

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

Avaliação da Durabilidade, Abrasividade e Dureza das Rochas Vulcânicas
da Formação Serra Geral

Geólogo João Alberto Fiorentini

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Porto Alegre
2002

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Jorge Augusto Ceratti – PPGECC/UFRGS

Prof. Dr. Telmo Fernando P. de Quadros - FEPAM

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe
Coordenador do PPGEM

Aos meus pais, esposa e irmã (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Química da CIENTEC, na pessoa do colega Rubens Thomaz, pelo auxílio na execução dos ensaios de perda ao fogo, absorção de azul de metileno e difração de raios-X.

Ao colega Clovis Gonzatti, no apoio à elaboração de programa para a execução do ensaio de dureza CERCHAR.

Ao DAER, pela cedência de espaço em seu laboratório para a execução do ensaio de degradação Washington.

Ao meu orientador, pelo apoio nos momentos em que foi solicitado.

Enfim, a todos que colaboraram direta ou indiretamente na realização desse trabalho, o meu reconhecimento e gratidão.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE SIGLAS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo.....	1
2 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS E GEOLOGIA DA ÁREA DE PESQUISA.....	3
2.1 Durabilidade.....	3
2.2 Abrasividade e Dureza.....	5
2.3 Importância da Alteração no Comportamento das Características Tecnológicas.....	9
2.3.1 A quantificação da alteração.....	11
2.4 Geologia das Rochas Vulcânicas da Área de Pesquisa.....	12
2.4.1 Aspectos da alteração.....	15
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1 Justificativa para a Escolha do Material e Métodos de Estudo.....	15
3.2 Localização e Características das Amostras Estudadas.....	17
3.3 Análises e Ensaios.....	18
3.3.1 Análise petrográfica.....	18
3.3.1.1 A Obtenção de um Parâmetro Quantitativo para as Análises Petrográficas.....	19
3.3.2 Análise por difração de raios-X.....	22
3.3.3 Absorção de água.....	24
3.3.4 Absorção de azul de metileno.....	25
3.3.5 Perda ao fogo.....	30
3.3.6 Durabilidade (sanidade).....	32
3.3.7 Durabilidade (degradação Washington).....	43
3.3.8 Teor de sílica.....	47
3.3.9 Índice de resistência à carga pontual (point load test).....	49
3.3.10 Índice de abrasividade CERCHAR.....	53
3.3.11 Índice de dureza CERCHAR.....	59
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	64
4.1 Análises Petrográficas.....	64
4.2 Análise dos Difratoogramas de Raios-X.....	69
4.3 Análise de Resultados Quantitativos.....	70
4.3.1 Durabilidade.....	70
4.3.2 Abrasividade CERCHAR.....	76
4.3.3 Dureza CERCHAR.....	80
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	85
5.1 Análise Petrográfica e Difração de Raios-X.....	85
5.2 Durabilidade.....	85
5.3 Abrasividade CERCHAR.....	88

5.4 Dureza CERCHAR.....	88
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
ANEXOS.....	98
ANEXO I – Mapa de localização das amostras estudadas	
ANEXO II – Descrições petrográficas	
ANEXO III – Difractogramas de raios-X	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Equipamentos e materiais utilizados no ensaio de azul de metileno.....	27
Figura 2- Cores assumidas pela dispersão antes (1) e após (2) o ensaio.....	29
Figura 3- Cores assumidas pelas gotas da dispersão durante o ensaio da amostra n.º009.....	30
Figura 4- Formação do halo azul celeste durante o ensaio (1) e a após o reteste (2).....	30
Figura 5- curvas granulométricas da graduação B do CBUQ (DAER-1991).....	39
Figura 6- Agitador de peneiras para simular ensaio de desgaste Washington.....	44
Figura 7- Conjunto proveta (1), suporte, funil (2) e peneiras.....	45
Figura 8- Prensa para ensaio de carga pontual.....	50
Figura 9- Pontos de tomada das medidas dos corpos-de-prova de carga pontual.....	51
Figura 10- Ponteiras cônicas de aplicação de carga.....	51
Figura 11- Equipamento para determinação da abrasividade CERCHAR.....	54
Figura 12- Ponteira do ensaio de abrasividade CERCHAR.....	55
Figura 13- Lupa binocular.....	55
Figura 14- Detalhe da morça, mandril, ponteira, braço e trava do equipamento de abrasividade.....	57
Figura 15- Detalhe da alavanca (6) do equipamento de abrasividade.....	57
Figura 16- Sulco deixado pela ponteira na execução do ensaio.....	58
Figura 17- Perfil da ponteira de ensaio e detalhe da terminação cônica antes (A) e após (B) o desgaste.....	59
Figura 18- Equipamento para ensaio de dureza CERCHAR.....	60
Figura 19- Broca para ensaio de dureza CERCHAR.....	61
Figura 20- Gráfico profundidade X tempo do ensaio de dureza CERCHAR.....	62
Figura 21- Gráfico de dispersão Absorção de água X Sanidade.....	71
Figura 22- Gráfico de dispersão Perda ao fogo X Sanidade.....	72
Figura 23- Gráfico de dispersão Fator Rsm X Sanidade.....	73
Figura 24- Gráfico de dispersão Is(50) X Sanidade.....	73
Figura 25- Gráfico de dispersão Classificação petrográfica X Sanidade.....	74
Figura 26- Gráfico de dispersão Absorção de água X Degradação Washington.....	75
Figura 27- Gráfico de dispersão Perda ao fogo X Degradação Washington.....	75
Figura 28- Distribuição dos resultados de abrasividade CERCHAR em função da classificação petrográfica.....	77
Figura 29- Gráfico de dispersão Absorção de água X Abrasividade CERCHAR.....	78

Figura 30- Gráfico de dispersão Teor de sílica X Abrasividade CERCHAR.....	79
Figura 31 – Gráfico de dispersão Perda ao fogo X Abrasividade CERCHAR.....	79
Figura 32 – Gráfico de dispersão Sanidade X Abrasividade CERCHAR	79
Figura 33- - Distribuição dos resultados de dureza CERCHAR em função da classificação petrográfica.....	81
Figura 34- Gráfico de dispersão Absorção de água X Dureza CERCHAR.....	82
Figura 35- Gráfico de dispersão Teor de sílica X Dureza CERCHAR.....	82
Figura 36- Gráfico de dispersão Is(50) X Dureza CERCHAR.....	83
Figura 37- Gráfico de dispersão Perda ao fogo X Dureza CERCHAR.....	83
Figura 38- Gráfico de dispersão Sanidade X Dureza CERCHAR.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características petrológicas que afetam os resultados dos ensaios.....	16
Tabela 2- Localização das amostras selecionadas para estudo.....	17
Tabela 3- Fórmulas para Cálculo de Índices Petrológicos.....	20
Tabela 4- Preparação de amostra e resultados do ensaio de sanidade.....	34
Tabela 5- Resultados do ensaio de sanidade da amostra n.º652.....	36
Tabela 6- Faixa granulométrica da graduação “B” do CBUQ (DAER-1991).....	39
Tabela 7- Resultado das perdas ponderadas por fração e total da amostra n.º652, segundo critério do DAER.....	40
Tabela 8- Valores da curva média da graduação “B” do CBUQ, recalculado em função da separação em agregado graúdo e miúdo.....	43
Tabela 9- Planilha para cálculo do índice de resistência à carga pontual.....	52
Tabela 10 – Resultados das análises e ensaios executados.....	66
Tabela 11- Resultados do ensaio de abrasividade CERCHAR.....	76
Tabela 12- Resultados do ensaio de dureza CERCHAR.....	80

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AASHTO – American Association of Highway and Transportation Officials

ASTM – American Standard for Testing and Materials

CERCHAR – Centre D'études et Recherches des Charbonnages de France

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

ISRM – International Society for Rock Mechanics

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NCAT – National Center for Asphalt Technology

TAS – Total Álcalis versus Sílica

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral tem importante papel como fonte fornecedora de agregados para a indústria da construção civil, em particular da pavimentação rodoviária, no Estado do Rio Grande do Sul. Considerando-se o parco conhecimento das características tecnológicas dessas rochas, esse trabalho teve por meta avaliar três dessas características (durabilidade, abrasividade e dureza), tidas como importantes na caracterização desses materiais sob o ponto de vista da industrialização dessa matéria prima. Como objetivos decorrentes, buscou-se definir os principais ensaios a serem utilizados na determinação das três características escolhidas, levando em conta aspectos de execução e aplicabilidade desses.

São apresentados e discutidos os resultados das análises e ensaios realizados, escolhidos em função dos aspectos petrológicos das rochas estudadas e da facilidade, rapidez e adequabilidade do emprego dessas análises e ensaios para a caracterização. Eles compreendem a análise petrográfica, difração de raios-X, absorção de água, absorção de azul de metileno, perda ao fogo, sanidade, degradação Washington, teor de sílica, índice de resistência à carga pontual, abrasividade CERCHAR e dureza CERCHAR.

Na avaliação da durabilidade pelo ensaio de sanidade não se verificou correlação entre esse e os de absorção de água e perda ao fogo. Já os ensaios de absorção de azul de metileno (com o correspondente cálculo do fator de minerais secundários) e resistência à carga pontual mostraram ser sensíveis às perdas do ensaio de sanidade. Ainda, da análise crítica feita sobre o ensaio de sanidade ficou perceptível que o mesmo não é o mais adequado para caracterizar a durabilidade, considerando, principalmente, as condições climáticas a que ficam expostos os materiais durante seu uso nas obras, sendo sugerido o ensaio de ciclagem artificial (água – estufa), complementado com o de degradação Washington, como os ensaios ideais para atender a esse propósito.

A abrasividade e dureza, conforme determinadas nesse trabalho, são introduzidas como novidades. Pela caracterização das amostras selecionadas buscou-se introduzir essas duas características tecnológicas, consideradas relevantes quando se estudam questões como o desmonte de rochas, desgaste e eficiência de equipamentos mecânicos utilizados na produção de agregados, por exemplo.

Os resultados mostraram que há uma variabilidade significativa tanto no ensaio de abrasividade como no de dureza entre os diferentes tipos litológicos que constituem as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.

ABSTRACT

The volcanic rocks of Serra Geral Formation have an important role as supply source of aggregates to the civil construction industry, in particular on road pavement of Rio Grande do Sul State.

Considering the little knowledge of the technological characteristics of these rocks, this work sets out to evaluate three of their characteristics (durability, abrasiveness and hardness) as they are important from the point of view of industrialization of these raw materials. With this object, to define the main tests used to determine the three chosen characteristics, and to consider the main aspects of execution and applicability of the tests.

It shows the results of the analysis and tests done, chosen in accordance with the petrological aspects of the rocks studied, beyond the ease, quickness e feasibility of the use of these analyses and tests on the characterization. They comprise petrographic analyses, X-rays diffraction, water absorption, methilene blue absorption, loss on ignition, soundness, Washington degradation test, proportion of silica, point load test and CERCHAR abrasiveness and hardness.

On evaluation of durability with the soundness test one did not verify correlation between this test and water absortion and loss on ignition. The methilene blue absorption (and the correspondent Secondary Mineral Rating) and point load test showed sensitive to the loss of soundness.

On a critical analysis of the soundness test it was perceptible that it is not the most appropriate essay to characterize the durability, chiefly because of the climate conditions which the material remained exposed during their use, it is suggested that the artificial cycling (wetting and drying) complemented with the Washington degradation test is the ideal tests to determine this purpose.

The CERCHAR abrasiveness and hardness tests, as determined in this work, are introduced as a novelty. In the selected samples one attempted to introduce two technological characteristics, considered important when one studies aspects like rock dismount, the wear and efficiency of mechanical equipments used on aggregates production, for example. The results showed that there is a definite variability both at the abrasiveness and hardness tests among the different lithological types that constitute the volcanic rocks of Serra Geral Formation.

. INTRODUÇÃO

Um estudo voltado para a avaliação de características tecnológicas de materiais já por longo tempo utilizados em obras de engenharia (em particular na construção e/ou conservação de rodovias) pode parecer, a princípio, desnecessário e redundante. Contudo, a experiência adquirida na execução de ensaios de laboratório na Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, associada à convivência com a comunidade técnica envolvida nessa área, mostrou que ainda há a necessidade de se melhorar o conhecimento sobre, entre outros aspectos, o **que** e **como** devem ser analisados os materiais, a fim de obter-se as melhores informações sobre as características tecnológicas avaliadas, bem como sua adequabilidade para uso.

A denominação ainda rotineira de **basaltos** a todos os tipos litológicos ocorrentes na Formação Serra Geral faz com que se imagine que todos esses tipos apresentem características petrográficas, físicas, químicas e tecnológicas iguais. Esse fato se mostra prejudicial ao reconhecimento de diferenças importantes que irão repercutir na seleção correta desses materiais para uso em obras de engenharia, com conseqüente melhor aproveitamento de jazidas bem como no desempenho e otimização dos custos envolvendo processos de industrialização.

1.1 Objetivos

A dissertação teve como objetivo a avaliação de três características tecnológicas dentro do rol de análises e ensaios que servem para caracterizar rochas em geral, a saber: durabilidade, abrasividade e dureza. Secundariamente, apresenta-se uma descrição detalhada dos principais ensaios e as inovações introduzidas na sua execução, e indicação dos ensaios que deveriam ser utilizados para avaliação da durabilidade, abrasividade e dureza.

Sobre a durabilidade, são apresentados resultados do ensaio de sanidade - tradicionalmente o ensaio mais utilizado para determinar essa característica -, e outros, também tidos como relevantes junto à comunidade técnica, bem como são introduzidos novos ensaios pouco ou ainda não utilizados, particularmente em trabalhos em nível nacional. Faz-se uma análise de correlação entre eles, para se concluir, qual o método que melhor se adequa para caracterizar a durabilidade. A escolha das análises e ensaios complementares foi elaborada com base na revisão da bibliografia existente e levando-se em conta: feições petrológicas das rochas em questão; facilidade em termos de disponibilidade de equipamentos e materiais para a realização das análises e ensaios; tempo (rapidez) para a sua execução; e adequação das análises e ensaios escolhidas diante das condições físicas, químicas e

mecânicas à que as rochas estão submetidas, quando da sua utilização em obras de engenharia.

Já as características de abrasividade e dureza são introduzidas como novidades, pois se desconhece, até o momento, trabalhos em nível nacional envolvendo as mesmas. Faz-se uma discussão sobre a definição e métodos de ensaios existentes para a avaliação dessas duas características, descreve-se as metodologias para a obtenção das mesmas, e apresenta-se os resultados obtidos sobre os tipos litológicos da Formação Serra Geral.

Para se atingir aos objetivos propostos foram realizados as seguintes análises e ensaios:

- **Análise petrográfica macroscópica e microscópica;**
- **Determinação de argilo-minerais por difração de Raios-X;**
- **Absorção de água;**
- **Absorção de azul de metileno;**
 - **Perda ao fogo;**
 - **Durabilidade (sanidade);**
- **Durabilidade (degradação do Estado de Washington);**
- **Teor de sílica total ;**
- **Índice de resistência à carga pontual (*Point Load Test*);**
- **Abrasividade CERCHAR;**
- **Dureza CERCHAR**

Cada uma dessas análises e ensaios foi conduzido sempre de forma independente, sem haver a preocupação se o resultado de uma tivesse alguma correlação com o resultado de outro, fato inconscientemente natural quando se faz um estudo desse tipo.

Reconhecendo a diversidade de tipos litológicos existentes na Formação Serra Geral, não se teve a pretensão de achar que todos esses estivessem sido representados no trabalho, mas considera-se que as amostras escolhidas abrangem parte significativa dos mesmos e ajudam a mostrar a variabilidade que podem apresentar diante das características tecnológicas avaliadas.

2 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS E GEOLOGIA DA ÁREA DE PESQUISA

Esse capítulo apresenta aspectos relacionados aos conceitos e métodos utilizados para a determinação das três características estudadas, além de uma síntese da geologia da área de pesquisa.

2.1 Durabilidade

Em termos abrangentes, durabilidade significa a capacidade do material (rocha) resistir às mudanças das condições físicas, químicas e mecânicas à que fica submetido desde a sua retirada do ambiente de origem (ambiente geológico), incluindo os processos de extração, estocagem e manuseio durante a construção da obra de engenharia, até o seu desempenho durante a vida útil da obra. A rocha precisa manter suas propriedades de resistência pelo menos para o tempo de serviço que foi projetada a obra, normalmente contado em anos ou dezenas de anos.

A avaliação da durabilidade que os materiais geológicos devem possuir com vistas a seu emprego em obras de engenharia está entre as principais propriedades tecnológicas a serem determinadas. Weinert (1968) em estudo sobre materiais utilizados salienta que as determinações de dureza, durabilidade e resistência à deterioração, são de importância primária na classificação de agregados naturais.

Há diversos fatores que concorrem ou afetam a durabilidade das rochas, cada um sendo mais influente do que os demais de acordo com a natureza da rocha considerada. Esses fatores podem ser divididos em fatores intrínsecos, ligados à origem (natureza) da rocha, e fatores extrínsecos (externos), ligados às condições climáticas, regime hidrológico, forma de utilização, e outros, à que uma determinada rocha foi submetida desde a sua gênese. Chevassu (1969) cita como fatores intrínsecos as características (composição) mineralógicas e estruturais, incluindo aspectos como granulometria, textura, estrutura propriamente dita e as ligações interminerais. Hartley (1974) indica como fatores intrínsecos - que ele denomina de fatores geológicos e que afetam a durabilidade de materiais rochosos empregados em rodovias - os que estão relacionados ao conteúdo mineral da rocha, a sua textura petrográfica e ao seu grau de alteração. O autor salienta que a textura petrográfica tem um importante papel e aponta como feições principais da textura, o tipo, tamanho, forma e proporção dos minerais, a relativa orientação e arranjo desses minerais, e ainda a ocorrência e distribuição de

fósseis e inclusões de minerais metálicos, se existentes. Outros fatores relacionados à natureza da rocha – durante sua formação e posterior evolução - são a porosidade e densidade.

Henningsen (1980) destaca que a resistência e a estabilidade contra a abrasão, deformação, intemperismo e ação do gelo (congelamento), dependem parcialmente do conteúdo mineral e muito frequentemente da textura das rochas. O autor reconhece, no entanto, que as relações entre composição das rochas e suas propriedades são complicadas.

Há diversos métodos de ensaio que tentam avaliar a durabilidade, podendo ser divididos em ensaios puramente físicos (ex. absorção de água, densidade, determinação de velocidade ultra-sônica), químicos (ex. análise química de elementos maiores, reatividade potencial aos álcalis), mecânicos (ex. resistência ao impacto, resistência ao esmagamento), petrológicos, ou ainda outros que resultam de uma combinação dessas propriedades. Em trabalho como o de Pichler (1942), faz-se menção ao uso da análise petrográfica como um instrumento para a seleção de rochas para fins rodoviários, associado a ensaios como a absorção de água, peso (massa) específico e porosidade.

Schneider & Pires da Rocha (1968), estudando basaltos para fins rodoviários, propõem para a avaliação da qualidade, a análise petrográfica (com a determinação dos minerais de alteração por difração de Raios-X), ensaios de absorção e sanidade.

Cole & Sandy (1980), propõem um índice para a determinação da durabilidade de basaltos utilizados em rodovias, baseado na natureza, quantidade e distribuição de minerais secundários presentes na rocha.

Goswani (1984) apresenta um estudo onde procura mostrar a influência do tamanho de grão e o volume de poros (determinado pela porcentagem de absorção) na durabilidade (desgaste e resistência ao intemperismo), de rochas ígneas ácidas, britadas e utilizadas como agregados para estradas de alto tráfego.

Smith (1984) avalia a durabilidade de rochas britadas (brechas vulcânicas e dolerito) empregadas como base em rodovias, utilizando as determinações de variação de resistência após ciclagem artificial (água-estufa – *wetting and drying*) e ao teste de avaliação chamado de dez por cento de finos (*ten percent fines test*).

Cortelezzi et al. (1986) estudaram a durabilidade de basaltos contaminados com argilas expansivas utilizando ensaios de ciclagem artificial, imersão em etilenoglicol e expansão em água, complementados com estudos petrográficos, difração de raios-X e microscopia eletrônica.

Macedo, Lucena & Ferreira (1987) utilizaram os ensaios de sanidade (empregando sulfato de sódio) e degradação de Estado de Washington, para determinar a durabilidade de

agregados empregados em concreto betuminoso usinado à quente. Além de concluir que a granulometria do agregado tem influência nos parâmetros da mistura, também verificaram a não existência de relacionamento significativo entre o ensaio de degradação Washington e a sanidade com sulfato de sódio.

Em um abrangente trabalho de revisão sobre os ensaios que investigam o efeito do intemperismo em rochas utilizadas na engenharia, Fookes, Gourley & Ohikere (1988) dividem os diversos ensaios para a determinação da durabilidade em rochas em ensaios físicos, mecânicos, de simulação, e de avaliação petrográfica. Estão incluídos na lista de ensaios, entre outros, a determinação da resistência à compressão uniaxial, da resistência ao esmagamento, resistência ao impacto, resistência à abrasão, determinação de 10% de finos, degradação Washington, congelamento e degelo, umidecimento e secagem (ciclagem artificial), e a determinação de argilo-minerais pela absorção por azul de metileno ou análise térmico diferencial (ATD).

Em sua dissertação de mestrado, Arnold (1993) utiliza o índice de resistência de carga pontual (compressão puntiforme) para avaliar a durabilidade de basaltos alterados com vistas ao estudo do comportamento mecânico dessas rochas em pavimentos rodoviários.

Jermy & Bell (1998) investigaram a durabilidade de alguns doleritos empregados como materiais de construção na África do Sul utilizando os ensaios de *Slake durability*, expansão livre e imersão em etilenoglicol.

2.2 Abrasividade e Dureza

Diferente do conceito de abrasão, onde o que se está determinando é o desgaste que uma determinada rocha sofre pelo contato entre os próprios fragmentos da mesma, ou com ferramentas metálicas, a abrasividade relaciona-se com o efeito abrasivo que materiais rochosos causam quando em contato com algum equipamento ou ferramenta (ex. lâmina de trator no desmonte em pedreiras, mandíbulas de britadores em central de britagem). O efeito abrasivo pode ser provocado por impacto, pressão, ou atrito do objeto contra a rocha, ou ainda por uma combinação desses. Conforme Aktinson (1993) observa em capítulo dedicado a ensaios empregados para a determinação da abrasividade e dureza em rochas, embora se tenha proposto um grande número de testes para a avaliação dessas características, poucos tem recebido aceitação. A abrasividade, conforme determinada nesse trabalho, está relacionada ao efeito de pressão e, mais significativamente, ao atrito entre uma peça metálica (ponteira) e a rocha.

A dureza, assim como a abrasividade, é outra característica avaliada por diversos ensaios, distintos cada um na sua metodologia. O termo dureza é bastante genérico e a sua natureza está relacionada com o tipo de ensaio empregado para a sua determinação. Assim, pode-se determinar a dureza de rochas e minerais com ensaios de indentação (onde se obtém as durezas Rockwell, Brinel, Knoop, Vickers), ensaios dinâmicos ou de rebote (dureza de impacto do martelo de Schmidt, esclerômetros), ou durezas ao risco (durezas Mohs, Rosiwal). Na abordagem feita nesse estudo, a dureza foi estabelecida por um ensaio mecânico, cujo mecanismo está relacionado ao que pode ser chamado de dureza à perfuração, já que a sua obtenção é feita através de um equipamento semelhante a uma furadeira. Executando-se um furo na rocha utilizando uma broca com forma e dimensões definidas, determina-se o tempo que se leva para executar um furo em relação a uma profundidade definida.

Embora também tidas como importantes características tecnológicas, o estudo da abrasividade e dureza de materiais rochosos tem sido mais intenso somente nos últimos anos. No Brasil, ainda praticamente inexitem referências sobre o assunto. A *International Society for Rock Mechanics* - ISRM, em 1978, por meio do Comitê de Padronização de ensaios de campo e laboratório em rochas, publicou uma revisão sobre os ensaios de dureza e abrasividade, e selecionou os métodos mais empregados como os métodos a serem utilizados na caracterização e classificação. Nesse trabalho, a abrasividade e dureza da rocha são tidas como dependentes do tipo e quantidade dos vários constituintes minerais e da resistência das ligações existentes entre os grãos minerais das rochas. Tanto a abrasividade como a dureza são vistas como características ligadas ao comportamento do material antes do que uma propriedade fundamental desse. Os ensaios para avaliar cada uma das características têm sido desenvolvidos para poder-se simular ou correlacionar com a experiência de campo. Muitos ensaios desenvolvidos são utilizados somente por uma empresa comercial ou organização governamental, e ainda limitados a um local (país) específico. É ainda apontado que, devido à ativa pesquisa em andamento principalmente nas áreas de perfuração (*drillability*) e escavação (*machine boreability*), novos métodos seriam incorporados no futuro.

