DNER-ME 080/94);

- Equivalente de areia (DNER-ME 054/94);
- Limites de Atterberg (Limite de Liquidez (DNER-ME 122/94) e Limite de Plasticidade (DNER-ME 082/94).

De acordo com as especificações mencionadas, o material estudado deve atender aos seguintes aspectos:

DNIT 139/2010-ES

- a) Fração retida na peneira nº 10 no ensaio de granulometria deve ser constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais;
- b) Índice Suporte Califórnia $\geq 20\%$ e Expansão $\leq 1\%$.

DNIT 141/2010-ES

- a) Distribuição granulométrica;
- b) A fração que passa na peneira nº 40 deve apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25%, e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%; quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deve ser maior que 30%;
- c) A porcentagem do material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40;
- d) Índice Suporte Califórnia – ISC $\geq 60\%$ para Número N $\leq 5 \times 10^6$, ISC $\geq 80\%$ para Número N $> 5 \times 10^6$, e Expansão $\leq 0,5\%$.
- e) O agregado retido na peneira nº 10 deve ser constituído de partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, e isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial. Quando submetidos ao ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), não devem apresentar desgaste superior a 55%, admitindo-se valores maiores, no caso de, em utilização anterior, terem apresentado desempenho satisfatório.

DNER-ES 316/97

Na faixa de tamanho de partícula acima de 19,5 mm, desde que atendidos os aspectos de distribuição granulométrica, índice de plasticidade da fração que passa na peneira nº 40 inferior a 6% e equivalente de areia mínimo de 55%

Como o material estudado possui grande heterogeneidade e determinado grau de alteração, o controle de qualidade da matéria prima deve ser feito com maior frequência do que a que normalmente é feita nas unidades mais homogêneas.

À medida que a unidade vulcânica brechada for sendo explotada e as cotas de fundo das cavas forem diminuindo, novas sondagens deverão ser realizadas a fim de determinar até qual profundidade a brecha vítrea ocorre e seu contato com a unidade inferior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE, (1983). Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. São Paulo, ABGE/CBMR.

ABGE, (1998). Geologia de engenharia. 8ª reimpressão, São Paulo, 587 p.

ABNT NBR NM 26/2001 – Agregados – Amostragem.

ABNT NBR NM 27/2001 – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.

ABNT NBR NM 7389/92 – Agregados - Apreciação petrográfica de materiais naturais para utilização como agregado em concreto.

ABNT NBR 12264/91 – Sub-base ou base de brita graduada.

ARNOLD, G. P. (1993). Estudo do comportamento mecânico de basaltos alterados do Rio Grande do Sul para emprego em pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado – Porto Alegre, UFRGS, 163 p.

BORSATTO, S. (2011). Contribuição ao estudo geológico-geotécnico da área urbana de Caxias do Sul. Trabalho de conclusão de curso. Porto Alegre, IGEO/UFRGS, 96 p.

BRESSANI, L. A., FLORES, J. A. A., NUNES, L. F. (2005). Desenvolvimento de estudos de engenharia geotécnica/geologia com vista à geração de relatório e mapa geotécnico dos solos e rochas superficiais da área urbana de Caxias do Sul. Relatório final, Prefeitura Municipal de Caxias do Sul.

CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., SOARES J. B. (2008). Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros. Petrobrás; Abeda, Rio de Janeiro, 479 p.

DNER – ES 311/97 – Pavimentação – Macadame betuminoso por penetração.

DNER – ES 316/97 – Pavimentação – Base de macadame hidráulico.

DNER – ME 089/94 – Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio.

DNER – ME 035/98 – Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”.

DNER - ME 195/97 – Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.

DNER – ME – 054/94 – Equivalente de areia.

DNER – ME – 080/94 – Solos – Análise granulométrica por peneiramento.

DNER – ME 129/94 – Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas.

DNER – ME 049/ - Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.

DNER – ME 122/94 – Solos – Determinação do limite de liquidez.

DNER – ME 122/94 – Solos – Determinação do limite de plasticidade.

DNER – PRO 102/97 – Sondagens de reconhecimento pelo método rotativo.

DNIT – ES 031/2006 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico.

DNIT – ES 141/2010 – Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente.

DNIT – ES 139/2010 - Pavimentos flexíveis – Sub-base estabilizada granulometricamente.

FULFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M. V.; VIANNA, R. B. (1982). Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 233-256.

FORMOSO, M. L. L.; DUTRA, C. V.; GOMES, C. B. (1984). Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia. São Paulo, 218 p.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1985). Suggested method for determining point load strength. Int. Journal of Rock Mech. and Min. Scienc. & Geomech. Abstr.. Vol. 22, Nº 2, p. 51-60.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1979). Suggested method for determination of the slake-durability index. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 16, Nº 2, p. 154-156.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978). Suggested method for quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 15, p. 319-368.

LIENHART, D. A. (2003). A systems approach to evaluation of rip-rap and armor stone sources. Envi. Engng. Geosci. Vol. IX, Nº 2, p. 131-149.

MILNER, S. C.; DUNCAN, A. R.; WHITTINGHAM, A. M.; EWAR, A. (1995). Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silic volcanic units within Paraná-Etendeka Igneous Province. Journ. Volcan. Geot. Res., 69: p. 137-157.

MILANI, E. J. (1997). Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Tese (Doutorado) – Porto Alegre, UFRGS.

MILANI, E. J. (2000). Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental e a evolução geológica da Bacia do Paraná. In: Holz M.; De Ros, L. F. Geol. Do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, UFRGS, p. 275-302.

MILANI, E. J., MELO, G. H. J., SOUZA, A. P., FERNANDES, A. L., FRANÇA, B. A., (2007). Bacia do Paraná. B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287.

NARDY, A. J., MACHADO, F. B & FARIAS M. A., (2008). As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Revista Brasileira de Geociências*, volume 38 (1): p. 178-195.

PEACOC, D. C. P., HARRIS, S. D. e MAULDON, M., (2003). Use of curved scanlines and boreholes to predict fracture frequencies, *J. Struct. Geol.*, 25, p. 109-119.

PEATE D. W., HAWKESWORTH C., MANTOVANI M. M. S. (1992). Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (S. America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volc.*, 55: p. 119-139.

ROISENBERG, A. & VIERO, A. P. (2000). O vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: Holz, M.; De Ros, L. F. *Geol. do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, UFRGS, p. 355-374.

WAYHS, C. A. S. P. (2004) – Estudo de materiais alternativos utilizados em pavimentação de baixo custo na região noroeste do Rio Grande do Sul. *Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre, UFRGS, 87 p.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; SANTOS NETO, E. V.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. (1990). The Paraná Basin, Brazil. In: Leighton, M. W.; Kolata, D. R.; Oltz, D. F.; Eidel, J. J. (Ed.). *Interior cratonic basins*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 681-708. (AAPG. Memoir, 51).

ANEXO I – IMAGENS FOTOGRÁFICAS DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

**APÊNDICE I – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM, FUROS
REALIZADOS COM PERFURATRIZ DESTRUTIVA E SEÇÕES GEOLÓGICAS**

APÊNDICE II – SEÇÕES GEOLÓGICAS

**APÊNDICE III – COMPILAÇÃO DO RELATÓRIO DE SONDAGEM E
RESULTADOS DO RQD E RECUPERAÇÃO**