Sem distinguir a abrasão da abrasividade, a ISRM agrupa os ensaios para a determinação dessas características em três categorias: desgaste por impacto; desgaste por pressão; e desgaste por atrito.

Para o caso da dureza, os ensaios para sua determinação também são divididos em três categorias: dureza por indentação; dureza dinâmica (ou de rebote); e dureza ao risco. Como métodos sugeridos a ISRM selecionou a dureza obtida pelo martelo de Schmidt (*Schmidt rebound hardness*) e o do escleroscópio Shore (*Shore scleroscope hardness*).

West (1981) faz uma revisão dos ensaios para a determinação da abrasividade das rochas na construção de túneis. Ele comenta que enquanto a resistência é normalmente determinada por ensaios de resistência à compressão ou pelo martelo de Schmidt (de maneira indireta), não há um ensaio padrão aceito para investigar quanto uma rocha é abrasiva.

Para esse autor, os ensaios para a determinação da abrasividade podem ser divididos em métodos petrológicos e métodos mecânicos. Para os métodos petrológicos, West cita as determinações de dureza dada pela escala de Mohs ou pela escala de Rosiwal, e as determinações dos conteúdos de quartzo e sílica da rocha. Embora as utilizações das escalas de Mohs e Rosiwal estejam ligadas à medida de dureza, o autor às utiliza para a avaliação da abrasividade. Em outro trabalho, West (1989) conclui que há um alto grau de correlação entre os resultados do ensaio de abrasividade e os valores dados pela escala de Mohs. Nos métodos mecânicos, West apresenta os ensaios do arco de serra, de desgaste de ferramenta, de abrasão modificada de Taber e a determinação da abrasividade CERCHAR como ensaios a serem empregados no estudo em rochas intactas. Para o estudo em agregados, são citados os ensaios de placa de aço e do cubo de aço. Para West, a desvantagem dos métodos mecânicos sobre os petrológicos é de que, sendo os primeiros empíricos, necessitam ter seus resultados correlacionados com resultados práticos de campo. O autor conclui que nenhum método pode ser considerado mais adequado do que o outro na determinação do desgaste de ferramentas.

Howarth & Rowlands (1987) elaboraram uma medida quantitativa envolvendo aspectos texturais das rochas (arenitos, mármore e granitos), obtidas na análise de lâminas delgadas, para o estabelecimento de propriedades de resistência e perfurabilidade. Os autores indicam que as feições texturais que afetam a resistência e a perfurabilidade da rocha são o tamanho de grão, forma e grau de interligação dos minerais, porosidade, orientação dos grãos e a natureza dos contornos dos grãos. Paone et al. (apud Howarth & Rowlands, 1987) citam que os parâmetros dos materiais mais significativos que afetam a taxa de perfuração de bits com diamante cravado são a resistência à compressão, a dureza Shore e o conteúdo de quartzo. Para bits com diamantes impregnados os parâmetros são, além do conteúdo de quartzo e a resistência à compressão, o módulo de Young, o módulo de cisalhamento e a abrasividade da rocha. Ainda, para bits de metal duro os autores mencionam que há uma correlação significativa entre taxa de perfuração e resistência à compressão.

Fowell, Gillani & Altinoluk (1992), estudando a caracterização do desgaste de rochas sedimentares (rocha intacta) sobre ferramentas de máquinas para abertura de túneis, indicam o conteúdo de minerais duros, o tamanho dos grãos, sua angularidade e o material cimentante, como os fatores influentes no desgaste.

Para Aktinson (1993) a quantificação tanto da abrasividade como da dureza estão ligadas ao comportamento da rocha diante de certas condições específicas dos ensaios que as estão medindo, e que, por isto, é importante sempre que se seleciona determinado ensaio para medir estas características, que o ensaio seja apropriado tanto para a natureza da rocha considerada quanto para a aplicação de engenharia pretendida. Dada a ausência de uma quantidade física fundamental para descrever a abrasividade e a dureza surgiram muitos ensaios para descrever essas características em termos do seu emprego na engenharia. Esse autor considera que a abrasividade é função da mineralogia, especialmente do conteúdo de quartzo e da microestrutura do material. A dureza também é função de várias propriedades intrínsecas, como a mineralogia, tamanho de grão, coesão e resistência, incluindo aqui o seu comportamento de plasticidade e módulo de elasticidade, entre outros.

A palavra dureza, como descrita em dicionários, é empregada com referência à facilidade ou não de um material ser penetrado. Por isto, o conceito de dureza conduz à concepção de que ela está relacionada à resistência à compressão do material. Dentre os métodos de ensaio para a determinação da abrasividade esse mesmo autor cita a determinação petrográfica da quantidade de quartzo, o ensaio de abrasão modificado de Tabor e a abrasividade CERCHAR, considerando esse último como o que têm recebido mais atenção recentemente. O autor também distingue três categorias de ensaio para medir a dureza, à semelhança da divisão utilizada pela ISRM. Dos ensaios que medem a dureza ao risco, ele destaca o que utiliza a escala de Mohs. Para a medida da dureza por rebote, Aktinson descreve o método do martelo de Schmidt, considerando ser um método popular pelo pequeno peso e tamanho do equipamento empregado, sua adaptabilidade para uso tanto em laboratório como no campo e sua simplicidade operacional. Além desse, cita o método que emprega esclerógrafos, como o esclerômetro Shore. Como método para a determinação da dureza por indentação, o autor descreve os ensaios de microdureza Vicker e Knoop, como utilizados rotineiramente.

Deketh (1995), estudando o desgaste de ferramentas de corte em máquinas de escavação, aponta a resistência à compressão e tração, o tamanho (volume) dos grãos minerais abrasivos e a taxa de corte da ferramenta, como fatores que afetam o desgaste no contato entre ferramenta e rocha.

A utilização dos ensaios de abrasividade CERCHAR e dureza CERCHAR se revestem de interesse na medida que, além de serem relativamente fáceis de serem executados, eles refletem o comportamento da rocha como um todo e não apenas de um mineral, possuindo ainda uma vinculação direta com a utilização e performance de ferramentas e equipamentos.

2.3 A Importância da Alteração no Comportamento das Características Tecnológicas

Um dos aspectos reconhecidamente mais influentes no comportamento de características tecnológicas das rochas, em especial da durabilidade, é a alteração. Em trabalho sobre o emprego de basaltos na pavimentação rodoviária, Schneider & Pires da Rocha (1968) reconhecem que a principal causa de degradação dessas rochas é a presença de minerais de alteração em teores elevados. Fookes, Dearman & Franklin (1971) citam vários casos históricos de deterioração da rocha durante a escala de tempo (vida útil) da obra de engenharia onde foram empregadas, e a presença de minerais secundários - devido à alteração hidrotermal ou ao intemperismo - aparece como fator comum a todas. Cmiljanic, Pap & Opacic (1984) descrevem a influência do tipo e grau de alteração de andesitos e dacitos da Iugoslávia na qualidade e na vida em serviço de concretos asfálticos dizendo que a qualidade desse material é função do tipo e grau de alteração presentes nas rochas. Cortelezzi et al. (1986) apontam a causa de afetamento de uma estrutura de concreto (ponte) na Argentina, como devido à presença de argilas expansivas na rocha utilizada (basalto).

Na área da geologia de engenharia o termo alteração está fundamentalmente relacionado ao efeito do intemperismo. No entanto, a alteração, de uma forma abrangente como se quer considerar aqui, engloba todas aquelas modificações físicas, químicas e biológicas sofridas pelas rochas, desde um estágio muito cedo na sua gênese, até os últimos estágios de intemperismo, antes da rocha perder suas características peculiares e transformar-se em solo. Tratando especificamente da alteração sobre rochas ígneas, verifica-se que a mesma pode processar-se já nos estágios finais da cristalização (solidificação) do material fundido (magma) que dará origem às rochas, pela presença, normalmente, de soluções residuais ou hidrotermais desses magmas. Seguindo uma evolução natural posterior, e tendo em vista que esses materiais, agora solidificados e resfriados como rochas plutônicas ou vulcânicas, podem ficar expostos na superfície a condições físicas, químicas e biológicas distintas das suas origens, eles tendem a “reagir”, no sentido de buscar um equilíbrio com as novas condições impostas. Esse mecanismo, que pode se manifestar por dezenas, milhares ou mesmo milhões de anos é conhecido como intemperismo. Como o intemperismo é o aspecto mais considerado quando se trata de alteração ele é discutido com mais detalhes.

Diversos fatores estão envolvidos na alteração (intemperismo) das rochas. Esses fatores podem estar ligados a litologia, como a granulometria, a textura e a drenagem (fissuras e

fraturas) interna da rocha, ou ainda a fatores morfológicos e físicos dos minerais que a compõe. Ainda, fatores ligados ao clima – onde a água exerce o papel de principal reagente do intemperismo -, ao relêvo e a biologia atuam em conjunto na evolução intempérica de qualquer litologia. De acordo com a combinação desses fatores os resultados ou produtos do intemperismo podem variar enormemente e, por consequência, as características tecnológicas das rochas irão refletir essas variações. Nas suas duas condições extremas de atuação, o intemperismo é classificado como intemperismo físico e intemperismo químico. No intemperismo predominantemente físico, as respostas dos materiais se dão pela desintegração, cominuição e modificação de volume, tamanho de grão e área superficial da rocha. As fissuras e fraturas influenciam na alteração na medida que, dentro de certas dimensões, facilitam o acesso da água ao interior da rocha onde, por efeito do aumento de tensões causadas pela presença de argilo-minerais expansivos ou de ciclos de congelamento-degelo, saturação-secagem ou cristalização-solubilização de sais, a rocha perderá sua resistência dentro de um tempo razoavelmente pequeno diante da vida útil esperada para a obra de engenharia. Já no intemperismo químico, observam-se efeitos de decomposição, recomposição, reações de trocas de cátions e lixiviação.

No trabalho de Weinert (1968), o autor destaca a importância das condições climáticas nas diferenças de respostas quanto à aplicação de rochas vulcânicas em rodovias na África do Sul. As diferentes condições climáticas existentes no país conduzem à ambientes onde predomina o intemperismo físico, e outros, onde se observa a decomposição das rochas pelo predomínio do intemperismo químico. Os principais controladores climáticos do intemperismo estão relacionados às variações de precipitação de chuva, evaporação e temperatura, dentro do ambiente local. O autor propõe um índice (fator climático N) para a identificação do tipo de intemperismo que atua sobre as rochas, levando em conta o comportamento dessas vinculado às condições climáticas da sua região de ocorrência.

Ollier (1975) apresenta dois gráficos onde traça limites para as intensidades de intemperismo químico e físico, em função de temperaturas e precipitações de diferentes regiões climáticas do mundo, desde as observadas em selvas, passando por regiões moderadas, periglacial, semiárida, até glaciais e áridas.

Para Fookes, Gourley & Ohikere (1988), dentro da escala de tempo de vida útil das obras de engenharia, o intemperismo físico é que exerce o papel predominante no processo de intemperismo das rochas. O intemperismo químico, atuante basicamente por reações de hidrólise, hidratação, solução, oxidação e redução, têm um efeito secundário, a menos que condições climáticas como as ocorrentes em regiões quentes e úmidas estejam presentes.

Para Vaz (1996), a presença de argilo-minerais expansivos não é condição suficiente para a desagregação da rocha, sendo decisiva a existência de microfissuras (intemperismo físico associado ao químico).

Junto com a alteração deve-se considerar ainda outra característica, que é a alterabilidade (*weatherability*), ou seja a velocidade com que a alteração se processa na rocha. Entre outros fatores a maior ou menor alterabilidade das rochas depende da estabilidade química dos seus minerais constituintes. Nesse sentido, por exemplo, as rochas basálticas são, em geral, reconhecidas como mais alteráveis do que rochas mais ácidas, como os riolitos, quando submetidas às mesmas condições de alteração.

2.3.1- A quantificação da alteração

Diversos autores tratam da quantificação do intemperismo e da alterabilidade das rochas utilizando diferentes características. Hamrol (1961) emprega a absorção de água e as dimensões (nas três direções) de diaclases encontradas na rocha.

Ruxton (1968) apresenta duas fórmulas para determinar o grau de intemperismo químico em rochas que se encontram em regiões úmidas, calculadas utilizando os resultados da análise química dos elementos maiores presentes.

Fookes, Dearman & Franklin (1971) fazem uma discussão sobre os aspectos de engenharia ligados ao intemperismo de granitos, doleritos, calcários e lamitos. Eles apresentam uma classificação (para fins de engenharia) das rochas, utilizando características de discontinuidades (fraturas), ensaio de resistência de carga pontual (*point load index*), porosidade, densidade e durabilidade *slake*.

Aires-Barros (1978) fez um estudo sobre a alterabilidade conforme obtida em laboratório e a alterabilidade produzida pelas condições ambientais naturais utilizando, entre outras características, a velocidade sônica, a permeabilidade e o inchamento da rocha.

Diversos outros pesquisadores (Mendes et al., 1966; Irfan & Dearman, 1978; Cole & Sandy, 1980), propõem a utilização de índices petrográficos, baseados na proporção de minerais são e minerais alterados (incluindo vazios e fissuras), além de aspectos texturais, para a quantificação da durabilidade de rochas.

Ladeira & Minette (1984b) estudaram a variação de características físicas de diorito com ensaio de lixiviação contínua no extrator Soxhlet.

Recentemente, Frascá (1998) propôs um índice petrográfico para a avaliação da alterabilidade de rochas basálticas da Formação Serra Geral ocorrentes no estado de São Paulo.

Entre vários outros trabalhos sobre a quantificação da alteração e alterabilidade há ainda os que trazem uma classificação baseada em termos descritivos. Esse tipo de classificação, no entanto, é sempre passível de subjetividade e diferenças conforme o critério do proponente e por isto não são consideradas relevantes para estudo.

2.4 Geologia das Rochas Vulcânicas da Área de Pesquisa

O objetivo deste item não foi o de fazer uma revisão pormenorizada de todos os aspectos envolvidos na geologia das rochas vulcânicas encontradas na Formação Serra Geral, mas sim discorrer sobre os principais elementos que se vinculam ao estudo das características tecnológicas estudadas.

Conforme apresentado por Juchem (1999), as primeiras descrições do vulcanismo da Bacia do Paraná foram feitas por Derby, em 1878, e sua definição como formação foi estabelecida por White, em 1908.

O vulcanismo da Formação Serra Geral cobre 75% da Bacia do Paraná e ocupam uma área de aproximadamente 1.200.000 km², constituindo o denominado Planalto Meridional Brasileiro. Considerado como um dos eventos vulcânicos mais importantes do planeta, as rochas da Formação Serra Geral cobrem a maior área de rochas ígneas continuamente expostas no Brasil, recobrimo partes de vários estados brasileiros (cerca de 40% do Rio Grande do Sul), conforme pode ser visto no Anexo I. O vulcanismo se manifesta ainda no sul do Paraguai, norte da Argentina e região oeste do Uruguai, acreditando-se ainda que ele possui continuidade física no continente africano com os derrames basalto-riolíticos do platô de Etendeka, na Namíbia (Roisenberg, 1989).

Numerosos diques e *sills* de diabásio aparecem em fraturas relacionadas a essa atividade – as lavas teriam ascendido através de falhas pré-existentes - nos sedimentos paleozóicos e no embasamento pré-cambriano que circundam os derrames. Os derrames inferiores estão sobrepostos e por vezes intercalados aos arenitos eólicos da Formação Botucatu, sendo seguidos por outros derrames superpostos, descontínuos, geralmente sub-horizontais (leve inclinação de menos de 5° em direção ao centro da bacia). Localmente podem apresentar inclinações maiores, devido a paleotopografia e, mais raro, relacionadas à atividade tectônica. As espessuras unitárias dos derrames são da ordem de 1 a 50 metros, e o número deles é também variável de uma região para outra, sendo citadas mais de vinte ocorrências em determinadas áreas. A espessura total varia de 350 metros, nos bordos da bacia, até valores

próximos a 2000 metros, nas porções mais centrais, como no Pontal do Paranapanema, em São Paulo (Milani,1997 apud Juchem,1999). Baseado em características físicas, texturais e estruturais, Leinz (apud Arnold, 1993) considerou que um mesmo derrame era formado por várias zonas, denominando-as de zonas vítrea, amigdalóide ou vesicular, de fraturamento horizontal, e de fraturamento vertical. Posteriormente, Sartori et al. (1976) verificaram que a zona de basalto vítreo constituía isoladamente um derrame, sendo as divisões das demais zonas válidas para efeitos de mapeamento.

Baseado em datações feitas pelo método Argônio-Argônio, obtidas por Turner et al. (1994) e Mantovani et al. (1995) é indicado que o magmatismo ocorreu no intervalo entre 137 e 127 milhões de anos (Ma).

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral foram consideradas por muito tempo como homogêneas sob o ponto de vista petrográfico e geoquímico. A partir das décadas de setenta e oitenta, com a obtenção de uma grande quantidade de dados de campo e de laboratório, chegou-se à divisão dos derrames em três grandes grupos de rochas (Piccirillo & Melfi,1988 apud Juchem,1999), denominados de **basaltos toleíticos**, representando 90% do volume total de rochas; **andesitos toleíticos** (7% do total); e **riodacitos-riolitos** (3% do total). Os dois primeiros grupos têm características bastante semelhantes entre si quando observados no campo, sendo praticamente diferenciados só no laboratório. Suas rochas apresentam cores cinza escuro, cinza médio e cinza acastanhado, estando localizadas sempre nas partes inferiores da seqüência de derrames. São rochas básicas e intermediárias, afíricas a subafíricas, por vezes porfíricas, onde os fenocristais e/ou microfenocristais são de augita e plagioclásio (An 52-78), mais raro de pigeonita e opacos (magnetita titanífera e ilmenita), e esporadicamente de olivinas (sempre muito alteradas). As texturas comuns são a intergranular, intersertal e hialofítica, com a matriz apresentando as mesmas fases cristalinas encontradas nos fenocristais.

As rochas ácidas que compõe o grupo dos riodacitos-riolitos são, em geral, facilmente distinguíveis das rochas mais básicas. Apresentam cores cinza em tons claros, estruturas de fluxo e diaclasamento horizontal a subhorizontal, quase sempre marcantes. Por serem mais resistentes ao intemperismo do que as rochas básicas elas tendem a apresentar encostas abruptas e sem cobertura vegetal. Para Bellieni et al. (1986), estas rochas podem ser divididas em dois grupos: rochas ácidas tipo **Palmas**, constituídas predominantemente por riolitos e presentes principalmente no Rio Grande do Sul, prolongando-se por Santa Catarina e Paraná; e rochas ácidas tipo **Chapecó**, constituídas predominantemente por riodacitos e ocorrendo

principalmente ao norte da Bacia do Paraná (menor proporção no Rio Grande do Sul e Santa Catarina).

As rochas do tipo Palmas são afíricas a subafíricas, com cor cinza claro, apresentando como alteração uma pigmentação típica que lhe dá uma textura do tipo “sal e pimenta”, também conhecida como “basalto carijó”. Podem ocorrer fenocristais ou microfenocristais – não possuem macrofenocristais - de plagioclásio, augita, pigeonita, opacos e apatita. A matriz é predominantemente hialina (às vezes felsítica), podendo ser hipocristalina e exibir as mesmas fases cristalinas dos fenocristais. Para Roisenberg (1989) as rochas ácidas do tipo Palmas do Rio Grande do Sul apresentam características que permitem interpretá-las como unidades de ignimbritos soldados. Já as rochas do tipo Chapecó são mais freqüentemente porfíricas, com macrofenocristais de até 20mm, de cor cinza esverdeado em amostra sã, e marrom avermelhado em rocha alterada. Os macrofenocristais e microfenocristais são de plagioclásio e subordinadamente augita, pigeonita, opacos e apatita. A matriz hialina e felsítica são comumente presentes.

Sobre o aspecto da terminologia (classificação petrográfica) dada às rochas desta formação, principalmente às do grupo das rochas ácidas, é interessante observar (embora aparentemente um pouco confuso) a variedade de denominações dadas, especialmente porque salienta a variabilidade dos tipos litológicos já descritos. Assim, Roisenberg (1989), tratando sobre a evolução do conhecimento geológico do vulcanismo da bacia cita que, em 1935, Miranda já identificava a existência de rochas ácidas, denominando-as de **shastaito** e **ungaito** para se referir a dacitos com oligoclásio dominante e dacitos com andesina dominante, que ocorrem no perfil Taquara-Gramado. Leinz et al. (1966), apresentando uma análise do comportamento espacial do vulcanismo da região meridional da Bacia, denominam os derrames ácidos de **espilitos**.

Schneider & Pires da Rocha (1968) chamam algumas rochas mais ácidas ocorrentes na região de Santa Maria-RS de **basaltos silicificados**, rochas estas, posteriormente estudadas por Sartori et al. (1975) e classificadas com termos mais adequados de **vitrófiro**, para as rochas com fácies vítrea, e **granófiro**, para aquelas que apresentam abundante intercrescimento micrográfico. Hartmann (apud Szubert et al., 1978) denomina as rochas com intercrescimento micrográfico (quartzo e feldspato alcalino) e com teores de sílica entre 52 e 66%, de **islanditos**. Já para os diferenciados ácidos, com teores acima de 66%, não há uma denominação especial, sendo mantido os nomes dacitos e riolitos. Nos grupos de basaltos toleíticos e andesitos toleíticos citados por Juchem (1999) encontram-se as classificações de **basaltos toleíticos**, **basaltos andesíticos**, **andesitos**, **latiandesitos** e **latitos**.

2.4.1 Aspectos da alteração

Conforme os dados bibliográficos existentes sobre o assunto, verifica-se que há dois tipos de alteração que se manifestam nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Um deles está ligado à história genética das rochas e é representado pela alteração hidrotermal. Segundo Oliveira (1995), em tese de doutorado sobre as rochas vulcânicas básicas da borda sudeste da Bacia do Paraná, as rochas foram afetadas por intensa alteração hidrotermal. Diferentes autores estudando diferentes locais de ocorrência da Formação Serra Geral observaram a presença de olivinas inteiramente alteradas a argilas do tipo saponita (argilas expansivas) e celadonita. Outros minerais primários estão alterados a saponita férrica, celadonita e camadas mistas saponita/clorita. Ocorre também (algumas com características expansivas) a nontronita, a clorita magnésiana, vermiculita, serpentinas (idingsita), caulinita, halloysita e de camadas mistas (ilita-montmorilonita, clorita-montmorilonita). A ocorrência mais freqüente de um tipo ou outro de argilo-mineral é função principalmente da mineralogia da rocha mãe. A porção vítrea presente nas rochas se mostra alterada a argilo-minerais do grupo das esmectitas.

Saindo do campo hidrotermal e passando para o intemperismo, observa-se a formação de uma assembléia de argilo-minerais semelhantes à do hidrotermalismo, acrescida de gibsitita. Seguindo o estágio de intemperismo essa associação se transforma em caulinita, halloysita, goethita, hematita e outros óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio amorfos, gerados tendo em vista a atuação de um clima subtropical úmido observado na região sul do país.

Outro aspecto associado e que auxilia na alteração das rochas vulcânicas é a sua permeabilidade. Conforme Roisenberg (1974) expressa: “a alterabilidade apresenta uma relação direta com a permeabilidade da rocha. Rochas muito compactas, onde a circulação de água é inexpressiva são pouco susceptíveis à alteração”. A permeabilidade pode estar relacionada, por exemplo, à presença de fissuras. Estas fissuras podem ser geradas, entre outros, pelo processo de recristalização do vidro vulcânico intersticial presente. Dependendo da permeabilidade criada pela fissuração, a água pode atingir os argilo-minerais expansivos presentes na rocha e levar à desagregação desta, devido às tensões de tração originadas pelo aumento de volume dos argilo-minerais com a absorção de água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Justificativa para a Escolha do Material e Métodos de Estudo

A Tabela 1 reproduz parcialmente o quadro publicado por Fookes, Gourley & Ohikere (1988), onde são apresentadas as principais características petrológicas que afetam os resultados de diversos ensaios em rochas.

Tabela 1- Características petrológicas que afetam os resultados dos ensaios (modificado de Fookes, Gourley & Ohikere (1988)).

Feições Petrológicas /Ensaio	Densidade <i>Specific gravity</i>	Mineralogia	Compacidade <i>Compactness</i>	Porosidade <i>Dureza</i>	<i>Hardness</i>	Textura	Forma	Umidade	Anisotropia	Minerais secundários	Microfraturas	Clivagem	Granulometria
Absorção de água			X	X						X	X		
Resistência à compressão			X		X	X		X	X	X	X	X	
<i>Resistência à tração</i>			X			X		X	X	X	X	X	
Dureza Shore			X	X	X			X			X		
Slake durability	X			X	X	X		X		X			
Degradação Washington	X	X	X	X			X		X				
<i>Ciclagem água-estufa</i>				X		X				X	X		
<i>Gelividade</i>			X	X		X		X			X		
Sanidade (com sulfato)			X	X			X		X	X	X		
<i>Los Angeles</i>	X		X		X		X				X		X
Valor de abrasão de agregado (<i>aggregate abrasion value</i>)			X		X	X	X				X		X
Valor de britagem de agregado (<i>aggregate crushing value</i>)		X		X	X	X				X	X	X	
Valor para 10% de finos (<i>ten percent fines</i>)			X		X	X	X				X	X	X
<i>Velocidade sônica</i>			X	X				X			X		

X- significante para o resultado do ensaio

Como se observa, há várias características petrológicas que concorrem na quantificação de um ensaio, da mesma forma que a mesma característica influencia diferentes ensaios em uma determinada litologia.

A escolha, nesse trabalho, de rochas com características petrológicas semelhantes entre si se justifica, além de sua grande importância no contexto geológico regional e da importância que estas assumem na execução de obras de engenharia, na medida em que o número de variáveis influentes nos resultados é pequeno.

As feições texturais e de granulometria, por exemplo, destas rochas são muito similares, bem como a condição de **umidade** de todas as amostras estudadas também pode ser considerada semelhante, pois todas elas foram ensaiadas na condição de **amostra seca ao ar**. Além disso, as características tecnológicas estudadas relacionam-se com aspectos de **rocha**

intacta e a influência de parâmetros envolvida no estudo de maciços rochosos não precisa ser considerada.

3.2 Localização e Características das Amostras Estudadas

A Tabela 2 apresenta a lista com a procedência das 28 amostras selecionadas para o estudo e o Anexo I mostra a situação dessas dentro da área de ocorrência da Formação Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 2- Localização das amostras selecionadas para estudo.

Número da amostra	Localização
001	Rodovia RS/168 – município de São Paulo das Missões
008	Rodovia RST/420 – trecho Erechim-Aratiba
009	Rodovia RST/420 – trecho Erechim-Aratiba
010	Rodovia RST/420 – trecho Erechim-Aratiba
011	Rodovia RST/420 – trecho Erechim-Aratiba
012	Rodovia RST/420 – trecho Erechim-Aratiba
020	Pedreira no município de Gravataí
051	Rodovia RS/029 – Pedreira entre a RS/332 e Relvado
104	BR/116 km 232 – município de Dois Irmãos
136	Pedreira na RS/814 km 2,2+050 – município de Botucaray
251	Localidade de Mato Perso, município de Caxias do Sul
252	Rodovia RS/467 - trecho Tapejara-Ibiaçá
266	Rodovia BR/290 km 520 entre Rosário do Sul e Alegrete
300	Rodovia RS/467 – município de Fontoura Xavier
376	Rodovia RS/475 – trecho Getúlio Vargas-Sananduva
378	Rodovia VRS/815 – município de Mormaço
390	Pedreira no município de Nova Ramada
483	Rodovia RS/130 km 23 – município de Arroio do Meio
485	Rodovia BR/386 km 3338 – município de Lajeado
504	Localidade de Morro do Britador – entre os municípios de Lajeado e Forquetinha
515	Rodovia RS/176 – município de Garruchos
545	Rodovia BR/472 - município de Itaqui
634	Localidade de Morro do Britador – entre os municípios de Lajeado e Forquetinha
651	Rodovia RS/122 km 30+600 – município de Santa Rosa
652	Rodovia RS/122 – município de Santa Rosa
653	Rodovia RS/122, pedreira Carpenedo - município de Santa Rosa
654	Rodovia RS/431 entre a RST/430 e o município de Santa Bárbara
684	Pedreira Zandoná - município de Vera Cruz

As amostras coletadas compreendiam aproximadamente 20 a 30 kg de material retirados por sondagem rotativa (testemunhos de sondagem diâmetro A, B e N), na forma de blocos, ou brita (diversos tamanhos), conforme o estágio que se encontrava à época o estudo dos materiais selecionados. O conteúdo de cada amostra foi devidamente misturado antes de executar qualquer ensaio, principalmente quanto ao material proveniente de sondagem, já que, às vezes, esse incluía materiais próximos à superfície, mais alterados. Parte das amostras que vieram de sondagens e os blocos, foram britados em britador de mandíbulas, misturadas para, posteriormente, serem separadas em frações granulométricas conforme a exigência de cada procedimento de ensaio. As amostras que vieram na forma de brita foram ensaiadas diretamente. Algumas delas exigiram apenas uma rebritagem para a produção de frações de tamanho menor após um quarteamento. Para a análise petrográfica escolheu-se um fragmento representativo da amostra como um todo.

Sempre que houve foi utilizado uma norma conhecida para a realização das análises e ensaios. Caso não existisse nenhuma dessas, seguiu-se o procedimento recomendado por instituições de pesquisa reconhecidas ou pelo fabricante do equipamento empregado na análise ou ensaio.

3.3 Análises e Ensaio

3.3.1 Análise petrográfica

A utilização da análise petrográfica, com a confecção de lâminas delgadas para a caracterização de rochas é uma técnica tradicional e das mais antigas empregadas. Porém, como se trata de uma técnica que envolve além de uma terminologia técnica muito específica (quase sempre dominada somente por geólogos) e possui uma base descritiva, ela se mostra de utilidade duvidosa ou complicada, sem uma aparente vinculação mais direta com a quantificação de certos elementos requeridos pelo corpo da engenharia, que dêem indicação da viabilidade ou não do uso de determinado material rochoso para a obra em questão. Cabe salientar, no entanto que a análise petrográfica fornece informações sobre **aspectos texturais** da rocha, informação esta reconhecidamente importante no estudo de propriedades físico-mecânicas de rochas.

A classificação petrográfica para os diferentes tipos litológicos analisados foi baseada na análise modal, combinada com as determinações do teor de sílica feitas em algumas delas e, comparativamente, com análises de amostras semelhantes encontradas na literatura. A composição modal foi feita por estimativa visual e com o auxílio de programa de tratamento de imagens (*Image Tool*).

Procurou-se fazer uma análise simplificada, buscando salientar somente elementos importantes para estudo das propriedades envolvidas. Com as análises modais e químicas (teor de sílica) classificou-se as rochas utilizando os critérios estabelecidos por Le Maitre (Le Maitre, 1989). Mesmo não se dispondo de análises dos teores de Na_2O e K_2O , necessários para a classificação química, a determinação do teor de sílica de algumas amostras serviu para a individualização dos grupos básicos (representado na sua maioria por basaltos), dos tipos mais ácidos, indicados fundamentalmente por dacitos. Evitou-se utilizar o termo riocacito, pois esse não faz parte da nomenclatura estabelecida por Le Maitre.

Uma ênfase especial na descrição dessas rochas foi dado também às características texturais e de tipo e grau de alteração encontrados, por considerar esses aspectos fundamentais no entendimento dos seus comportamentos físicos e mecânicos. As descrições petrográficas foram realizadas utilizando-se microscópio binocular da Marca Zeiss, modelo Axiolab, com três objetivas de aumento (diâmetros aproximados de campo de 0,5mm, 2mm e 4mm), existente no Departamento de Metalurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Nesse microscópio foram tiradas fotomicrografias para mostrar aspectos importantes da textura e mineralogia das rochas. Em lupa binocular do Departamento de Mineralogia da UFRGS foram obtidas fotografias a partir de câmera fotográfica da Marca Nikon, que foram digitalizadas, posteriormente, para a obtenção da análise modal dos constituintes formadores de cada amostra. As descrições com as fotomicrografias de cada amostra são apresentadas no Anexo II.

3.3.1.1 A Obtenção de um Parâmetro Quantitativo para as Análises Petrográficas

Diversos autores, como referido anteriormente, tentando associar um elemento quantitativo por meio do exame petrográfico criaram índices ou fatores. Assim, por exemplo, nos estudos petrográficos de Schneider & Pires da Rocha (1968) sobre rochas basálticas, os autores mostraram que a quantificação de minerais secundários auxilia na qualificação das

rochas para uso em pavimentação rodoviária. Os autores propõem que a presença de até 20% de minerais secundários teria um pequeno efeito na degradação destas rochas; de 20 a 25%, produziriam algumas falhas; e com mais de 35%, haveria problemas no pavimento asfáltico. Esses mesmos autores já concluíam, também, que: “o comportamento dos agregados basálticos não depende somente do teor de minerais de alteração (secundários) presentes, mas também, e principalmente, de sua natureza”.

Ao longo do tempo surgiram outros índices, calculados por fórmulas (equações). A Tabela 3 apresenta os índices petrográficos existentes e relacionados no trabalho de Fookes, Gourley & Ohikere (1988).

Tabela 3- Fórmulas para Cálculo de Índices Petroológicos.

Índices Petroológicos	Variáveis	Referência
$Xd = \frac{Nq - Nqo}{1 - Nqo}$	Xd= índice petrológico Nq - razão em massa entre quartzo e feldspato no solo Nqo - razão em massa entre quartzo e feldspato na rocha	Lumb (1963)
$K = \frac{\sum_{i=1}^n Pi * Xi}{\sum_{j=1}^m Pj * Yj}$	K= índice petrológico n valores de Xi – 96 de minerais são n valores de Yj – 96 de minerais não são Pi e Pj – coeficiente ponderado medindo o efeito do mineral ou fratura na rocha	Mendes; Aires-Barros; Rodrigues (1966)
$IP = \frac{\%const.sãos}{\%const.nãosãos}$	IP=Índice micropetrográfico Constituintes Sãos – minerais primários Constituintes não sãos – minerais secundários + vazios + fissuras	Irfan & Dearman (1978)
$R_{sm} = \sum [(P * M)] * TR$	Rsm – Fator de minerais secundários P – Porcentagem de minerais secundários M – Fator de estabilidade para o mineral TR – Fator Textural	Cole & Sandy (1980)
$SMC = \frac{S}{M} * 100$	S – Conteúdo de minerais secundários, vazios e microfraturas M – Conteúdo de mineral total (primário e secundário) SMC – Conteúdo de Mineral Secundário	County Roads Board (test method 3730) (1982)

Trabalhando com basaltos da Formação Serra Geral de São Paulo, Frascá (1998) sugere o índice petrográfico **K2**, obtido pela seguinte relação:

$$K2 = \frac{S1}{S2 + S3 + (S4 * 2) + (S5 * 2) + S6}$$

onde: S1= porcentagem de augita, labradorita e minerais opacos são;
S2= porcentagem de augita, labradorita e minerais opacos alterados;
S3= porcentagem de amígdalas com esmectita;

S4= porcentagem de esmectita interconectada;
 S5= porcentagem de microfissuras preenchidas com esmectita;
 S6= porcentagem de outras fissuras.

Um elemento comum a todos os índices é que eles estão baseados nas proporções entre minerais são e minerais alterados, além da quantificação de vazios e fissuras existentes.

O índice proposto por Cole & Sandy (1980), traduzido como **Fator de Minerais Secundários** (*secondary mineral rating* – R_{sm}) foi o primeiro a chamar a atenção para o efeito da textura (*textural rating*) sobre a durabilidade da rocha. Esse fator foi criado por aqueles pesquisadores para quantificar a durabilidade de agregados de basaltos, utilizados na construção de rodovias na Austrália. Com preocupação semelhante, o índice K2 dá um peso maior a aspectos da fábrica (textura e estrutura) da rocha.

A obtenção de ambos os índices depende do reconhecimento da **espécie** de mineral secundário existente na rocha, reconhecimento esse que exige técnicas adequadas e confiáveis para a sua determinação. Além disso, como é o caso do índice R_{sm} , há a necessidade de se isolar e quantificar cada mineral secundário presente na lâmina delgada. Assim, embora merecedores de atenção, a obtenção desses índices necessita não só de suporte de outras técnicas mas, também, de pessoal com bom conhecimento petrográfico para a identificação da quantidade e forma de ocorrência dos minerais secundários em lâmina, o que torna o procedimento demorado e difícil.

Apesar das dificuldades apontadas resolveu-se tentativamente obter os elementos necessários para o cálculo do Fator de Minerais Secundários durante o trabalho de análise petrográfica feitos sobre as amostras em estudo. Os dados obtidos, no entanto, se mostraram logo incompatíveis, devido, basicamente, à dificuldade de determinar a proporção de minerais secundários presentes nas amostras. Desta forma, abandonou-se a idéia de determinar de modo direto o Fator R_{sm} . Para se contornar a questão de se ter um dado quantitativo associado ao elemento descritivo da análise petrográfica, utilizou-se de uma relação apresentada por Cole & Sandy (1980) que correlaciona o Fator de Minerais Secundários com a absorção de azul de metileno. Os referidos autores obtiveram um coeficiente de correlação de 94% para essa relação, que é dada pela equação:

$$R_{sm} = 8,54 + 37,94MBA$$

onde **MBA** é o valor de absorção de azul de metileno de cada amostra (dado em ml/g)

3.3.2 Análise por difração de raios-X

A técnica de análise por difração de raios-X foi utilizada como complemento a análise petrográfica, e serviu para a identificação dos argilo-minerais presentes nas amostras estudadas, tendo em vista o diminuto tamanho dos grãos que aparecem nas rochas. Essa técnica, associada ou não a outras, como análise térmico-diferencial (ATD), microscopia eletrônica e análise química é a técnica mais freqüentemente empregada para a determinação qualitativa (e eventualmente semiquantitativa) dos argilo-minerais.

Como não há uma norma técnica para a execução dessa análise, foram empregados os procedimentos tradicionalmente utilizados nos laboratórios de difração e constante em bibliografia especializada, tanto para a preparação das amostras, como para a obtenção dos difratogramas.

Na preparação, adotou-se a técnica da separação da fração argila (menor do que 2 micras), a partir de material resultante da moagem da amostra total. Foram preparadas 14 amostras e o critério de escolha das amostras para análise levou em consideração os valores encontrados nos resultados dos ensaios de sanidade e perda ao fogo, de modo que fossem escolhidas amostras que apresentassem perdas variáveis (desde o mais baixo até o mais alto valor) tanto no ensaio de sanidade como no de perda ao fogo, e assim ter uma representatividade de todos os resultados encontrados nesses ensaios.

A preparação das amostras envolveu os seguintes passos:

- i) Escolha de fragmentos representativos da amostra como um todo;
- ii) Moagem manual, utilizando-se uma marreta de 2kg sobre uma base de aço. A moagem seguiu até a obtenção de cerca de 20g de material, todo ele passante na peneira de 0,075mm (n.º200) Apesar da simplicidade da técnica de obtenção do material foram tomados todos os cuidados para que não houvesse a contaminação de uma amostra com a outra, lavando-se a cada vez os materiais utilizados na preparação. Todo o material foi seco à temperatura ambiente;

- iii) O material moído foi colocado em um Becker contendo água destilada (aproximadamente 150ml), adicionando-se cerca de 1ml de solução de hexametáfosfato de sódio com carbonato de sódio (para agir como defloculante) e agitando-se com um bastão de vidro até que o material formasse uma dispersão homogênea;
- iv) Em seguida foi colocado em uma cuba de ultrassom e deixado sob agitação por cinco minutos;
- v) Retirado da cuba, o Becker foi colocado sobre o balcão do laboratório, permanecendo sem qualquer agitação por duas horas e meia;
- vi) Após esse tempo, foi separado, com o auxílio de pipeta, a parte da dispersão correspondente aos 3cm mais superiores e colocado em tubo plástico, tampado, adaptado para uso em centrífuga;
- vii) O tubo foi levado para uma ultracentrífuga e submetido por 20 minutos a uma velocidade de 14000 rpm, em temperatura controlada (25°C);
- viii) No final obteve-se um precipitado de material sólido (argila) no fundo do tubo de plástico que ficava separado da água de mistura (límpida);
- ix) Adicionava-se novamente alguns mililitros (cerca de 3 a 4ml) para se ter uma pequena dispersão (agora formada somente por material de tamanho menor que 2 μ m);
- x) Pipetava-se, por fim, uma porção dessa dispersão e deixava-se escorrer sobre uma lâmina de vidro (de aproximadamente 2cm X 3cm), de modo a recobri-la toda.

A dispersão era deixada secar a temperatura ambiente, sem que a mesma sofresse qualquer tipo de vibração mecânica. Nessa etapa, as partículas de argila se depositavam sobre a lâmina, de forma orientada, ou seja, com a face maior das lamelas dos argilo-minerais todas dispostas segundo uma mesma orientação (face 001 dos cristais), condição importante no reconhecimento posterior dos picos obtidos nos difratogramas. Foram preparadas duas lâminas de cada amostra. Uma delas serviu para a obtenção de difratogramas denominados de amostra ao natural e glicolada, e a outra, para obter o difratograma de amostra calcinada. Essas três formas de obtenção de difratogramas são clássicas no estudo de argilo-minerais e auxiliam na identificação principalmente dos grupos de argilo-minerais presentes.

A obtenção do difratograma da amostra natural foi feita simplesmente colocando-se a lâmina com o material, diretamente no equipamento de difração de raios-X. Após a obtenção

do difratograma nessas condições, a lâmina foi colocada em dessecador que continha etilenoglicol e levado à estufa por um período de 8h a uma temperatura de 60°C, de modo que se criasse um ambiente (dentro do dessecador), saturado em etilenoglicol. Essa etapa serviu para que se houvessem argilo-minerais do tipo expansivo, estes absorvessem o etilenoglicol (amostra glicolada) e conseqüentemente mostrassem uma mudança na posição do seu pico no difratograma. Com a mesma intenção (verificar deslocamentos de picos no difratograma), a segunda lâmina preparada com o material depositado sobre ela foi submetida a uma temperatura de 500°C, por 2 horas, em um forno (obtenção do difratograma de amostra calcinada).

Os difratogramas foram obtidos no difratômetro do Instituto de Geociências da UFRGS, onde foram analisadas duas amostras e no difratômetro da CIENTEC, onde se analisou as outras onze amostras. As condições de obtenção dos difratogramas foram as seguintes:

 Tubo de raios-X: ânodo de cobre (40kV e 26mA)
 Comprimento da radiação para cálculo do espaçamento “d”: 1,54056Å (Cu K-alpha1)
 Faixa de varredura: 2θ de 3,000 a 35,006°
 Velocidade de varredura: 1°/min
 Espaçamento entre leituras: 0,026°
 Tempo de leitura: 1,56s

A faixa de varredura dos difratogramas se restringiu a valores de 2θ entre 3 e 35°, pois para questões de geotecnia a definição apenas dos grupos de argilo-minerais é suficiente para as investigações de interesse, além de se ganhar tempo e economizar custos de análises. Para cada amostra foram obtidos três difratogramas, nas condições de amostra natural, glicolada e calcinada, identificados por cores diferentes (verde, para amostra natural; preto para glicolada; e vermelho, para calcinada) e apresentados no Anexo III.

3.3.3 Absorção de água

A determinação da absorção de água seguiu a metodologia apresentada pela norma da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) **NBR 9937** de 1987, designada “Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo”, e foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Rochas da CIENTEC. O material para a execução do ensaio constitui-se de agregado formado por fragmentos acima de 4,75mm (peneira n.º4),

representando um agregado graúdo. A granulometria que compunha cada amostra era variável em função da origem e da forma de obtenção de cada uma delas, mas em geral se distribuiu de forma mais ou menos homogênea entre as diferentes frações (tamanhos entre 4,75mm a 25,4mm).

Para a execução do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais.

- Estufa que opera na faixa de 105 a 110°C;
- Balança com capacidade de 10kg e sensibilidade de 0,1g;
- Bandejas de chapa metálicas;
- Panos de algodão absorventes.

Toda a amostra foi lavada previamente na peneira de 4,75mm, colocada em uma bandeja e deixada secar em estufa (105-110°C) por cerca de 8 horas. Após, cada amostra foi dividida em dois “corpos-de-prova” de massa aproximadamente igual. Cada amostra foi colocada em bandeja separada e imersa em água por um período de 24 horas. Terminado esse período, o material foi retirado da água, espalhado sobre uma mesa e seco com o auxílio de um pano absorvente para retirar todo o excesso de água sobre as superfícies dos fragmentos. Em seguida foi reunido e medido a massa em balança com sensibilidade de 0,1g, obtendo-se a massa saturada com superfície seca (B). Posteriormente o mesmo foi colocado novamente em bandeja e seco em estufa (105-110°C), até constância de massa, resfriada ao ar e pesado para obter a massa seca (A). A absorção (a) foi, então, obtida pela fórmula:

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

O resultado de cada amostra é representado pela média de duas determinações e dado em porcentagem com aproximação de 0,1%.

3.3.4 Absorção de azul de metileno

A determinação da absorção de azul de metileno foi um dos ensaios novos introduzidos na relação de ensaios desse estudo, tendo em vista a sua facilidade de execução e objetivo. Esse ensaio é recomendado pela *International Slurry Seal Association*, da França, para a quantificação do que é qualificado como argilas nocivas (do grupo das esmectitas), da matéria orgânica e de hidróxidos de ferro presentes em agregados finos, com um mecanismo denominado de titração, utilizando uma solução de azul de metileno.

A idéia de se utilizar esse ensaio surgiu da relativa facilidade de execução do mesmo e principalmente pela possibilidade de se quantificar, mesmo que de uma maneira indireta, os argilo-minerais do grupo das esmectitas presentes nos tipos litológicos estudados – já que não há matéria orgânica e a presença de hidróxidos de ferro é diminuta-, fato esse de fundamental interesse e de difícil obtenção por outros meios. Mesmo um acurado exame ao microscópio pode não ser diagnóstico suficiente para individualizar e quantificar somente argilo-minerais do grupo das esmectitas.

A metodologia empregada para a sua execução seguiu a descrita no trabalho recentemente publicado pelo *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) dos Estados Unidos e elaborado pelo Departamento de Transportes do Estado de Ohio. Esse órgão descreve o método baseado no que é apresentado pela associação francesa, referenciada anteriormente.

Foram empregados os seguintes equipamentos e materiais:

- Bureta de âmbar com capacidade de 50ml e divisões de 0,5ml (n.º1 da Figura 1);
- Balança com capacidade de 20,0g e sensibilidade de 0,1g;
- Agitador magnético (n.º2 da Figura 1) e corpo de agitação;
- Marreta de 2kg e bloco de aço para britagem e moagem grosseira da amostra;
- Gral e pistilo de ágata para moagem fina;
- Peneira com abertura de 0,075mm (n.º200) e fundo;
- Balão volumétrico de 1000ml;
- Becker de vidro com capacidade de 80ml;
- Cronômetro (digital);
- Bastões de vidro com aproximadamente 20cm de comprimento e 8mm de diâmetro;
- Filtro de papel Whatman n.º2 (para filtragem lenta);
- Vidro de cor escura (marrom), com tampa, para armazenar a solução de azul de metileno;
- Reagente (azul de metileno);
- Água destilada.



A Figura 1 mostra parte dos equipamentos e materiais descritos acima.

Figura 1- Equipamentos e materiais utilizados no ensaio de azul de metileno:

1- Bureta de âmbar; 2- Agitador magnético

A amostra para a realização do ensaio deve ser 100% passante na peneira de 0,075mm, com peneiramento a seco. Na sua obtenção foram aproveitados os resíduos provenientes da perfuração que se executou em alguns fragmentos durante a realização do ensaio de dureza CERCHAR. Como esse material já possuía uma granulometria fina (quase todo 100% passante na peneira 0,15mm - n.º100) e provinha dos pontos de execução do ensaio de dureza, ele se adequou perfeitamente à realização do ensaio de absorção de azul de metileno. Para completar as cerca de 20g de material necessários para o ensaio selecionou-se mais alguns fragmentos que compunham a amostra de agregado e, com o auxílio de marreta, bloco de aço, gral e pistilo e ágata, obteve-se o material necessário para o ensaio.

Outra etapa realizada antes da execução do ensaio propriamente dito foi a preparação de uma solução de azul de metileno, adicionando-se 1g do produto para cada 200ml de água destilada, de forma que cada mililitro de solução continha **5mg** de azul de metileno. A solução preparada precisou ser guardada em vidro de cor escura (marrom) até o momento da execução do ensaio.

A execução do ensaio seguiu os seguintes passos:

- i) Inicialmente pesava-se 10g do material passante na peneira 0,075mm e colocava-se em um Becker de aproximadamente 80ml;
- ii) Adicionava-se 30ml de água destilada e a mistura era agitada com um bastão de vidro até que se obtivesse uma dispersão uniforme, ou seja, todo o material (pó) estivesse uniformemente disperso na água;
- iii) Colocava-se o Becker com a dispersão e o corpo agitador sobre o agitador magnético e iniciava-se a agitação da mesma com uma força o suficiente para que durante todo o ensaio o material sólido ficasse sempre uniformemente disperso;
- iv) A bureta de âmbar foi, então, carregada com a solução de azul de metileno;
- v) Com a dispersão sendo agitada, abria-se a torneira da bureta deixando escorrer 0,5ml da solução de azul de metileno sobre a dispersão e aguardando que a mesma se misturasse a essa por 1 minuto;
- vi) Decorrido esse tempo, inseria-se o bastão de vidro na mistura e retirava-se uma gota, deixando que essa pingasse sobre o papel filtro de filtragem lenta;
- vii) Aguardava-se cerca de 10 a 30 segundos (dependendo das condições de umidade do ambiente do laboratório) até que a gota secasse superficialmente. Fazia-se, então, uma verificação visual da borda da gota impregnada no papel filtro para verificar se a mesma apresentava um halo azul celeste ou não. A formação desse halo indicava que o material (argilo-minerais do grupo das esmectitas) havia atingido seu ponto máximo (e ponto final do ensaio) de absorção de azul de metileno e, portanto, toda a solução que fosse adicionada desse ponto em diante ficaria disponível na água da dispersão;
- viii) Caso não houvesse a formação do halo azul celeste, o ensaio deveria prosseguir, adicionando-se mais 0,5ml de solução de azul de metileno, até a formação do halo;
- ix) Atingindo-se o ponto final, com a formação de um halo bem nítido e que circundasse toda a gota espalhada sobre o papel filtro, continuava-se a agitar a dispersão (agora acrescida com alguns mililitros de solução de azul de metileno) por 5 minutos e retirava-se nova gota (reteste) para verificar se o halo azul celeste se mantinha. Em caso positivo anotava-se o volume de solução de azul de metileno gasto para atingir esse ponto. Caso contrário, se deveria retomar o ensaio a partir da etapa 5.

Durante a execução do ensaio observou-se que a dispersão, inicialmente apresentava uma cor marrom (devido à presença do material sólido de rocha pulverizada). À medida que se adicionava mais solução de azul de metileno na mesma, tanto a cor das gotas deixadas “impressas” no papel filtro, como a cor da dispersão se tornava azulada (azul escuro), chegando a quase preta, quando se aproxima do final do ensaio.

Para o cálculo do valor da absorção de azul de metileno (*methilene blue value*) utilizou-se da fórmula:

$$A_{am} = \frac{C * V}{m}$$

onde:

A_{am} = absorção de azul de metileno, dada em miligramas de solução por grama de material ensaiado;

C = concentração da solução de azul de metileno, dada em miligramas de azul de metileno por mililitro de água destilada;

V = volume de solução gasta na titração (atingir o ponto final), em mililitros;

m = massa seca de material presente na dispersão, em gramas.

Como a concentração da solução de azul de metileno já era conhecida pelo modo de preparo (5mg/ml) e a massa de material também foi cuidadosamente medida (10g), a fórmula foi simplificada para: $A_{am} = 0,5 * V$

A Figura 2 mostra as cores assumidas pela lama aquosa durante a execução do ensaio e a Figura 3 mostra a forma e coloração das gotas deixadas no papel filtro, bem como do halo azul celeste obtido durante o ensaio (n.º1 da Figura 4) e após o reteste de cinco minutos (n.º2 da Figura 4).

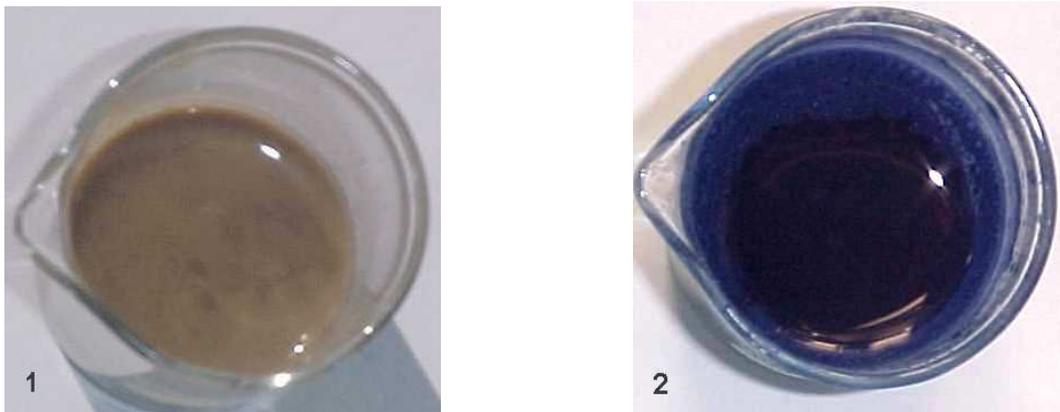


Figura 2– Cores assumidas pela dispersão antes (1) e após (2) o ensaio.

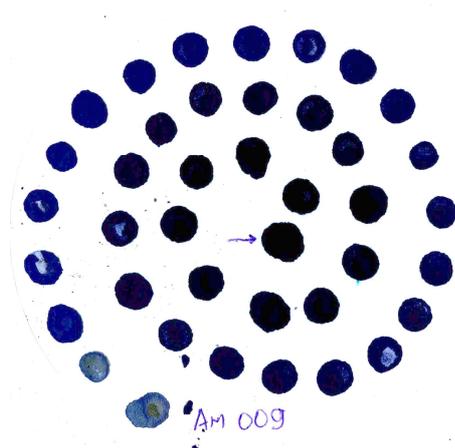


Figura 3– Cores assumidas pelas gotas da dispersão durante o ensaio da amostra n.º009.

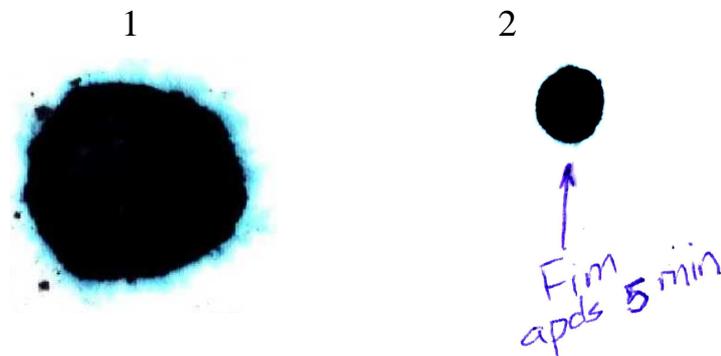


Figura 4– Formação do halo azul celeste durante o ensaio (1) e após o reteste (2).

3.3.5 Perda ao fogo

A determinação da perda ao fogo é necessária quando é feita a análise quantitativa de elementos químicos maiores, por exemplo. É um ensaio simples, rápido, e pode ser executado em uma grande quantidade de amostras simultaneamente. No trabalho, entretanto, essa determinação teve a intenção, também, de auxiliar na quantificação dos argilo-minerais presentes nas amostras estudadas. Na determinação da perda ao fogo, as amostras ficam submetidas a temperaturas de 1000°C, dando-se a perda de compostos como o CO₂ (qualquer produto pirolítico volátil junto com matéria orgânica), SO₂, umidade, água adsorvidas pelos argilo-minerais e hidroxilas (OH). Assim, como nas rochas estudadas não há presença de CO₂ (com exceção de raros carbonatos em algumas delas), nem de SO₂, e estando as mesmas secas (sem umidade), restaria que a diferença de massa antes da perda ao fogo e após esta estaria relacionada basicamente à perda de “água da estrutura” e hidroxilas. Ou seja, pode-se ter uma estimativa da presença de argilo-minerais dos materiais estudados, já que a água adsorvida e a

hidroxila estão fundamentalmente presentes nesses. No entanto, tanto a água adsorvida como a hidroxila não está presente somente em argilo-minerais expansivos e, portanto, não se pode individualizar a presença somente deste tipo de argilo-mineral em relação aos demais. Para a realização do ensaio adotou-se a norma **NBR 5743** da ABNT de 1989, denominada “Cimento Portland – Determinação da Perda ao Fogo”, que apresenta o procedimento para cimentos Portland. A norma apresenta dois métodos para a determinação, sendo adotado, nesse estudo, o método “A – determinação direta”, descrito a seguir. As determinações de perda ao fogo foram feitas no Laboratório de Análise Inorgânica da CIENTEC.

Para a execução desse ensaio foram empregados os equipamentos e materiais listados abaixo:

- marreta e base de aço para moagem grosseira;
- peneira com abertura de 0,15mm (n.º100) e fundo;
- forno tipo mufla capaz de atingir temperaturas até 1200°C;
- balança analítica com capacidade para 20g e sensibilidade de 0,0001g;
- cadinhos de porcelana;
- dessecador com válvula de escape e carregado com sílica gel;
- alicate para manuseio dos cadinhos;
- luva de amianto e máscara de proteção de calor e radiação do forno.

Para esse ensaio a norma prescreve que a amostra seja pulverizada e passante 100% em peneira de malha de 0,15mm. Para isso, adotou-se sistemática semelhante à apresentada na preparação das amostras para a determinação da absorção de azul de metileno. Foram selecionados alguns fragmentos representativos de cada amostra e, com o auxílio de marreta e base de aço, foi feito a britagem e moagem desses, obtendo-se cerca de 20g de material passante na peneira de 0,15mm.

Na execução do ensaio foram realizadas as seguintes etapas:

- 1) Medida da massa do cadinho para colocação do material moído;
- 2) Pesagem de $1,0000 \pm 0,0010$ g (m) do material passante na peneira de 0,15mm, colocação no cadinho de porcelana e medida da massa do cadinho mais material (m_1);

- 3) Colocação do cadinho na mufla para calcinação à temperatura de $950\pm 50^{\circ}\text{C}$ (adotou-se 1000°C) por vinte minutos;
- 4) Retirada do cadinho da mufla, deixando esfriar ao ar livre por cerca de 1 minuto e colocação no dessecador (com válvula fechada), para resfriamento até temperatura ambiente (cerca de 30 minutos);
- 5) Retirada do cadinho do dessecador e medida novamente da massa do cadinho mais material (m_2);
- 6) Retorno do cadinho ao forno tipo mufla por mais 5 minutos à temperatura de 1000°C e repetindo as etapas 3 a 5 até obter constância da massa (m_2);
- 7) No final a perda ao fogo foi calculada utilizando a expressão:

$$\text{PF}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m} * 100$$

onde:

PF = perda ao fogo (%)

m_1 = massa do cadinho+material ensaiado, em gramas, antes da calcinação;

m_2 = massa do cadinho+material ensaiado, em gramas, após a calcinação;

m = massa de material ensaiado;

Embora a norma não especifique o número de determinações (vias) a serem feitas para cada amostra, foram realizadas sempre três vias, e o resultado da perda ao fogo de cada amostra foi obtido da média dessas três. Como dito anteriormente, por se tratar de um ensaio simples e rápido de ser executado, pôde-se fazer lotes de seis amostras por vez, empregando-se cerca de 2 horas e meia para sua execução, após a preparação.

3.3.6 Durabilidade (sanidade)

O ensaio de sanidade (*soundness test*) é o ensaio mais empregado na caracterização de materiais rochosos, principalmente para uso na pavimentação rodoviária. Ele busca qualificar e quantificar o estado de integridade que se encontra a rocha no momento em que está sendo ensaiada, e assim dar uma indicação do comportamento dessa depois, quando da sua utilização na obra. Nesse trabalho os resultados do ensaio de sanidade serviram, também, como parâmetro para a seleção das amostras para estudo, já que uma das idéias do trabalho foi

a de, escolhendo amostras com uma gama de resultados distintos, buscar o entendimento entre os resultados do ensaio de sanidade e outros ensaios e análises realizados.

Todas as amostras foram ensaiadas utilizando-se a metodologia descrita pelo método do DNER, identificado como **ME 089/94** – “Agregados-Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio”, por ser um método de uso corrente no Brasil. Esse método, com variações, é uma espécie de tradução do método **C 88-76**, da ASTM e **T 104-97**, da AASHTO no que diz respeito à execução do ensaio em si, tendo diferenças no que tange à questão do cálculo da perda ponderada total, como é discutido adiante.

Para os ciclos de imersão foi empregada a solução de sulfato de sódio anidro, por ser basicamente o tipo de solução mais utilizado pela maioria dos laboratórios que fazem esse ensaio. Dessa maneira se produziram resultados uniformizados, que puderam ser utilizados para efeito comparativos.

Abaixo se apresenta a lista de equipamentos e materiais utilizados na execução do ensaio.

- britador (de mandíbulas);
- peneiras de malha quadrada com as seguintes aberturas, em milímetros: 63,5; 50,8; 38,1; 32,0; 25,4; 19,1; 16,0; 12,7; 9,5; 8,0; 4,75; 4,0; 2,38; 1,19; 0,59 e 0,3;
- balança com capacidade para 2kg e sensibilidade de 0,01g;
- recipientes (tigelas) em aço inoxidável, com tamanho suficiente para caber as diferentes quantidades de material de cada fração ensaiada e receber uma quantidade de solução de sulfato de modo que os fragmentos fiquem recobertos por uma lâmina de aproximadamente 1cm de solução;
- estufa com temperatura controlada entre 105-110°C e com uma razão de evaporação média de pelo menos 25g/h;
- sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4), comercial e cloreto de bário dihidratado ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- papel filtro.

O ensaio de sanidade foi feito sobre amostras formadas por fragmentos de diferentes tamanhos (frações). Para as amostras que eram constituídas por blocos (nos mais diversos formatos e dimensões) ou testemunhos de sondagem (de diâmetros “A, B ou N”) houve a

necessidade de se produzir todas as frações pela quebra dos blocos ou testemunhos com marreta, seguido de britagem (utilizando britador de mandíbulas de pequeno porte). Para o caso das amostras já constituídas por agregados, houve, eventualmente a necessidade de uma britagem no laboratório para se obter as frações de menor tamanho. Em qualquer uma das situações, todo o material disponível foi misturado, posteriormente, para dar uma homogeneidade a toda a amostra, antes de se iniciar a separação por frações. A separação de cada uma das frações foi feita manualmente e a seco, utilizando-se as peneiras indicadas na coluna A da Tabela 4.

Tabela 4- Preparação de amostra e resultados do ensaio de sanidade.

COLUNA A				COLUNA B	COLUNA C	COLUNA D	COLUNA E	COLUNA F
Tamanho das Peneiras (preparação)				Peneiras após os ciclos (mm)	Massa mínima para ensaio (g)	Massa antes do ensaio (g)	Massa após o ensaio (g)	Perda em massa por fração individual ou agrupada (%)
Passado		Retido						
(mm)		(mm)						
63,5	2 1/2"	50,8	2"	32,0	1500			
50,8	2"	38,1	1 1/2 "		1500			
38,1	1 1/2"	25,4	1"	16,0	1005			
25,4	1"	19,1	3/4"		495			
19,1	3/4"	12,7	1/2"	8,0	670			
12,7	1/2"	9,5	3/8"		330			
9,5	3/8"	4,75	malha n.º 4	4,0	300			
9,5	3/8"	4,75	malha n.º 4	4,75	110			
4,75	malha n.º 4	2,38	malha n.º 8	2,38	110			
2,38	malha n.º 8	1,19	malha n.º 16	1,19	110			
1,19	malha n.º 16	0,59	malha n.º 30	0,59	110			
0,59	malha n.º 30	0,30	malha n.º 50	0,30	110			

Observa-se que há a separação de duas porções para a fração retida na peneira 4,75mm. Esse fato é objeto de comentário quando do cálculo da perda ponderada.

Após a separação, o material retido em cada uma das frações foi lavado em água corrente e colocado para secar em estufa na temperatura entre 105 e 110°C, por 24horas (até

atingir massa constante). A seguir, cada fração foi peneirada novamente, utilizando o mesmo conjunto de peneiras do primeiro peneiramento, e separado quantidades mínimas recomendadas pelo método -conforme indicado na coluna C da Tabela 4- e medida suas massas (massa antes da ciclagem) de ensaio (coluna D).

Para as frações retidas acima de 12,7mm, contava-se o número de fragmentos existentes em cada uma delas, para a avaliação qualitativa, após os ciclos. Essa avaliação qualitativa não foi objeto de análise nesse trabalho e, assim, não foi incluída como dado de resultado do ensaio. Antes de iniciar os ciclos de imersão em solução e secagem em estufa houve a necessidade da preparação da solução de sulfato de sódio. A solução foi preparada, dissolvendo-se uma quantidade de sulfato de sódio anidro em água à temperatura ambiente (em torno de 20 a 25°C) e deixada em repouso por 48 horas, antes de filtrá-la. A solução de sulfato de sódio deve apresentar uma densidade entre 1,151 e 1,174 antes de ser utilizada. Essa densidade precisava ser verificada e acertada sempre antes do início de cada ciclo de imersão.

A etapa de ciclagem do ensaio de sanidade consistiu, inicialmente, numa imersão dos fragmentos de cada fração na solução de sulfato de sódio, de modo que essa cubria os fragmentos com uma espessura de solução de pelo menos 1cm acima da superfície desses. Os fragmentos ficavam em imersão entre 16 e 18 horas e a temperatura da solução era controlada para ficar em torno de 21°C. As tigelas foram cobertas com plástico para evitar a contaminação com materiais estranhos à amostra e diminuir a evaporação ou perda de temperatura para o meio ambiente, principalmente em dias frios. Terminado o tempo de imersão, a solução foi drenada de cada uma das tigelas e essas foram colocadas na estufa a uma temperatura entre 105 e 110°C, por um período de 8 horas, para executar a fase de secagem do ciclo. Após esse tempo, o material de cada amostra foi retirado da estufa e deixado esfriar até atingir a temperatura ambiente, para, então, ser submetido novamente à fase de imersão na solução de sulfato de sódio.

O método de ensaio não limita o número de ciclos a serem feitos, porém é invariavelmente citado em todos os trabalhos relativos a esse ensaio que o número de ciclos feitos é de 5 (cinco) e, portanto, adotou-se esse número para executar o ensaio nas amostras estudadas.

Terminado o quinto ciclo de imersão e secagem em estufa, cada fração ensaiada foi lavada em água a temperatura de aproximadamente 60°C e, logo em seguida, imersa numa

solução de cloreto de bário a 10%, para a retirada do restante de sulfato de sódio que porventura pudesse ter ficado aderido às superfícies dos fragmentos. Todas as frações foram a seguir novamente lavadas - agora em água corrente e à temperatura ambiente- e colocadas em estufa na mesma temperatura da fase de secagem (105-110°C) até atingirem a constância de massa, o que levou, em média, 24 horas.

Com o material seco, cada fração foi peneirada, utilizando-se as peneiras indicadas na coluna B da Tabela 4 e medido suas massas (coluna E da Tabela 4).

Na etapa do cálculo das perdas foi feito, primeiramente, o cálculo das perdas percentuais havidas em cada uma das frações ensaiadas. Com os valores de massa antes do ensaio (coluna D da Tabela 4) e após o ensaio (coluna E da Tabela 4), calculou-se a perda de cada fração. Para o caso das frações retidas entre as peneiras de 50,8 e 38,1mm, 25,4 e 19,1mm, e 12,7 e 9,5mm, a perda calculada (coluna F da Tabela 4) correspondeu a uma média ponderada entre as massas antes do ensaio, de cada peneira, e a perda havida em cada uma das frações, obtidas isoladamente. Assim, para esses intervalos de tamanho de fragmento resulta em um único valor percentual (perda por fração agrupada). O exemplo da Tabela 5 ilustra os resultados obtidos para uma das amostras ensaiadas. Nesse exemplo as frações retidas nas peneiras de 50,8, 38,1, 25,4 e 19,1mm não foram ensaiadas.

Tabela 5- Resultados do ensaio de sanidade da amostra n.º652.

Tamanho das Peneiras (preparação)				Peneiras após os ciclos (mm)	Massa mínima para ensaio (g)	Massa antes do ensaio (g)	Massa após o ensaio (g)	Perda em massa por fração individual ou agrupada (%)
Passado		Retido						
(mm)		(mm)						
19,1	3/4"	12,7	1/2"	8,0	670	670,40	669,20	0,5
12,7	1/2"	9,5	3/8"		330	330,00	325,80	
9,5	3/8"	4,75	malha n.º 4	4,0	300	300,69	295,66	0,4
Divisão entre agregado gráudo e agregado miúdo								
9,5	3/8"	4,75	malha n.º 4	4,75	110	110,84	108,31	1,6
4,75	malha n.º 4	2,38	malha n.º 8	2,38	110	110,04	102,30	11,5
2,38	malha n.º 8	1,19	malha n.º 16	1,19	110	110,00	97,32	17,5
1,19	malha n.º 16	0,59	malha n.º 30	0,59	110	110,00	90,73	18,6
0,59	malha n.º 30	0,30	malha n.º 50	0,30	110	110,00	88,32	20,5

Na seqüência houve a necessidade do cálculo da perda ponderada total de cada amostra. Essa etapa do ensaio é a mais controversa de ser realizada devido, em parte, à falta de clareza dos métodos de ensaio, como é o caso do método preconizado pelo DNER.

Para o cálculo das perdas ponderada e total é imprescindível que se faça a análise granulométrica do material que está sendo ensaiado, ou que se conheça a distribuição granulométrica teórica do material na forma que pretende ser utilizado, já que o cálculo é feito ponderando-se o valor da perda encontrado em cada fração (ou intervalo de peneiras), com a respectiva porcentagem de massa retida (individual). Como, quase sempre, pelo estágio que se encontram os estudos para utilização de determinada rocha não se sabe qual ou quais as distribuições granulométricas que deverão ser empregadas em determinada obra, a questão do cálculo da perda fica, a princípio, em aberto. Outro aspecto que precisa ser levado em conta é o de que, para efeitos do ensaio, os materiais são separados em duas categorias, denominadas na maioria das normas ou métodos de **agregado graúdo** (grosso) e **agregado miúdo** (fino).

A divisão de um agregado em graúdo (ou grosso) e miúdo (ou fino), é dada pela maioria dos métodos de ensaio pela fração do intervalo **9,5mm (3/8")** e **4,75mm(n.º 4)**. Assim **agregado graúdo** é todo o material que é 100% retido na peneira 4,75mm, e **agregado miúdo** é todo o material que é 100% passante na peneira 9,5mm. Observa-se que a fração do intervalo 9,5 e 4,75mm é comum ao agregado graúdo e ao agregado miúdo. O método do DNER, embora utilize esse mesmo critério para separar os dois tipos de materiais, não os denomina de agregado graúdo e miúdo. Ele prefere utilizar os termos **material retido** na peneira 4,75mm, no lugar de agregado graúdo, e **material passante** na peneira 9,5mm, no lugar de agregado miúdo. Os métodos do Estado da Califórnia (Test Method **n.º 214-D**) e do LNEC (**E 238-1970**), embora separem os materiais em agregado graúdo (chamado de grosso) e miúdo (fino), não consideram o intervalo entre 9,5 e 4,75mm, como comum a ambos os tipos. Para esses métodos o intervalo pertence ao **agregado graúdo**.

O esclarecimento sobre esta divisão dos materiais se faz necessário pois a metodologia de cálculo da perda ponderada, na maioria dos métodos, utiliza essa divisão. Dessa maneira, caso a análise granulométrica real (ou teórica) da amostra ensaiada mostre que a mesma se enquadra como agregado graúdo, o ensaio e o cálculo da perda ponderada é feito utilizando-se apenas as frações retidas acima da peneira de 4,75mm. Caso a análise granulométrica da

amostra mostre que se trata de um agregado miúdo, o ensaio e o cálculo da perda ponderada são feitos no material passante na peneira de 9,5mm.

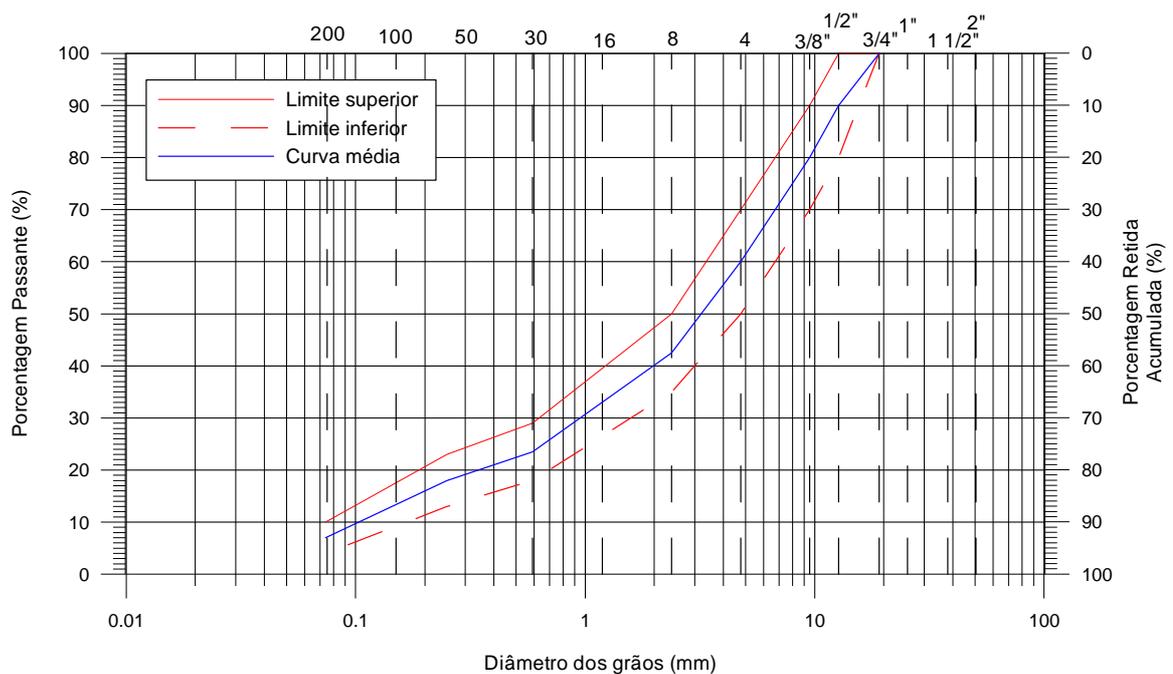
E para o caso da amostra que apresenta uma análise granulométrica onde contenha quantidades significativas (mais de 10% de fragmentos retidos acima da peneira 9,5mm e mais e 10% de fragmentos abaixo da peneira 4,75mm) de material nessa condição granulométrica? Nesse caso, a amostra em questão não pode ser classificada nem como agregado graúdo nem como agregado miúdo. Para essa situação somente os métodos estabelecidos pela ASTM e AASHTO são os que apresentam a sistemática de cálculo a ser feito. Para esses métodos o ensaio deve ser realizado em ambos os materiais, mas o cálculo da perda ponderada deve ser expresso individualmente, como se fossem um agregado graúdo e um agregado miúdo isoladamente. Eles prescrevem, no entanto, que deva ser apresentada juntamente com os resultados de perdas, a proporção relativa de agregado graúdo e de agregado miúdo que compõe a amostra total.

Em assim se procedendo se teria dois resultados de perdas para uma única amostra, o que não aparece, paradoxalmente, na maioria dos resultados apresentados em trabalhos sobre o ensaio de sanidade.

Para esse estudo se propôs utilizar dois critérios para a obtenção das perdas ponderada e total de cada uma das amostras estudadas. Para ambos os critérios se adotou a mesma distribuição granulométrica. A faixa escolhida corresponde à **Faixa B** do concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) estabelecida pelo DAER na especificação de serviço ES P-16/91 daquele órgão. Cabe salientar, no entanto, que a escolha de uma ou outra distribuição granulométrica não interfere nas análises e conclusões feitas posteriormente. A escolha da faixa “B” do CBUQ foi apenas porque essa é tradicionalmente utilizada pelo DAER no seu estudo de pedreiras. A granulometria dessa faixa, reproduzida na Tabela 6 e na Figura 5, mostra que a mesma apresenta mais de 10% de fragmentos acima da peneira 9,5mm e mais de 10% de fragmentos abaixo da peneira 4,75m, ou seja não pode ser enquadrada nem como agregado graúdo “puro”, nem como agregado miúdo “puro”.

Tabela 6– Faixa granulométrica da graduação “B” do CBUQ (DAER-1991)

Peneiras	(mm)	Limites da Faixa “B” do CBUQ (%passante)	Granulometria da curva média	Granulometria da curva média
			(%retido individual)	(%retido acumulado)
3/4"	19,1	100-100	0,0	0,0
1/2"	12,7	80-100	10,0	10,0
3/8"	9,5	70-90	10,0	20,0
n.º 4	4,75	50-70	20,0	40,0
n.º 8	2,38	35-50	17,5	57,5
n.º 30	0,59	18-29	15,0	72,5
n.º 60	0,25	13-23	9,5	82,0
n.º 200	0,074	4-10	11,0	93,0

**Figura 5**- Curvas granulométricas da graduação B do CBUQ (DAER-1991).

Isso forçou, por conseguinte, a uma análise das formas de cálculo das perdas ponderada e total apresentado pelos métodos de ensaios mais utilizados.

Foram analisados o critério estabelecido pelo DAER, além de outros quatro métodos estrangeiros (Método do Estado da Califórnia, da ASTM, da AASHTO e do LNEC), e mais o método estabelecido pelo DNER.

O primeiro dos critérios de cálculo é aquele até recentemente utilizado pelo DAER e foi aqui incluído por ser um critério historicamente utilizado. O segundo critério, surgido da análise dos quatro métodos estrangeiros e mais do método do DNER é aqui apresentado porque é o critério que se adequa ao cálculo de perdas de materiais que possuem distribuição granulométrica semelhante à da faixa “B” do CBUQ.

Utilizando-se o critério tradicional do DAER, os valores a serem tomados para o cálculo das perdas ponderada e total são as porcentagens retidas individuais (que representam a curva média da faixa escolhida), sem levar em conta a separação em agregado graúdo e miúdo. Nesse caso, para a fração retida em 4,75mm onde foram ensaiadas duas porções, uma que corresponderia ao agregado graúdo e outra ao agregado miúdo, calculou-se utilizando o de valor de perda mais alto. Para as frações abaixo de 0,3mm, esse critério, igualmente como em qualquer outro critério de cálculo, a perda é igual a zero. Dessa forma, como mostra a Tabela 7, o cálculo da perda ponderada por fração é feito multiplicando-se a perda por fração (individual ou agrupada) pela porcentagem retida individual de cada fração e, ao final, a perda ponderada total é dada pela soma das perdas individuais ou agrupadas, ficando reduzida a um único valor.

Tabela 7– Resultado das perdas ponderadas por fração e total da amostra n.º652, segundo critério do DAER.

Tamanho das Peneiras (preparação)				Perda em massa por fração individual ou agrupada (%)	Distribuição granulométrica (retido individual) (%)	Perdas ponderadas por fração e total (%)
Passado		Retido				
(mm)		(mm)				
19,1	3/4"	12,7	1/2"	0,5	20,0	0,1
12,7	1/2"	9,5	3/8"			
9,5	3/8"	4,75	malha n.º 4	0,4 (não utilizado)	-	-
9,5	malha n.º 4	4,75	malha n.º 4	1,6	20,0	0,3
4,75	malha n.º 4	2,38	malha n.º 8	11,5	17,5	2,0
2,38	malha n.º 8	1,19	malha n.º 16	17,5	8,5	1,5
1,19	Malha n.º 16	0,59	malha n.º 30	18,6	10,5	2,0
0,59	malha n.º 30	0,30	malha n.º 50	20,5	5,5	1,1
					TOTAL	7,0

Obs.: O percentual retido individual indicado para a fração 1,19mm foi retirado da curva média da graduação “B” do CBUQ.

Analisando-se o critério apresentado pelo DNER, verificou-se que o mesmo é pouco esclarecedor, já que no seu texto o método solicita que se faça esse cálculo utilizando a granulometria da amostra ensaiada (ou uma granulometria que represente a amostra coletada). Dessa forma se obteria um único valor para a perda ponderada total. Porém, paradoxalmente, o método apresenta exemplos de cálculo onde aparecem calculados, separadamente, as perdas para materiais graúdos (retidos na fração 4,75mm) e miúdos (passantes na fração 9,5mm). Nesse caso, para o material em questão, que apresenta mais de 10% de fragmentos acima da peneira 9,5mm e mais de 10% de fragmentos abaixo da peneira 4,75m fica subentendido que se deveria utilizar a granulometria original deste? Em assim se procedendo, esse critério seria o mesmo adotado pelo DAER. De qualquer modo, não fica claro quando utilizar uma ou outra forma de apresentação de resultado.

Por sua vez, o método do Estado da Califórnia (Test Method n.º 214-D), além de não comentar que procedimento adotar caso a amostra recebida não seja nem um agregado graúdo nem um agregado miúdo, ainda determina que o cálculo da perda ponderada (caso o material recebido seja um agregado miúdo), seja feito segundo uma graduação especificada pelo método e não pela graduação da amostra recebida. Por que disso? Não é explicado no método.

Para o caso de utilização do método do LNEC, um dos exemplos trazidos junto com o método mostra que, mesmo que a amostra seja composta por materiais que contenham mais de 10% de agregado fino e mais de 10% de agregado grosso, os resultados de perda ponderada são dados separadamente e calculados sobre uma distribuição granulométrica recalculada com base em 100% para o agregado fino e 100% para o agregado grosso.

Por fim os métodos que apresentam de forma mais clara como de deve proceder para calcular as perdas para qualquer condição de granulometria da amostra recebida (ou estabelecida teoricamente) são os métodos da ASTM e da AASHTO. Nesses métodos, seja o material recebido um agregado graúdo “puro”, seja um agregado miúdo “puro”, ou ainda que contenha mais de 10% de material retido na peneira 9,5mm e, ao mesmo tempo, mais de 10% passante na peneira 4,75mm, sua forma de cálculo está contemplada e é distinta.

Para os casos de material caracterizado como agregado graúdo “puro” ou agregado miúdo “puro”, a sistemática de cálculo das perdas é a mesma preconizada no método do LNEC ou do DNER, já discutidos. A diferença ocorre quando o material ensaiado contém

mais de 10% de material retido na peneira 9,5mm e, ao mesmo tempo, mais de 10% passante na peneira 4,75mm. Para esse caso, esse material deve ser ensaiado separadamente, e ter as perdas ponderadas calculadas separadamente para as frações menores que 4,75mm e maior que 4,75mm, baseando-se no recálculo da graduação da amostra recebida, considerando a fração miúda como 100%, e a fração graúda também como 100%. Registra-se daí os resultados de perda ponderada, separadamente, anotando juntamente a porcentagem de material miúdo e de material graúdo existente na graduação original da amostra.

Entretanto, fica-se, ainda, com a questão de se ter dois valores de perda ponderada total calculada para uma única amostra. Para se “contornar” essa situação e obter-se um único valor para cada amostra, sugere-se que seja calculado o que se denomina de **perda média ponderada total** ($P_m P_{total}$). A perda média ponderada total seria calculada pela expressão:

$$P_m P_{total} = \frac{(P_p A_g * A_g) + (P_p A_m * A_m)}{100}$$

Onde:

$P_m P_{total}$ = Perda média ponderada total da amostra

$P_p A_g$ = Perda ponderada da porção de agregado graúdo

$P_p A_m$ = Perda ponderada da porção do agregado miúdo

A_g = Porcentagem de agregado graúdo presente na amostra recebida

A_m = Porcentagem de agregado miúdo presente na amostra recebida

A Tabela 8 mostra como ficariam os valores de porcentagem retida individual para o cálculo dessa perda média ponderada total, utilizando-se a distribuição granulométrica original da graduação “B” do CBUQ, empregada no trabalho como granulometria de referência.

Tabela 8– Valores da curva média da graduação “B” do CBUQ, recalculado em função da separação em agregado graúdo e miúdo.

Peneiras (retido)		Distribuição granulométrica original da curva média da graduação “B” do CBUQ (% retido individual)	Distribuição granulométrica recalculada para 100 por cento de agregado graúdo e 100 por cento para agregado miúdo (% retido individual)	
(mm)				
12,7	1/2”	20,0	50,0	Agregado graúdo (40% da amostra total)
9,5	3/8”			
4,75	malha n.º 4	20,0	50,0	
2,38	malha n.º 8	17,5	29,2	Agregado miúdo (60% da amostra total)
1,19	malha n.º 16	8,5	14,2	
0,59	malha n.º 30	10,5	17,5	
0,30	malha n.º 50	5,5	9,1	
abaixo de 0,30mm*		18,0*	30,0*	

* Não ensaiada. Para efeitos de cálculo considera-se perda igual a zero.

3.3.7 Durabilidade (degradação Washington)

Outro ensaio que visa determinar o estado de integridade das amostras é o método denominado “Ensaio de Degradação do Estado de Washington”, ou simplesmente Ensaio de degradação Washington, elaborado pelo Departamento de Auto-estradas do Estado de Washington, nos Estados Unidos, na década de sessenta.

A intenção de se utilizar esse ensaio no rol de ensaios foi, principalmente, a de estabelecer um comparativo entre esse e os resultados do ensaio de sanidade, já que o ensaio de degradação Washington é tido por alguns técnicos da área de engenharia como o ensaio mais adequado para se estabelecer a durabilidade de agregados diante das condições ambientais à que esses agregados estão submetidos, em particular no Estado do Rio Grande do Sul.

Para a sua execução utilizou-se a própria metodologia elaborada pelo Departamento de Auto-estradas do Estado de Washington referenciada como **WSHD Test Method n.º 113 A**, auxiliado por uma tradução da mesma, feita pelo DAER.

Os equipamentos e materiais empregados nesse ensaio consistiram em:

- britador (de mandíbulas);
- agitador de peneiras do tipo Tyler, com um eixo excêntrico (came) capaz de produzir um deslocamento horizontal de $1\frac{3}{4}$ " (44,45mm) e a uma frequência de agitação de 300 oscilações por minuto (Figura 6);
- balança com capacidade para 2kg e sensibilidade de 1g;
- medidor de pH;
- recipiente plástico cilíndrico, com diâmetro de $7\frac{1}{2}$ " e altura de 6", provido de tampa (n.º 1 da Figura 6);
- cilindros utilizados no ensaio de equivalente de areia;
- solução de estoque (concentrada) utilizada no ensaio de equivalente de areia;
- peneiras de malha quadrada com aberturas de 12,7mm ($1/2$ "), 6,3mm ($1/4$ "), 2,0mm (n.º 10) e 0,075mm (n.º 200);
- proveta de 500ml e graduada de 10 em 10 ml (n.º 1 da Figura 7);
- funil com diâmetro aproximado do diâmetro das peneiras (n.º 2 da Figura 7);
- cronômetro.



Figura 6- Agitador de peneiras para simular ensaio de desgaste Washington. 1- Recipiente de plástico.



Figura 7- Conjunto proveta (1), suporte, funil (2) e peneiras.

A preparação de amostras para a execução desse ensaio exigiu procedimentos semelhantes aos executados para o ensaio de sanidade. Assim, como o ensaio é feito sobre fragmentos (agregado) retidos entre as peneiras de 12,7mm e 2,0mm, houve a necessidade de se produzir as frações pela quebra dos blocos ou testemunhos com marreta, seguido de britagem. Para a britagem utilizou-se um britador de mandíbulas de pequeno porte. Para o caso das amostras já constituídas por agregados (naturais ou resultantes de britagem) houve, eventualmente, a necessidade de uma britagem no laboratório para se obter as quantidades exigidas por cada fração de ensaio. Em qualquer uma das situações, todo o material disponível foi misturado previamente para se ter uma homogeneidade de toda a amostra antes de iniciar o ensaio propriamente dito. A separação de cada uma das frações foi feita manualmente e a seco e, no final, obtinha-se, para cada amostra a ser ensaiada, 500g de material passante na peneira de 12,7mm e retido na de 6,3mm e 500g de material passante na peneira de 6,3mm e retido na peneira de 2,0mm.

Após a separação, o material retido em cada uma das frações foi lavado separadamente em água corrente, utilizando-se a peneira de 2,0mm, e colocando-se para secar em estufa na temperatura entre 105 e 110°C, por 24horas (até atingir massa constante). Feito isso o material estava pronto para ser ensaiado.

O ensaio não foi possível de ser executado conforme requisitos do método no que diz respeito ao agitador de peneiras, pois o único equipamento semelhante e existente para isso encontra-se na Unidade de Normas e Pesquisas (UNP), do DAER (Figura 6). Esse equipamento, porém, é capaz de produzir um deslocamento do seu eixo excêntrico menor do que os 44,45mm exigidos pelo método, além de produzir apenas 200 oscilações por minuto. Desta maneira, mesmo tendo-se estendido o tempo de agitação (o método pede 20 minutos) para se tentar compensar a perda na frequência (de 300 para 200 oscilações por minuto), os resultados obtidos devem ser considerados apenas de forma referencial, pois com a diminuição do deslocamento do excêntrico e a menor frequência de agitação os valores de degradação obtidos são quantitativamente menores do que deveriam ser. De qualquer modo a análise comparativa pode ser efetuada, respeitando-se apenas sua limitação no que diz respeito a correlações quantitativas.

Foram ensaiadas dezessete das vinte e oito amostras estudadas. Cada uma delas, depois de seca, foi colocada no recipiente de plástico cilíndrico, adicionado 200ml de água deionizada (com seu pH inicial medido) e tampado. O conjunto foi, então, posto no agitador de peneiras, que foi acionado por 30 minutos na frequência de 200 oscilações por minuto. Terminado esse tempo, o recipiente teve todo o seu conteúdo (agregado+água) esvaziado sobre a peneira de 2,0mm (sobrepostas à peneira de 0,075mm) e ambas acopladas a um funil que estava montado em um suporte (ver Foto 6) para a coleta do líquido drenante do agregado. Ao mesmo tempo em que escorria a água do recipiente plástico, o agregado era continuamente lavado com água deionizada e limpa, e todo o líquido era captado na proveta de 500ml, colocada na saída do funil. Essa lavagem era feita até completar os 500ml da proveta.

No cilindro utilizado para o ensaio de equivalente de areia colocava-se 7ml da solução de estoque desse ensaio. A seguir, a proveta de 500ml foi tampada (utilizando a palma da mão) e virada no sentido vertical, tão rápido quanto possível, e retornado à sua posição original por dez vezes, de modo que todos os sólidos existentes na água ficassem dispersos. Imediatamente após, se despejava a dispersão no cilindro do ensaio de equivalente de areia até que a mesma atingisse a marca de 15polegadas existente nesse cilindro. O cilindro foi então tampado com rolha de borracha e teve seu conteúdo virado, também, no sentido vertical,

alternadamente, de baixo para cima e de cima para baixo, de modo que as bolhas de ar existentes no seu interior atravessassem todo o cilindro por 20 vezes e em cerca de 35 segundos. Terminado essa operação foi retirada a rolha e deixado o cilindro na sua posição normal (virado para cima) parado sobre uma mesa plana e sem vibração, por cerca de 20 minutos. Logo após era feita a verificação da altura da coluna de sedimento que havia se separado da água e anotado seu valor com uma definição de 0,1 polegadas. O valor da altura (H) lida no cilindro, em polegadas, serviu para a determinação do **Fator de Degradação Washington**, que é o resultado quantitativo do ensaio. Para seu cálculo utilizou-se a fórmula:

$$D = \left(\frac{15 - H}{15 + 1,75 * H} \right) * 100$$

onde:

D = Fator de Degradação Washington, em porcentagem;

H = altura da coluna de sedimentos formada dentro do cilindro, em polegadas

Outro modo de se obter o valor do fator de degradação Washington é utilizar a tabela apresentada no próprio método de ensaio que correlaciona a altura de sedimentos, lida (também, em polegadas) com esse fator. No final do ensaio mediu-se o pH da suspensão, para compará-lo com o pH inicial.

3.3.8 Teor de sílica

A determinação do teor de sílica (sílica total) teve dois objetivos. Um deles foi o de se obter um parâmetro para fazer correlações com os resultados dos ensaios de abrasividade CERCHAR e dureza CERCHAR, e um segundo, que foi o de obter uma melhor classificação petrográfica dos tipos litológicos estudados, já que o teor de sílica da rocha é um dos parâmetros utilizados para essa classificação. Das vinte e oito amostras foram escolhidas vinte e quatro, sendo o critério de escolha baseado nos valores encontrados para os ensaios de abrasividade CERCHAR e dureza CERCHAR, de modo a abranger a faixa de valores encontradas para esses ensaios e poder traçar gráficos de correlações entre eles.

As determinações de sílica total foram baseadas na norma **D 4326/97** da ASTM edição de 1998, tanto no aspecto de preparação como da análise em si, e foram realizadas no Laboratório de Análises Inorgânicas da CIENTEC e no Laboratório de Fluorescência de Raios-X da UFRGS.

Para a execução da análise foram empregados os equipamentos e materiais relacionados a seguir:

- gral e pistilo de ágata para pulverização;
- peneiras com aberturas de 0,25mm (n.º 60) e 0,075mm (n.º 200);
- cadinhos de platina;
- fundente (tetraborato de lítio);
- equipamento de fluorescência de raios-X da Marca RIGAKU, Modelo RIX 3100, adquirido pela CIENTEC no ano de 2000;
- equipamento de fluorescência de raios-X da Marca RIGAKU, Modelo RIX 2000 da Universidade Federal do Rio Grande do sul
- forno tipo mufla com capacidade de atingir temperaturas acima de 1000°C;

A preparação das amostras para essa análise exigiu apenas a pulverização (moagem fina com gral de ágata) das mesmas, pois o trabalho de seleção de fragmentos representativos, bem como a moagem grosseira já haviam sido feitas quando da preparação do material para a determinação da perda ao fogo. Como havia também a necessidade de se fazer a determinação da perda ao fogo sobre esses materiais antes da análise do teor de sílica, simplesmente aproveitou-se dos “resíduos” remanescentes da análise de perda ao fogo e fez-se, então, uma pulverização e peneiramento à seco, para obter-se um material de tamanho inferior à 0,075mm. O material de cada amostra foi homogeneizado e retirado cerca de 1 grama para obtenção da pastilha de amostra fundida, que foi, posteriormente, analisada. Para a confecção da pastilha (ou botão) o material, já calcinado no ensaio de perda ao fogo, foi pulverizado com o auxílio de gral e pistilo de ágata e calcinado novamente, desta vez a uma temperatura de 750°C, e deixado esfriar até a temperatura ambiente. A seguir foi tomado cerca de 1 grama desse material, misturado com tetraborato de sódio, nas proporções adequadas, colocado em um cadinho de platina e levado à temperatura de fusão. Não houve a necessidade de ser utilizado um absorvente pesado junto à mistura e como o material fundente, também, perde massa no processo de fusão, cada resultado obtido foi corrigido em função dessa perda. O material fundido foi despejado em um molde apropriado para que esse resfriasse gradualmente e obter, assim, uma pastilha, onde se obtivesse uma superfície plana e uniforme o suficiente para ser exposta aos raios-X.

Da mesma forma foram preparadas pastilhas com materiais de referência para a obtenção da “curva de calibração” para, posterior análise das amostras. Os materiais de

referência utilizados foram cinzas de carvão e rochas vulcânicas que possuem teores dentro da faixa de teores esperadas para as amostras analisadas.

A obtenção da “curva de calibração”- na verdade se trata de uma reta que correlaciona o teor de sílica dos materiais de referência com a intensidade da radiação detectada pelo espectrofotômetro de fluorescência de raios-X- com os materiais de referência foi possível obter-se a equação que relaciona teor de sílica do material de referência com o número de cintilações (medida em kcps) recebidas pelo espectrofotômetro de fluorescência de raios-X.

Para as leituras no espectrofotômetro foram definidas as seguintes condições analíticas:

- tipo de cristal empregado: PET (pentaerythritol com plano hkl de 002 e distância interplanar (2d) de 8,742Å;
- ângulo $2\theta = 109,4^\circ$;
- tensão do tubo: 50kV x 70mA;
- tempo de leitura: 10s

Para cada leitura (em kcps) feitas no espectrofotômetro de fluorescência foi calculado o valor porcentual (% em massa) correspondente de sílica, utilizando a equação obtida com os materiais de referência. Para a finalidade que foi proposta a análise, os valores de teores obtidos foram arredondados para o valor inteiro mais próximo, ficando esses muito além da sensibilidade dada pelo método analítico.

3.3.9 Índice de resistência à carga pontual (*Point Load Test*)

O índice de resistência à carga pontual foi outro parâmetro escolhido para análise comparativa com os resultados do ensaio de dureza CERCHAR. Apesar de sua limitação no que diz respeito à indicação da resistência de rochas, esse ensaio é muito empregado quando não se tem ou não se consegue obter amostras com dimensões adequadas para a execução do ensaio de compressão uniaxial. Além disto, a resistência à carga pontual pode ser obtida no campo com o emprego de equipamento portátil. Para a execução desse ensaio foi empregado o método sugerido pela ISRM referenciado como “*Suggested Method for Determining Point Load Strength*, publicado no periódico ‘International Journal of Rock Mechanics Sciences & Geomechanics Abstracts’, vol. 22, n.º 2, pp 51-60, 1985”.

Os equipamentos e materiais empregados compreendem:

- serra (tipo policorte) com disco diamantado;
- paquímetro (digital) com leitura de até 150mm e divisões de 0,01mm;
- Prensa de laboratório Marca LOSENHAUSEN, com capacidade de até 10 toneladas e leituras de carga mínima de 2 quilos (Figura 8);

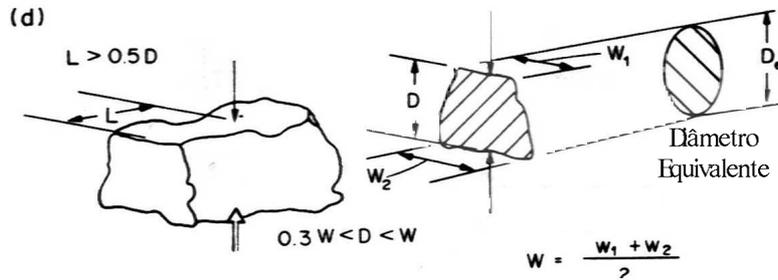


Figura 8- Prensa para ensaio de carga pontual.

O ensaio de carga pontual, como dito anteriormente, é adequado para se obter valores de resistência (na compressão) de pequenos fragmentos, e foi exatamente a situação encontrada para as amostras estudadas. Como as amostras estavam na forma de fragmentos, britados no laboratório ou não e seu formato eram normalmente irregulares, a determinação da resistência foi feita por esse ensaio. Para isso, os fragmentos foram inicialmente serrados (utilizando serra com disco diamantado), principalmente para criar duas superfícies relativamente planas e paralelas entre si, que foram as faces onde foi aplicada, posteriormente a carga de ruptura. Além disso, para os fragmentos que apresentavam formas muito irregulares foram feitos outros cortes para produzir um formato mais apropriado para a medida das dimensões utilizadas no cálculo de resistência. Embora ficando com suas dimensões mais reduzidas os fragmentos (corpos-de-prova) ainda assim atenderam às dimensões passíveis de serem ensaiadas. No total foram preparados 10 corpos-de-prova de cada amostra, quantidade essa considerada adequada devido à homogeneidade dos fragmentos.

Após a preparação dos corpos-de-prova, cada um deles teve as suas duas dimensões (W e D da Figura 9) requeridas para cálculo, medidas, com o auxílio do paquímetro e numerados

de um a dez. Como a preparação exigiu o corte utilizando água, os corpos-de-prova foram deixados secar ao ar e ensaiados nessa condição.



Legenda: L= meio comprimento do corpo-de-prova
 W= largura do corpo-de-prova
 D= altura do corpo-de-prova
 D_e = diâmetro equivalente

Figura 9- Pontos de tomada das medidas dos corpos-de-prova de carga pontual.

Na execução do ensaio os corpos-de-prova foram colocados entre duas ponteiras cônicas (forma estabelecida no método de ensaio) montadas na prensa (Ver Figura 10) e submetidos a uma leve carga (suficiente apenas para mantê-los presos entre as ponteiras).



Figura 10- Ponteiras cônicas de aplicação de carga.

Os fragmentos foram colocados de maneira que o carregamento fosse aplicado paralelo à altura “D” e perpendicular à largura “W” dos mesmos. Dessa forma a relação $\frac{W}{D}$ se manteve próxima de **um**, condição exigida pelo ensaio. O tempo de ruptura para todos os ensaios ficou entre os 10 e 60 segundos exigidos pela norma. A cada ruptura de corpo-de-prova o resultado da respectiva carga de ruptura (P) foi anotada em planilha semelhante a da Tabela 9.

Tabela 9- Planilha para cálculo do índice de resistência à carga pontual.

Número Corpo-de- prova	Tipo	Largura - L - (cm)	Altura - A - (cm)	Carga - P - (kN)	umidade (%)	D_e (cm)	D_e^2 (cm ²)	I_s (MPa)	F	I_s (50) (MPa)

Legenda:

D_e^2 = Diâmetro de testemunho equivalente

I_s = Índice de resistência à carga pontual

F = Fator de correção de escala

Simbologia para Tipo

i = irregular

Para o cálculo do índice de resistência à carga pontual ($I_{s(50)}$) precisou-se, primeiramente, calcular o que o método denomina de **índice de resistência à carga pontual**

não corrigida (I_s) (sem o efeito escala), através da fórmula: $I_s = \frac{P}{D_e^2} * 10$, onde

P = carga de ruptura, em kN;

D_e = diâmetro equivalente (em cm²) que, para o caso de ensaio em fragmentos irregulares (*lumps*) é dado por: $D_e^2 = \frac{4 * W * D}{\pi}$, onde “W” e “D” são as dimensões medidas segundo as direções mostradas na Figura 8.

Posteriormente foi feita a correção do efeito escala (*size correction*), já que o valor de “ I_s ” varia em função do diâmetro equivalente (D_e) que cada corpo-de-prova apresenta. Essa correção é feita para uniformizar todos os índices de resistência para um único diâmetro de corpo-de-prova, estabelecido pelo método como 50 milímetros (5cm). O método apresenta três maneiras para se obter o índice de resistência à carga pontual **corrigido ($I_{s(50)}$)**, sendo que a maneira utilizada para a correção dos corpos-de-prova ensaiados foi utilizando-se a fórmula: $I_{s(50)} = F * I_s$, onde:

F = fator de correção do efeito escala, obtido pela fórmula $F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45}$;

Is = índice de resistência à carga pontual não corrigida.

Finalmente, após obter os dez índices corrigidos de cada amostra foi feito o cálculo da média aritmética desses dez valores, desconsiderando-se do cálculo os dois maiores e os dois menores valores encontrados. O resultado é transformado para obter-se os valores de índice de resistência em megapascal (MPa).

3.3.10 Índice de abrasividade CERCHAR

Tanto o ensaio de abrasividade como de dureza apresentados aqui foram desenvolvidos pelo *Centre D'Etudes et Recherches des Charbonnages de France* -CERCHAR, na França, na década de setenta, com vistas à determinação da “nocividade” das rochas diante do emprego de equipamentos e ferramentas na mineração de carvão.

Como já referido anteriormente, o índice de abrasividade CERCHAR, ou simplesmente abrasividade CERCHAR, é um ensaio físico-mecânico ainda desconhecido nacionalmente e que está sendo implementado pela CIENTEC. Não há uma metodologia normalizada para a sua execução, porém, como se trata de um ensaio de fácil execução e com uma metodologia desenvolvida pelo fabricante do equipamento, essa serviu de base para a execução do ensaio. Além disso, alguns trabalhos referenciados em literatura internacional, também, descrevem a metodologia executiva (Valantin & Guillon, 1971; West, 1989).

O efeito abrasivo provocado pelo mecanismo concebido no ensaio de abrasividade CERCHAR é relacionado a dois tipos: desgaste abrasivo **por pressão e por atrito**. Somados, eles produzem o índice de abrasividade da rocha ensaiada. Pela sua concepção o ensaio produz resultados comparativos (ou relativos), isto é, o valor da abrasividade CERCHAR só possui significado interpretativo se for comparado com resultados de dois ou mais ensaios de **diferentes** materiais entre si. Sua grande qualidade em relação a outros ensaios que visam determinar o poder abrasivo de determinado material rochoso reside no fato de que a abrasividade CERCHAR não é um ensaio pontual, sobre apenas um grão mineral, mas ele reflete todas as características petrográficas que concorrem para a manifestação da abrasividade das rochas. O emprego desse ensaio na caracterização de materiais rochosos está

relacionado de forma direta ou indireta com qualquer tipo de condição onde haja interação de ferramenta ou equipamento com esses materiais, como, por exemplo, desgaste de brocas na perfuração, escarificadores de tratores ou bit de máquina do tipo valetadeira. Além de tudo, é um ensaio simples e de rápida execução em nível de laboratório.

Os equipamentos e materiais empregados para a execução do ensaio foram:

- equipamento de abrasividade CERCHAR, conforme visto na Figura 11. O equipamento empregado na execução dos ensaios se encontra na CIENTEC;
- ponteiros confeccionados em aço com resistência de 200kgf/mm^2 e dureza Rockwell C de 50 a 52 (Figura 12);
- torno mecânico equipado com retífica e rebolo de carborundum para a retificação (afiação) das ponteiros após cada ensaio;
- lupa binocular de luz transmitida, com ocular reticulada e ampliação até 2000 vezes (Figura 13).



Figura 11- Equipamento para determinação da abrasividade CERCHAR.



Figura 12- Ponteira do ensaio de abrasividade CERCHAR.



Figura 13- Lupa binocular.

A preparação das amostras para o ensaio não exigiu grandes cuidados, porém constituiu de uma etapa importante para que os resultados obtidos tivessem um correto significado. Como pode ser realizado sobre fragmentos de pequenas dimensões (até 3cm de dimensão máxima) é condição fundamental, primeiramente, que a escolha desses fragmentos seja feita de modo a representar a amostra como um todo. Em segundo lugar, houve a necessidade de se escolher fragmentos que possuíssem pelo menos uma face com superfície plana e sem rugosidade excessiva, de modo que permitisse executar sobre ela um risco de 1 centímetro de comprimento, feito pela ponteira de ensaio, sem a perda de contato sobre a superfície, o que invalida o ensaio. Para cada amostra foram separados e ensaiados 10 fragmentos, quantidade considerada boa e que conduz a uma pequena dispersão de resultados.

Escolhida a face do fragmento a ser ensaiado, esse foi fixado na morça (n.º 1 da Figura 14 do equipamento de abrasividade. A seguir foi colocada a ponteira afiada (n.º 3) no mandril (n.º 2) do equipamento e apoiado o braço (n.º 4) sobre a trava (n.º 5). Com o conjunto pronto, se deslizava a alavanca (n.º 6 da Figura 15), onde estão fixados os braços do equipamento, para trás, de modo a que a alavanca encostasse no parafuso de regulagem traseiro (posição para início do sulco). Em seguida abriu-se a trava deixando a ponteira se apoiar-se suavemente sobre a face da rocha a ser sulcada. A massa de 7 quilos (70N) que está presa no braço do equipamento faz com que a ponteira seja levemente cravada na amostra (em especial sobre amostras mais alteradas).

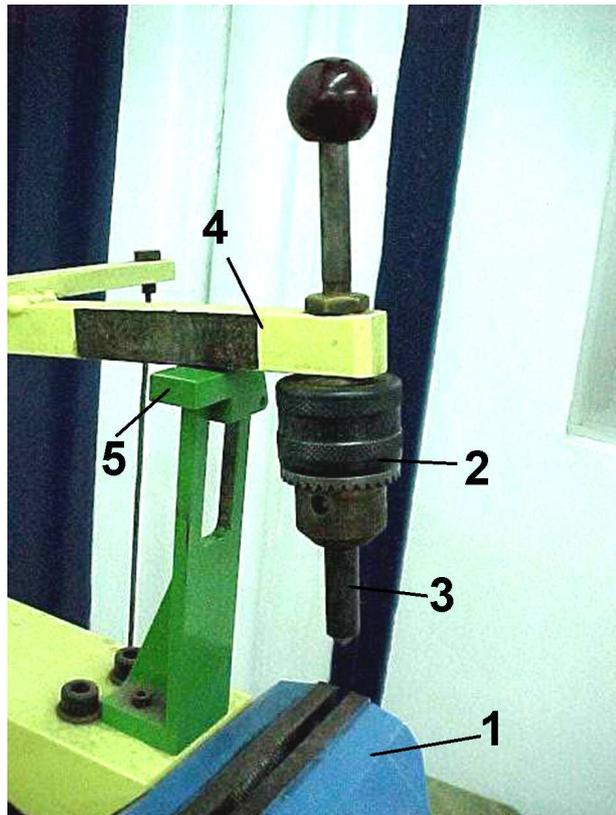


Figura 14- Detalhe da morça (1), mandril (2), ponteira (3), braço (4) e trava (5) do equipamento de abrasividade.



Figura 15- Detalhe da alavanca (6) do equipamento de abrasividade.

A partir daí iniciou-se a execução do sulco na face do fragmento escolhido, puxando a alavanca para frente, de forma contínua e dentro de um espaço de tempo de 1 segundo. A distância percorrida pela ponteira, ou seja, o comprimento do sulco é, também, definido (1 centímetro). Ao final de cada sulco feito (Figura 16), se retirava a ponteira, escolhia-se um novo fragmento e se iniciava o processo novamente.



Figura 16- Sulco deixado pela ponteira na execução do ensaio.

Durante o deslocamento da ponteira sobre a superfície do fragmento, essa sofre um desgaste na sua ponta que, inicialmente, possui forma cônica e pontiaguda (ver Figura 17). O desgaste “d”, deixado pela ponteira, é o elemento de medida para a obtenção do índice de abrasividade. Para a sua medida utiliza-se uma lupa binocular com uma ocular que possui um retículo dividido em linhas verticais que permitem, com a escala de ampliação dada pelas objetivas da lupa, determinar o tamanho do desgaste. Assim, cada ponteira foi colocada sob a lupa e determinado o valor do desgaste, em unidades de **décimo de milímetro**. Para se ter o índice de abrasividade CERCHAR se fez duas leituras – cada leitura correspondia a uma posição da ponteira sob a lupa, tomadas girando-se 90° a mesma - para cada ponteira, anotando-se a média dessas duas leituras. O índice de abrasividade de cada amostra era o resultante da média de dez determinações feitas em cada amostra, e o resultado dessa média era multiplicado por 10 (dez). Assim o índice de abrasividade CERCHAR possui como unidade de medida igual a $\frac{1}{10}$ mm.

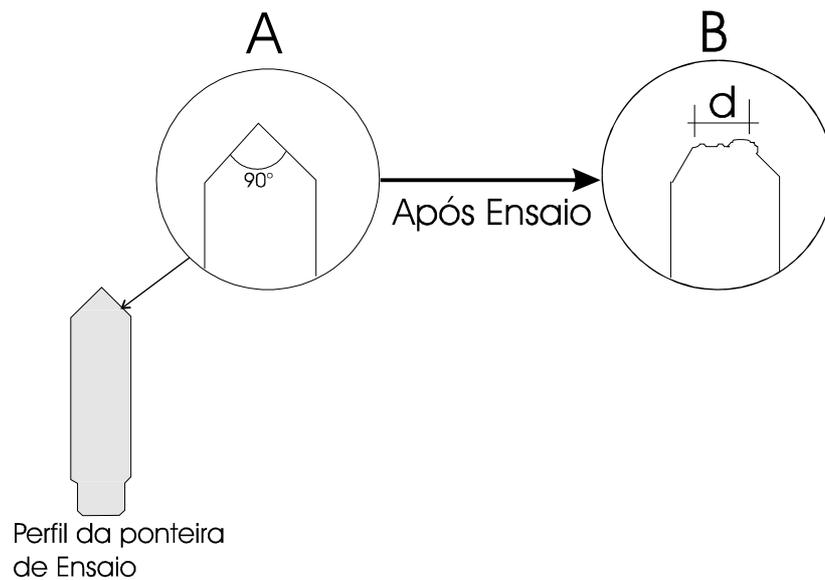


Figura 17- Perfil da ponta de ensaio e detalhe da terminação cônica antes (A) e após (B) o desgaste.

3.3.11 Índice de dureza CERCHAR

O ensaio de dureza CERCHAR também foi desenvolvido pela instituição que leva o seu nome. Por ser, também, um ensaio de fácil execução (não requer praticamente nenhuma preparação de amostra) e que apresenta resultados sem outro similar no contexto de ensaios de dureza em rochas, ele se torna significativo no estudo dessa característica quando se trabalha com questões que envolvem aspectos de perfuração de rochas.

De maneira resumida o ensaio visa determinar o **tempo** que uma broca de carbeto de tungstênio (widia) leva para fazer um furo de **um centímetro** de profundidade em uma rocha. Assim, ainda que de uma forma empírica, o índice de dureza CERCHAR dá uma idéia quantitativa da resistência que uma rocha oferece num processo de perfuração (em especial em perfuração rotativa). Essa resistência (Valantin & Guillon, 1971) pode ser correlacionada a resistência à compressão uniaxial de rochas, que é uma característica mais trabalhosa de ser obtida pelos meios convencionais. Diversos empregos podem ainda ser vislumbrados para

utilização desse ensaio, entre os quais o dimensionamento de equipamentos de perfuração em função da dureza apresentada por determinada rocha. Como se trata de um índice, seu resultado é sempre de natureza comparativa (relativa) entre dois ou mais materiais ensaiados.

Os equipamentos e materiais necessários para a execução do ensaio foram:

- equipamento (perfuratriz) que faz a perfuração da amostra e que apresente as seguintes características construtivas: **velocidade de rotação** do mandril (da broca) de 190rpm; **carga estática** exercida sobre a ponta da broca de 20kg; **dispositivo** para obtenção de dados de tempo e profundidade de perfuração (Figura 18);
- brocas de widia, com diâmetro de 8mm e terminação (parte afiada) em forma de diedro com ângulo de 99° (Figura 19);
- retífica de torno com disco diamantado, para fazer a afiação das brocas depois de utilizadas;
- sistema de aquisição de dados (*hardware e software*) para a elaboração do gráfico profundidade perfurada X tempo.



Figura 18- Equipamento para ensaio de dureza CERCHAR; vista de detalhe. 1-broca; 2-mandril; 3-morça; 4- carga

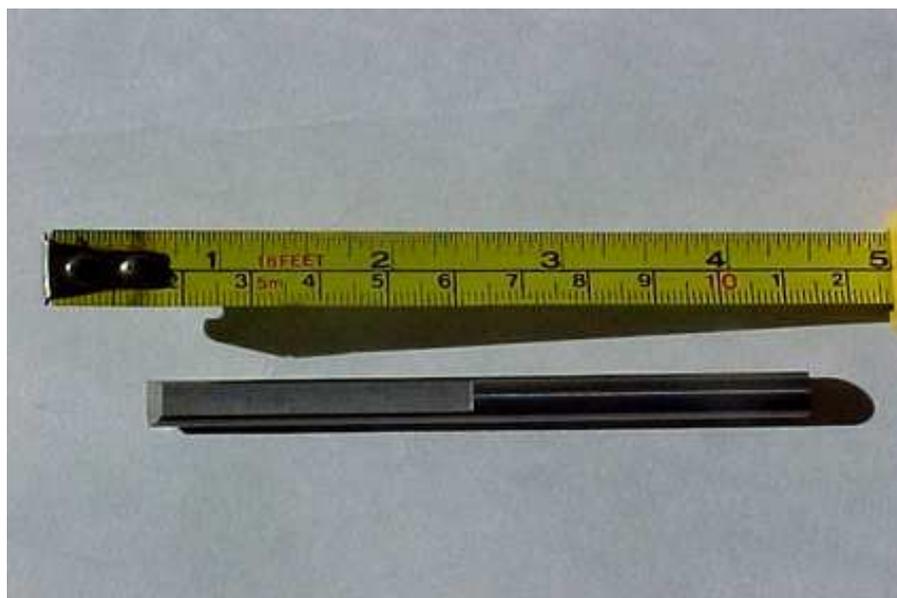


Figura 19- Broca para ensaio de dureza CERCHAR.

Esse ensaio foi executado em fragmentos pequenos de rocha, da ordem de 25mm de tamanho e que apenas possuíam faces com superfícies sem rugosidade acentuada. Os fragmentos foram obtidos utilizando-se marreta ou com disco diamantado e não requereu nenhum tipo de preparação para as superfícies recém criadas. Como se trabalhou com amostras pequenas houve o cuidado apenas de que as mesmas fossem representativas da amostra como um todo.

Para a execução do ensaio foram selecionados 10 fragmentos de cada um dos tipos litológicos, sendo feito um furo em cada fragmento. Como a sistemática de execução do ensaio não é apresentada em nenhuma norma, foi seguido o procedimento descrito em trabalhos de técnicos do CERCHAR (Valantin, 1974) e outros (Dubart & Josien, 1973).

A execução do ensaio iniciou com a colocação de uma broca afiada (Figura 19) no mandril da perfuratriz (n.º2 da Figura 18). Em seguida foi fixado um fragmento na morsa (n.º3 da Figura 18) de modo que esse pudesse sustentar a carga de 20kg (n.º4 da Figura 18) aplicada sobre a extremidade da broca, além de não se soltar durante a execução do furo. Após a fixação do fragmento, a perfuratriz é ligada e a broca baixada até atingir a superfície do fragmento de rocha e produzir no mesmo uma pequena escarificação (criação de uma superfície circular) no ponto onde seria feito o furo. A perfuratriz foi, então, desligada e a superfície recém feita pela broca limpa com um pincel para remover todos os resíduos

produzidos. Esse é o ponto inicial do ensaio (ponto de referência zero para a profundidade). Aqui foi preciso se assegurar, também, que a ponta da broca já não tivesse sofrido algum desgaste. Caso contrário deveria ser substituída por outra broca afiada.

Executada essa etapa, partiu-se a para a realização do furo, acionando a perfuratriz e deixando que a broca descesse livremente, carregada somente pela massa de 20kg apoiada sobre o sistema. Durante a execução do furo o sistema de aquisição de dados se encarregava de tomar leituras de tempo e profundidade de avanço da broca. Quanto mais dura era a rocha menos rápido era o avanço da broca de perfuração.

Junto ao processo de aquisição de dados pôde-se acompanhar o traçado gráfico que mostra a profundidade já perfurada (no eixo das abscissas) contra o tempo de perfuração (no eixo das ordenadas). Embora, teoricamente, o ensaio devesse ser executado até que a broca fizesse um furo de **um** centímetro no fragmento de rocha, à medida que essa avança ocorre um desgaste na extremidade afiada da broca, ao mesmo tempo que o furo vai se colmatando de materiais resultantes da perfuração, de maneira que o gráfico que inicia sendo representado por um linha reta vai se tornando uma curva, como mostra a Figura 20.

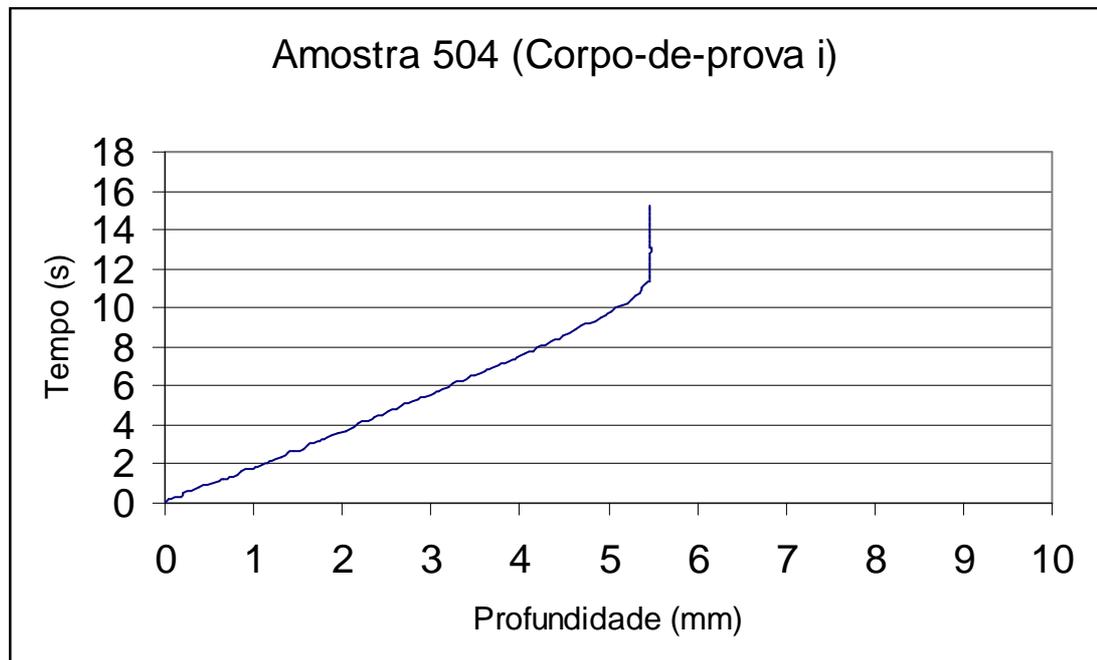


Figura 20- Gráfico profundidade X tempo do ensaio de dureza CERCHAR.

Assim, quando se observava o comportamento curvo da linha traçada no gráfico, resultante da diminuição da velocidade de perfuração da rocha, o ensaio era dado por

encerrado. O processo reiniciava-se, colocando uma nova broca no mandril da perfuratriz e um novo fragmento na morça.

Cada gráfico traçado apresenta uma porção linear no seu início, tornando-se curva na porção final. Para efeito do cálculo do índice de dureza deve ser considerada apenas a parte linear. Sobre esse trecho linear se traçou uma linha de prolongamento desde a origem até atingir a intersecção do eixo das profundidades do gráfico, no valor correspondente a dez milímetros (um centímetro). O valor correspondente, no eixo das ordenadas (tempo) a este ponto de intersecção encontrado, é o valor do índice de dureza CERCHAR de uma determinada amostra em questão. Matematicamente, o índice está relacionado a uma tangente e pode ser representada pela relação: $d = n$ (s/cm), onde:

d = índice de dureza CERCHAR;

n = tempo (obtido do segmento reto do gráfico, em segundos) que se leva para executar um furo com uma profundidade de um centímetro.

Como foram feitos dez ensaios para cada amostra, o valor do índice de cada uma delas foi obtido pela média dos dez ensaios.

Em termos de unidade e de significado físico para o ensaio, como se trabalha com a relação de tempo (dado em segundos) e de profundidade (dada em milímetros) a unidade física é dada por **s/mm**, ou, mais comumente em **s/cm**. Nos trabalhos originais produzidos pela equipe de engenheiros do CERCHAR é utilizada a denominação **pontos**, ao invés de s/cm. Assim uma rocha que apresenta um índice de dureza de 20s/cm é dito que ela possui uma dureza de 20 pontos CERCHAR.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas diversas análises e ensaios efetivados, procurando-se buscar o entendimento do comportamento da durabilidade, abrasividade e dureza das rochas da Formação Serra Geral. Inicialmente apresenta-se um resumo das análises petrográficas juntamente com as análises por difração de raios-X. Posteriormente, apresentam-se os resultados das análises e ensaios que envolvem elementos de caráter quantitativo.

4.1 Análises Petrográficas

Sob o ponto de vista descritivo, as análises petrográficas revelaram a presença de dois grupos de rochas. Um deles é formado por rochas de cor mais escura (cinza escura, marrom) em amostra de mão. Ao microscópio, a porção cristalina domina amplamente sobre a porção vítrea. A porção cristalina é formada por cristais de plagioclásio, piroxênio, mineral opaco e olivina, em proporções que variam de amostra para amostra. A porção de material vítreo, representando resíduos de cristalização, se localiza, normalmente, nos interstícios dos grãos minerais, formando a textura intersertal. A sua proporção é, no entanto, muito variável, podendo não existir em determinadas amostras (textura intergranular), ou então aparecendo sob a forma de bolsões e caracterizando a textura hialofítica. Eventualmente ocorrem, ainda, vesículas parcialmente preenchidas ou amígdalas, contendo argilo-minerais e zeólitas no seu interior. O grau de alteração, tanto dos minerais mas principalmente do vidro, é muito variado. A sua natureza, porém, é semelhante, conforme se pode depreender dos resultados de difração de raios-X de algumas amostras. O vidro mostra diferentes graus de recristalização. Essas nuances, mais a observação de pequenas distinções no tamanho médio dos cristais podem ser responsáveis pelas diferenças observadas nos resultados quantitativos do ensaio de sanidade. Esse grupo de rochas, dadas as suas características descritivas

se identifica com as descrições de basaltos toleíticos observadas na literatura (Willians, Turner & Gilbert, 1982) e engloba as amostras classificadas como basaltos.

O outro grupo é caracterizado pela predominância de material vítreo e agregados quartzo-feldspáticos sobre a parte cristalina da rocha. São rochas em geral de cores mais claras (cinza médio) e com a característica textura “carijó”, relacionada macroscopicamente à ocorrência de pequenas manchas de cor cinza mais escura, alternadas com pontuações cinza clara ou brancas. Ao nível microscópico as manchas se vinculam à presença de material vítreo (em diferentes graus de cristalização), enquanto que as pontuações cinza clara ou branca estão relacionadas a pequenos quartzo-feldspático. Imersos nesses dois materiais ocorrem, em menor proporção, cristais de plagioclásio, minerais opacos e, mais raramente, de piroxênios. O processo de corrosão desses cristais com a porção vítrea é nítido. Desse grupo de rochas fazem parte os tipos litológicos classificados como andesitos basálticos, andesitos e dacitos.

A divisão em dois grupos de rochas se mostrou em concordância com aquela adotada para a Formação Serra Geral (rochas vulcânicas básicas e intermediárias e rochas vulcânicas ácidas), conforme é mostrado de modo esquemático no Anexo I.

A Tabela 10 apresenta a relação das amostras ensaiadas com a respectiva classificação petrográfica obtida com a análise petrográfica e auxiliada pela determinação do teor de sílica (em algumas amostras).

Tabela 10 – Resultados das análises e ensaios executados.

Número da amostra	Classificação Petrográfica	Sanidade* ¹ (%)	Teor de sílica * ² (%)	Absorção de água (%)	Absorção de azul de metileno		Fator de minerais secundários (Rsm)	Perda ao fogo (%)	Degradação Washington (%)	Abrasividade CERCHAR (1/10)mm	Dureza CERCHAR (pontos)	Índice de resistência à carga pontual (MPa)
					mg/g	ml/g						
136	Dacito	1,7	72	3,2	2	0,4	24	2,72	nd	3,8	41	nd
654	Andesito basáltico	2,0	53	2,7	8	1,6	69	1,36	79	4,6	71	7,7
051	Dacito	2,1	71	2,0	5,5	1,1	50	1,46	68	3,8	44	8,9
651	Basalto	2,3	51	1,1	8	1,6	69	1,13	87	3,6	53	10,9
378	Dacito* ³	2,4	-	1,6	9	1,8	77	2,03	nd	4,7	100	nd
300	Dacito	2,5	70	2,4	13	2,6	107	2,46	88	3,9	46	8,8
104	Andesito basáltico	2,9	54	1,1	6	1,2	54	1,43	nd	3,7	62	8,2
684	Andesito basáltico	3,1	53	1,2	10,5	2,0	84	1,30	96	3,8	46	8,7
020	Basalto (diabásio?)	3,7	47	0,3	2	0,4	24	0,70	90	4,7	44	7,6
653	Basalto	4,4	51	2,1	10,5	2,0	84	1,57	77	3,0	26	10,3
485	Basalto	4,9	52	2,2	9	1,8	77	3,83	nd	3,1	34	nd
515	Basalto	5,2	51	1,4	8,5	1,7	73	1,34	78	3,1	31	8,1
266	Andesito	5,9	58	1,6	11	2,2	92	1,73	96	3,3	43	9,2
376	Basalto	5,9	47	1,4	10	2,0	84	1,89	nd	3,0	36	nd
251	Dacito	6,1	67	2,4	4	0,8	39	2,35	nd	4,4	50	9,6
011	Basalto	6,4	52	1,7	12	2,4	100	1,72	nd	3,6	44	nd
012	Dacito	6,5	65	2,0	9	1,8	77	1,29	96	3,3	49	7,9
545	Basalto	6,9	52	1,5	8	1,6	69	1,41	78	3,4	45	7,8

Tabela 10 – Resultados das análises e ensaios executados (cont.).

Número da amostra	Classificação petrográfico-química	Sanidade* ¹ (%)	Teor de sílica * ² (%)	Absorção de água (%)	Absorção de azul de metileno		Fator de minerais secundários (Rsm)	Perda ao fogo (%)	Degradação Washington (%)	Abrasividade CERCHAR (1/10mm)	Dureza CERCHAR (pontos)	Índice de resistência à carga pontual (MPa)
					mg/g	ml/g						
652	Basalto	7,0	52	1,8	11	2,2	92	2,08	81	2,7	23	8,0
010	Basalto	7,1	51	1,4	10	2,0	84	1,87	nd	4,0	51	7,2
008	Basalto	7,7	51	2,0	14,5	2,9	119	1,13	nd	2,9	46	8,2
634	Basalto* ³	8,1	-	4,0	14,5	2,9	119	5,19	42	2,6	31	5,3
504	Basalto* ³	15,5	-	3,7	20,5	4,1	164	5,14	43	2,0	21	5,0
483	Basalto	15,8	52	3,4	18,5	3,7	149	4,72	39	1,2	32	5,3
252	Andesito basáltico	19,8	53	5,6	16	3,2	130	5,05	nd	0,4	27	nd
009	Basalto	20,0	49	2,5	13	2,6	107	2,40	nd	1,0	38	6,9
390	Basalto	26,6	52	3,1	20	4,0	160	2,75	32	2,1	18	5,7

nd- não determinado

*¹- Perda ponderada total calculada utilizando a graduação B do CBUQ, da especificação do DAER (1991);

*²- Teor total em massa, corrigido para base seca isenta de H₂O e CO₂;

*³- Classificação dada por comparação com outras amostras estudadas.

Quando se iniciou o estudo petrográfico havia uma expectativa de que se pudesse identificar e descrever aspectos que indicassem as diferenças de ordem quantitativa encontradas nos resultados de perda do ensaio de sanidade. Mas esses aspectos só ficam realmente ressaltados quando se olha as lâminas tendo-se o conhecimento prévio do resultado de sanidade. Assim mesmo, o caráter descritivo da análise petrográfica não permite que as pequenas nuances responsáveis pelas diferenças naquela análise sejam registradas de uma maneira explícita utilizando o vocabulário usualmente empregado nas descrições.

Fazendo-se, então, um reexame das lâminas, à luz do conhecimento dos resultados do ensaio de sanidade observa-se, por exemplo, que todas as amostras classificadas como **dacitos** mostram perdas baixas (abaixo de 7,0%). São rochas com alto teor de sílica, com uma mineralogia mais quartzo-feldspática e possuem um caráter mais estável sob o ponto de vista de alteração. A quantidade apreciável de vidro vulcânico (recristalizado ou não) e uma relativa alta absorção de água não interferem na sua durabilidade, possivelmente pelo seu mais baixo grau de alteração e porque, juntamente com a porção quartzo-feldspática, o vidro forma uma estrutura muito resistente às forças exercidas pelos ciclos de cristalização-solubilização do sulfato de sódio.

A existência de algumas amostras de basalto com baixa perda no ensaio de sanidade se explica pelo baixo grau de alteração dos seus constituintes. A amostra n.º020, por exemplo, chama a atenção pelo fato de, apesar de apresentar um conteúdo apreciável (quase 20%) de olivina – um dos minerais mais prontamente alteráveis na escala de alterabilidade-, e com grande quantidade de fissuras intracristalinas, apresenta um bom comportamento diante do ensaio de sanidade. As amostras que apresentaram maiores perdas, além de serem todas de caráter básico ou intermediário, tiveram esse comportamento relacionado fundamentalmente aos processos e produtos de alteração mais intensos. O vidro recristalizado, além de presente intersticialmente, forma, às vezes, manchas por toda a rocha e, quase invariavelmente, se encontra alterado a argilo-minerais de cor verde (do grupo das esmectitas, conforme indica os resultados de difração de raios-X). Como elemento agregador ao potencial de alterabilidade dessas rochas aparecem amígdalas de tamanhos variados, preenchidas muitas vezes por argilo-minerais. Essas amígdalas, apesar de algumas serem microscópicas, formam interconexões com o material vítreo, já alterado, produzindo zonas de fraqueza importantes na rocha e levando a um fraco desempenho diante do ensaio de sanidade. Assim, a proporção e, principalmente, a forma de ocorrência dos produtos de alteração, é que norteiam o comportamento de basaltos e andesitos basálticos diante desse ensaio. Porém, a natureza

descritiva da análise petrográfica dificulta a distinção entre os diferentes tipos litológicos representados pelas amostras estudadas.

Resumidamente, a análise petrográfica se mostra uma ferramenta de apoio ao estudo da durabilidade, porém seu contexto descritivo precisa ser analisado em conjunto com elementos de caráter quantitativo para se revelar como um dado com algum significado prático.

4.2- Análise dos Difratogramas de Raios-X

O Anexo II apresenta os difratogramas obtidos com a análise por difração de raios-X. Como o interesse era a identificação dos grupos de argilo-minerais presentes nas amostras, a varredura do ângulo 2θ ficou restrita à faixa de 2 a 35° . Conforme já exposto, foram obtidos difratogramas somente da fração argila, com amostras orientadas e nas condições natural (difratograma traçado em verde), glicolada (preto) e calcinada a 500°C por duas horas (vermelho). Os três picos situados mais à esquerda em cada um dos difratogramas foram interpretados como indicativos dos argilo-minerais do grupo das esmectitas (argilas expansivas). Embora os valores de “d” (distância interplanar) tenham sido variáveis de amostra para amostra -possivelmente relacionado às diferentes espécies presentes-, a sua localização está sem dúvida relacionado à presença desse grupo de argilo-minerais. As amostras n.º300 e 652 indicaram também a presença de argilo-minerais do grupo da caulinita (caulinita propriamente dita e halloysita), mas proporcionalmente em bem menor quantidade do que as esmectitas. Já a amostra n.º020, mostrou a quase ausência de argilo-minerais. Os picos encontrados no difratograma dessa amostra foram relacionados à presença de vermiculita e caulinita.

Os demais picos presentes mais ao centro e à direita dos difratogramas foram interpretados como sendo de diferentes tipos de feldspatos (tanto feldspato alcalino como plagioclásio), constituintes comuns na fração argila dos tipos litológicos estudados, associados ou não ao quartzo.

Uma importante conclusão fornecida pelos difratogramas foi a constatação de argilas expansivas (esmectitas) nas amostras n.º300 e 136, por exemplo, e que apresentaram ao mesmo tempo perdas baixas no ensaio de sanidade. Isto corrobora o fato de que somente a

presença de argilo-minerais expansivos não é condição crítica para o desempenho da rocha diante desse ensaio.

4.3 Análise de Resultados Quantitativos

Para a apresentação dos resultados quantitativos utilizou-se uma seqüência de gráficos que relacionaram a durabilidade, abrasividade e dureza com as demais análises e ensaios feitos.

A ausência de repetibilidade de alguns ensaios faz com que se examine as correlações obtidas apenas de forma a demonstrar tendências mais do que indicar resultados estatisticamente bem definidos. De qualquer modo, para as correlações que mostraram coeficientes acima de 50%, apresentou-se o tipo bem como a equação de correlação que vincula as variáveis em questão.

4.3.1- Durabilidade

Absorção de água X Sanidade

A absorção de água pode ser uma característica de previsibilidade para a avaliação da durabilidade, já que à medida que as rochas se alteram há um aumento de espaços vazios e, conseqüentemente na capacidade de absorver água. Essa relação, no entanto, mostra-se válida quando se trata da mesma rocha (mesmo tipo litológico) e considerando a análise sobre uma determinada seqüência (perfil) de alteração dessa rocha. Mas, à medida que se compara tipos litológicos diferentes (mesmo que tenham uma gênese comum), observa-se que a absorção de água não é mais correlacionável com a durabilidade. Assim, conforme mostra a Figura 21, a dispersão aleatória de pontos mostra a falta de correlação entre os valores de absorção e as perdas do ensaio de sanidade. Algumas amostras que possuem baixa perda (1,7%) no ensaio de sanidade apresentem altos valores de absorção de água (3,2%), e amostras com alta perda no sanidade (20,0%) possuem relativamente baixo valor de absorção (2,5%). Essa constatação é particularmente válida para as rochas classificadas como dacitos, onde a existência apreciável de vazios (ampliado pela presença eventual de vesículas), não indica um estado de fraqueza da rocha diante do ensaio de sanidade.

Mesmo desconsiderando-se os dois pontos (amostras n° 009 e 390) mais distantes da linha de regressão traçada em vermelho o coeficiente de correlação se mostra baixo (cerca de 54 %).

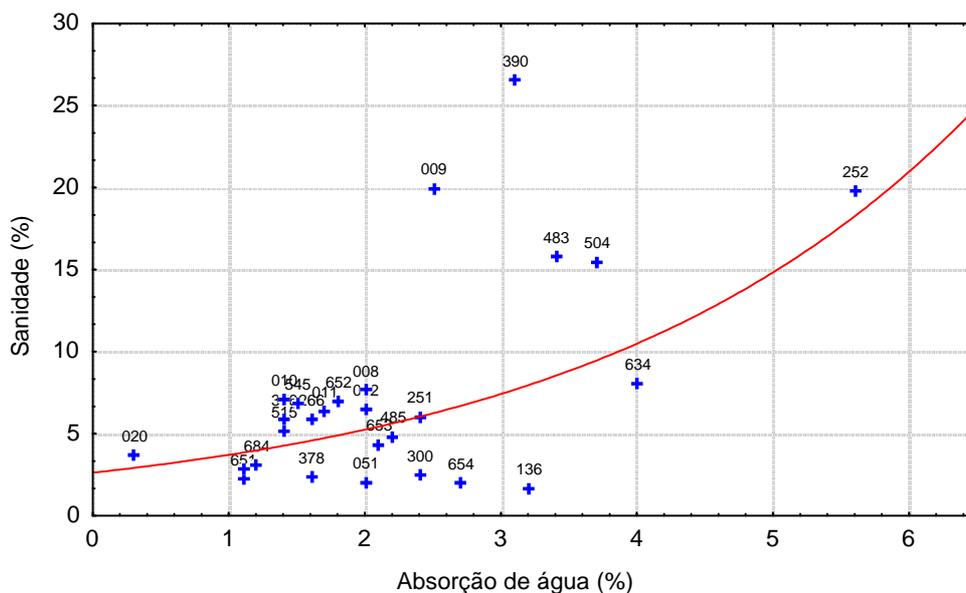


Figura 21- Gráfico de dispersão Absorção de água X Sanidade.

Perda ao Fogo X Sanidade

Conforme se observa na Figura 22 o relacionamento do ensaio de perda ao fogo com a perda do ensaio de sanidade, também, não mostra uma correlação aparente. Isso induz à conclusão de que a proporção de minerais hidroxilados e com água na estrutura (basicamente a presença de argilo-minerais, no caso das amostras estudadas) presentes não é um elemento definidor do seu comportamento. A mera quantificação dos argilo-minerais presentes em uma rocha (tarefa nem sempre fácil também) não é condição para se avaliar seu comportamento diante do ensaio de sanidade, pois, fundamentalmente, o que deve ser considerado para isso é a presença (proporção e distribuição) somente de argilas expansivas, que são, em última análise, as responsáveis pela degradação da rocha.

Da mesma forma que o observado para o gráfico de dispersão de absorção de água (Figura 21), a retirada dos dois pontos mais distantes da linha de regressão (mostrada em vermelho) aponta para um coeficiente de correlação baixo (47%).

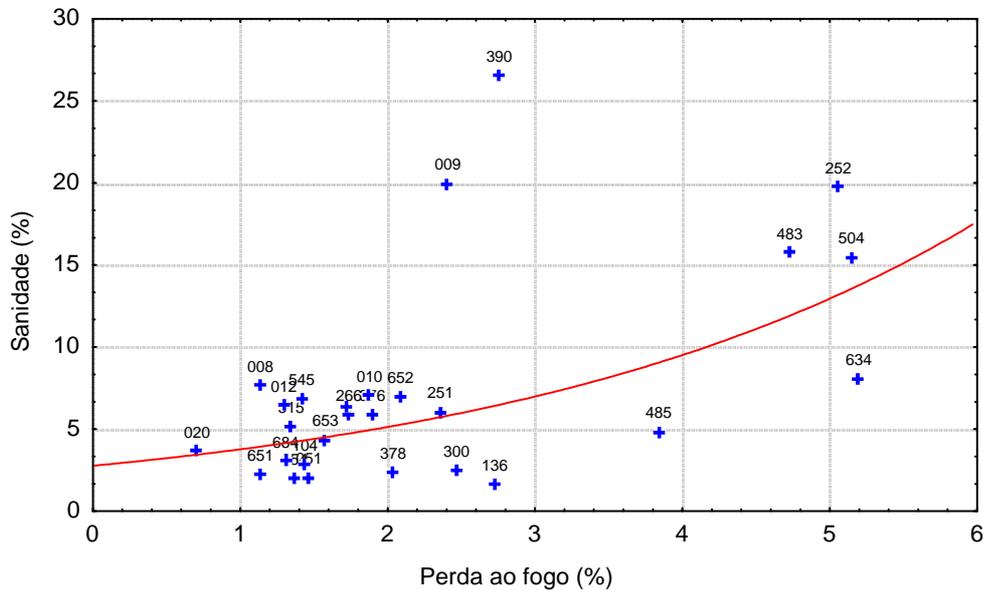


Figura 22- Gráfico de dispersão Perda ao fogo X Sanidade.

Fator de Minerais Secundários (Rsm) X Sanidade

A Figura 23 mostra a distribuição dos pontos dos valores calculados do **fator de minerais secundários** com os dados de perda do ensaio de **sanidade**. Apesar de haver pontos algo distantes da curva traçada em vermelho observa-se uma correlação entre eles, do tipo exponencial, com um coeficiente de correlação de 70% e uma equação dada por: $y = 1,39 e^{0,016x}$ ($x =$ Fator de minerais secundários e $y =$ sanidade). Mesmo que obtido de forma indireta (calculado a partir da determinação da absorção de azul de metileno), o fator de minerais secundários mostra-se um elemento útil na previsão do comportamento de amostras diante do ensaio de sanidade. A exceção (pontos mais distantes da curva) ocorre, possivelmente, para aquelas amostras onde o aspecto textural da rocha é um fator mais decisivo na determinação da durabilidade do que a combinação do tipo e proporção de argilo-minerais presentes.

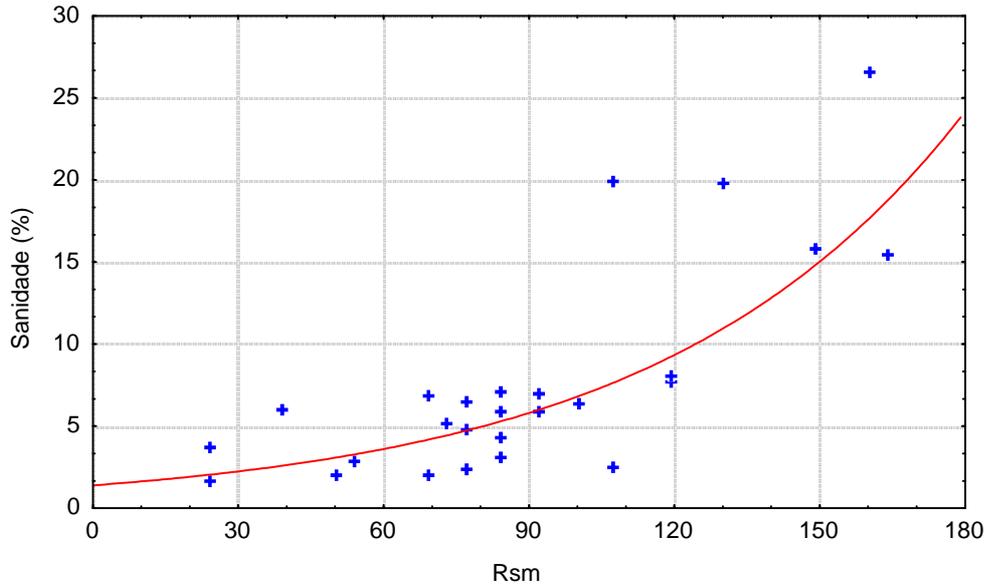


Figura 23- Gráfico de dispersão Fator Rsm X Sanidade.

Índice de Resistência à Carga Pontual $Is_{(50)}$ X Sanidade

A Figura 24 mostra que há uma boa correlação entre esses dois ensaios (correlação do tipo exponencial negativa, com coeficiente de 71%). Para valores de perda na sanidade próximos a 10% (limite de aceitação de algumas especificações) a carga pontual diminui sensivelmente para valores abaixo de 7MPa. A equação que traduz a correlação desses dois ensaios é dada por: $y = 76 e^{(-0,3x)}$, onde $x = Is(50)$ e $y =$ sanidade.

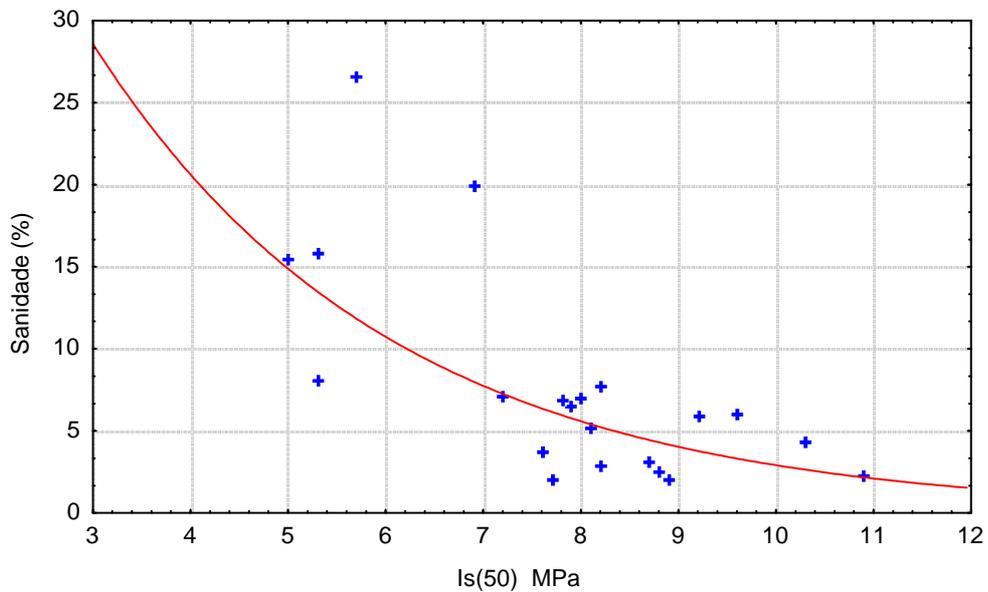
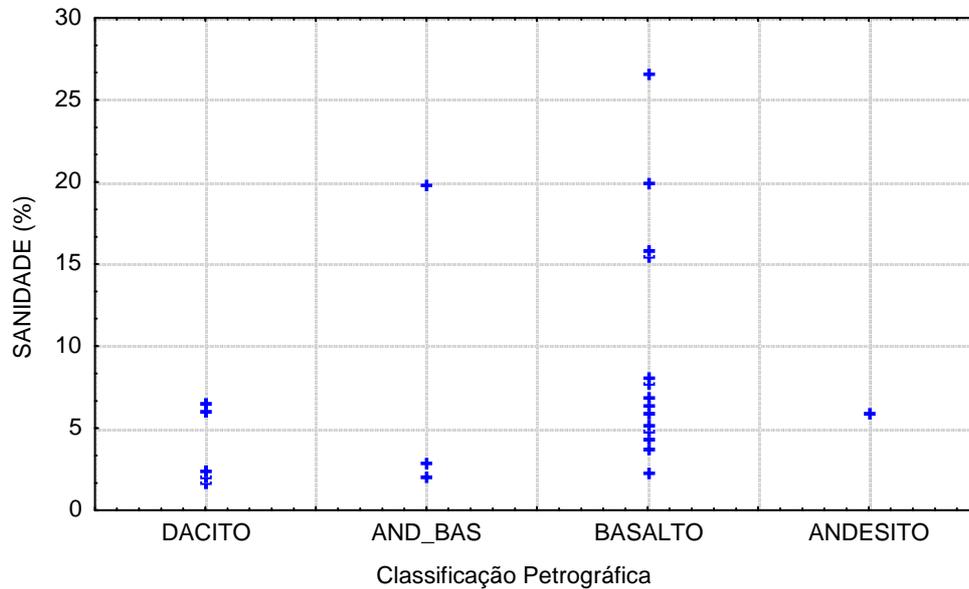


Figura 24- Gráfico de dispersão $Is(50)$ X Sanidade.
Classificação Petrográfica X Sanidade

O gráfico da Figura 25 mostra que, embora algumas amostras de andesito-basáltico, basalto e andesito, mostrem perdas baixas (abaixo de 10%) no ensaio de sanidade, somente as amostras classificadas como dacito é que apresentam sempre uma perda abaixo desse valor.

Figura 25- Gráfico de dispersão Classificação petrográfica X Sanidade.



Degradação do Estado de Washington

Mesmo não tendo sido executado rigorosamente segundo sua norma de ensaio e com um número menor de dados para analisar, fez-se o relacionamento desse ensaio com os demais, de maneira semelhante à mostrada para o ensaio de sanidade. Os resultados mostraram uma correlação do tipo linear (Figuras 26 e 27) com os valores de absorção de água e perda ao fogo, mostrando que o ensaio de degradação Washington é sensível a mudanças nos valores de absorção de água e à presença de materiais hidroxilados e hidratados nas rochas. Esse comportamento está algo condizente com a forma executiva do ensaio Washington, embora se tenha visto, no caso do ensaio de sanidade, que um aumento na absorção de água não está vinculado diretamente à resposta da durabilidade da rocha. A equação para o gráfico com absorção de água é: $y = 100 - 17x$ ($x =$ absorção e $y =$ Washington), com 80% de correlação, e $y = 100 - 12x$ ($x =$ perda ao fogo e $y =$ Washington), com 81% de correlação, para com os resultados da perda ao fogo.

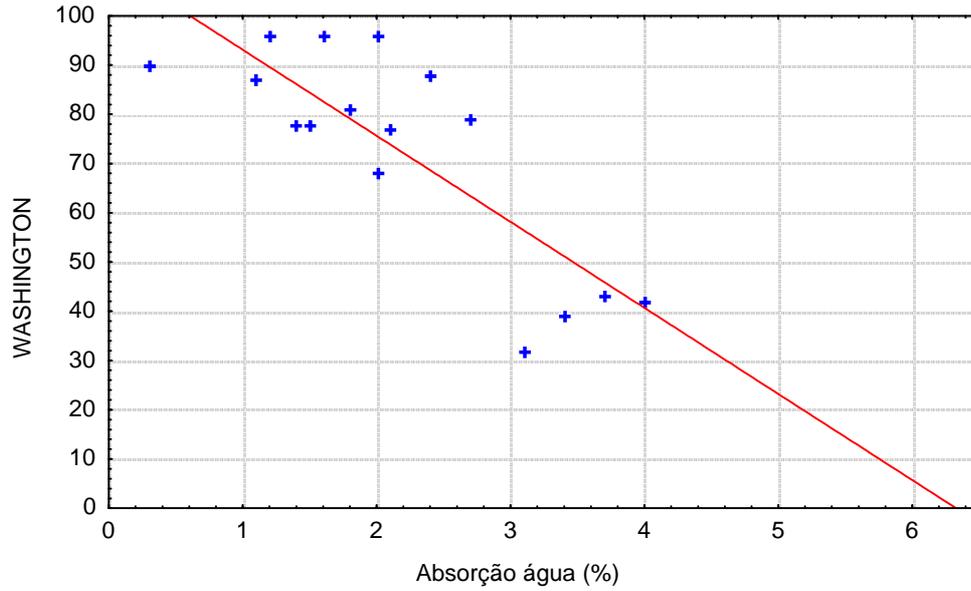


Figura 26- Gráfico de dispersão Absorção de água X Degradação Washington.

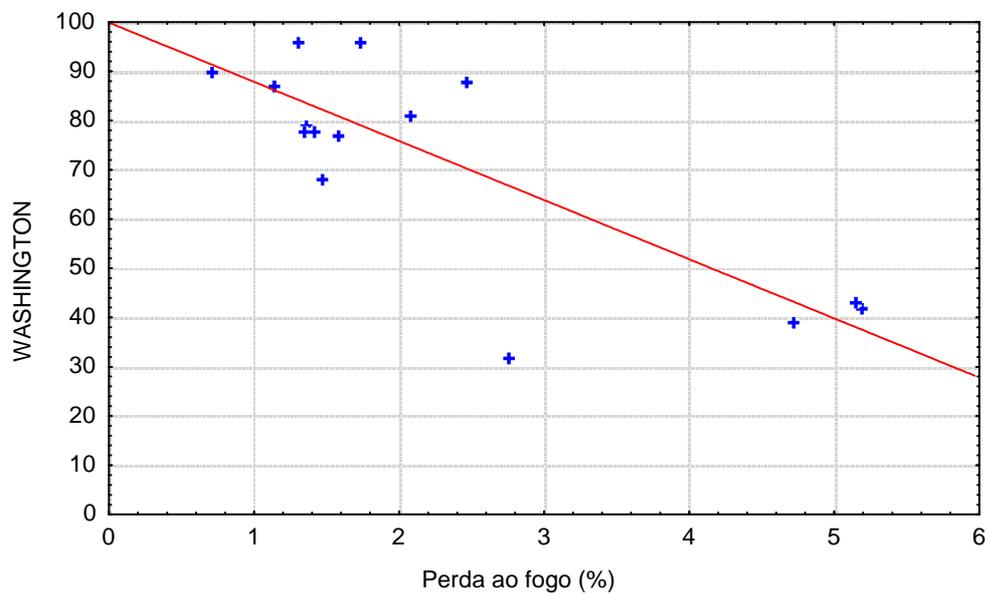


Figura 27- Gráfico de dispersão Perda ao fogo X Degradação Washington.

Com as demais análises e ensaios não foi observado nenhum tipo de correlação.

4.3.2 Abrasividade CERCHAR

A Tabela 11 apresenta um resumo dos dados estatísticos obtidos a partir do ensaio de cada tipo litológico estudado. Os valores de média e mediana se mostraram muito próximos entre si (distribuição normal para os resultados) e os desvios-padrão e erro padrão da média se mostraram relativamente baixos, apesar de que em algumas amostras houve uma variação apreciável entre o valor mínimo e máximo encontrado.

Tabela 11- Resultados do ensaio de abrasividade CERCHAR.

Número da amostra	Média (1/10mm)	Mediana (1/10mm)	Mínimo (1/10mm)	Máximo (1/10mm)	Desvio padrão (1/10mm)
252	0,4	0,3	0,1	0,8	0,2
009	1,0	0,9	0,6	1,3	0,3
483	1,2	1,0	0,4	2,2	0,7
504	2,0	2,0	1,3	2,4	0,4
390	2,1	2,3	1,3	3,0	0,7
652	2,7	2,7	1,5	4,1	0,8
008	2,9	2,8	2,2	3,3	0,3
653	3,0	2,9	1,7	3,9	0,7
485	3,1	3,0	2,4	3,9	0,5
376	3,0	3,1	2,8	3,3	0,1
266	3,3	3,2	2,6	4,4	0,5
515	3,1	3,2	2,6	3,7	0,3
012	3,3	3,3	3,1	3,7	0,2
011	3,4	3,4	2,4	4,8	0,6
651	3,6	3,6	3,1	4,1	0,4
545	3,4	3,6	2,4	4,1	0,6
136	3,8	3,7	3,5	4,4	0,3
104	3,7	3,8	2,8	4,2	0,4
051	3,8	3,8	3,3	4,2	0,4
010	4,0	3,8	3,3	4,8	0,5
300	3,9	3,9	3,3	4,8	0,5
684	3,8	4,0	2,8	4,4	0,6
251	4,4	4,3	4,1	5,0	0,3
378	4,7	4,5	3,9	5,7	0,6
020	4,7	4,5	4,1	5,9	0,7
654	4,6	4,7	3,8	5,9	0,6

Os resultados mostram que o índice de abrasividade apresenta uma variabilidade bastante expressiva dentro das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, indo desde valores relativamente muitos baixos, como 0,3, da amostra n.º252, até 4,7 (amostra n.º654). A Figura 28 mostra a distribuição dos valores médios (mediana) e dispersão (percentis de 25 e 75%) em função da classificação petrográfica dos tipos litológicos. Observa-se que as amostras classificadas como dacito e andesito basáltico são as rochas mais abrasivas do que os basaltos e andesitos. Comparativamente com outras rochas (granito e basalto) apresentadas na literatura (West, 1989), as rochas estudadas apresentam, em sua maioria, índices de abrasividade inferior, sendo que as mais abrasivas se comparam com os basaltos e andesitos apresentados pelo referido autor.

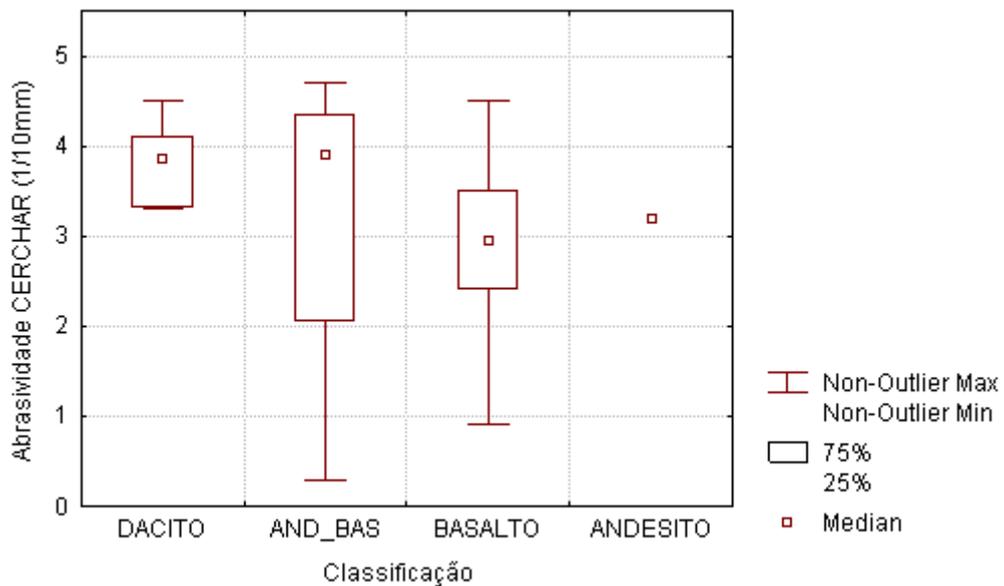


Figura 28- Distribuição dos resultados de abrasividade CERCHAR em função da classificação petrográfica.

Visando verificar possíveis correlações entre o índice de abrasividade CERCHAR e outros ensaios, foram feitos gráficos de dispersão entre esse índice e os resultados obtidos para a absorção de água, teor de sílica, perda ao fogo e sanidade (Figuras 29 a 32). Para os valores de absorção de água não há uma indicação significativa de correlação, mostrando com isso que o puro aumento de vazios não caracteriza uma rocha menos abrasiva.

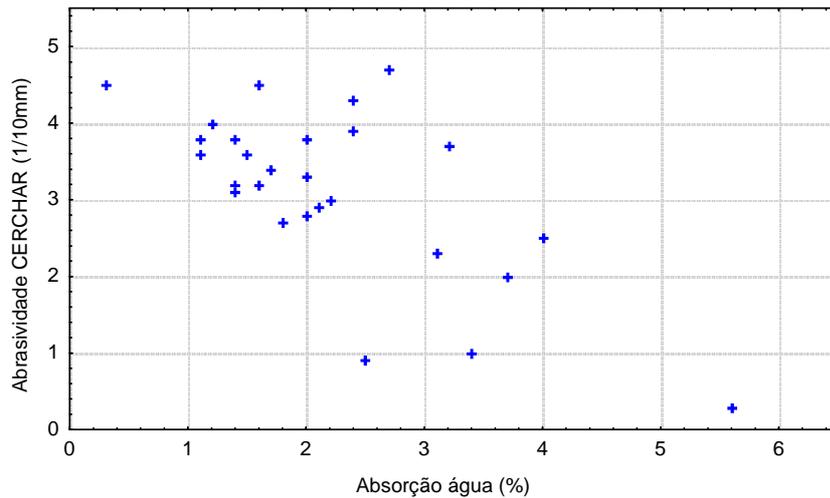


Figura 29- Gráfico de dispersão Absorção de água X Abrasividade CERCHAR

Para o teor de sílica (Figura 30) a falta de correlação é mais evidente ainda. A justificativa nesse caso parece estar ligada ao fato de que, embora se tenha como premissa de que o aumento do teor de sílica de uma rocha esteja vinculado ao aumento da sua abrasividade, quando se tem um mecanismo de alteração superimposto (como é o caso) e que gera materiais menos abrasivos (basicamente argilo-minerais) sem, contudo, retirar a sílica do sistema, a relação entre teor de sílica e a abrasividade fica comprometida e deixa de ser correlacionável.

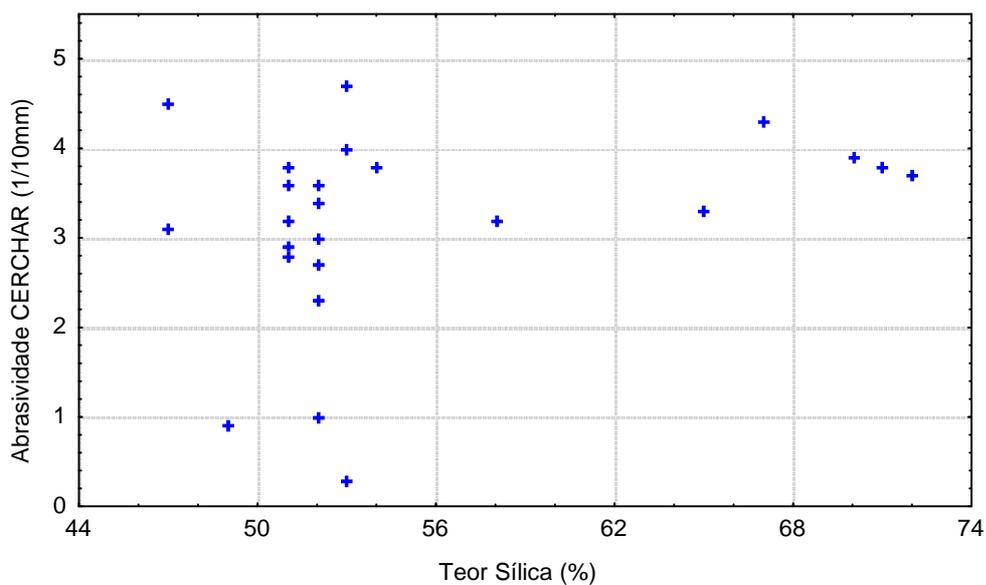


Figura 30- Gráfico de dispersão Teor de sílica X Abrasividade CERCHAR.

O gráfico perda ao fogo X abrasividade (Figura 31) mostra uma relação linear negativa (coeficiente de correlação de 67%), indicando que a abrasividade é influenciada pela proporção de minerais menos abrasivos (argilo-minerais) presentes na rocha. A equação de correlação é dada por: $y = 4,42 - 0,56x$, onde x = perda ao fogo e y = abrasividade.

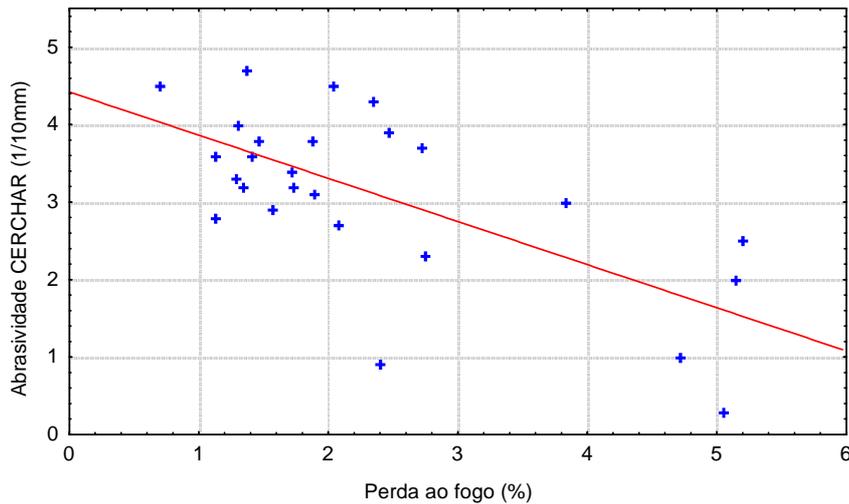


Figura 31 – Gráfico de dispersão Perda ao fogo X Abrasividade CERCHAR

De igual maneira o gráfico sanidade X abrasividade mostra uma correlação (exponencial negativa, com coeficiente de correlação de 85%), indicando que os mesmos aspectos mineralógicos e texturais que afetam o grau de sanidade (alteração) também concorrem para a abrasividade da rocha.

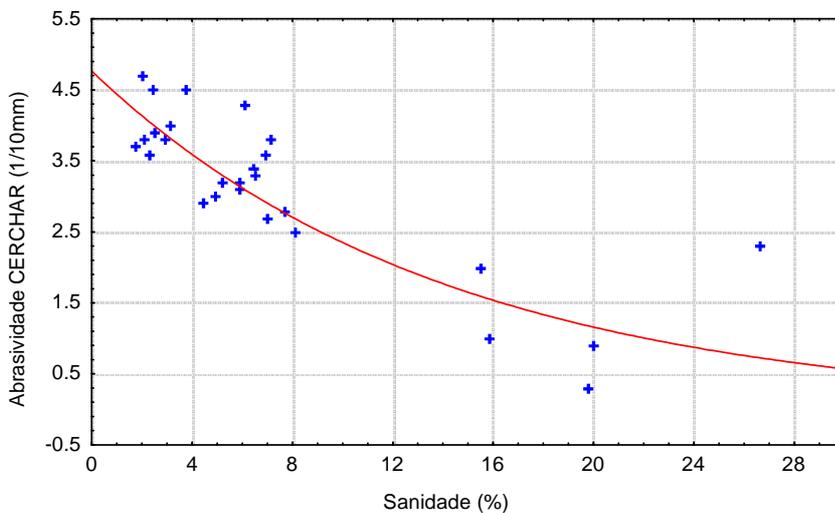


Figura 32 – Gráfico de dispersão Sanidade X Abrasividade CERCHAR (1/10mm)

A equação que define esta correlação é dada por: $y = 4,76 e^{(-0,071x)}$, em que $x =$ sanidade e $y =$ abrasividade.

4.3.3 Dureza CERCHAR

A Tabela 12 traz um resumo estatístico dos resultados obtidos do ensaio de dureza CERCHAR feito sobre as amostras estudadas.

Tabela 12- Resultados do ensaio de dureza CERCHAR.

Número da amostra	Média *	Mediana *	Mínimo *	Máximo *	Desvio padrão*
390	19	18	13	27	4,9
504	22	21	17	26	2,9
652	25	23	18	37	6,3
653	27	26	19	41	7,6
252	28	27	13	49	10,3
515	30	31	22	41	4,7
634	34	31	18	56	14,5
483	30	32	16	44	11,1
485	37	34	17	64	14,4
376	36	36	22	47	7,5
009	37	38	26	45	6,7
136	48	41	21	87	21,9
266	53	43	30	100	23,0
051	46	44	33	66	12,0
011	47	44	34	65	9,9
020	48	44	16	82	22,2
545	45	45	32	54	7,4
684	43	46	21	57	14,7
008	47	46	28	70	12,5
300	49	46	38	67	11,4
012	47	49	30	55	8,3
251	53	50	24	100	23,1
010	53	51	38	70	12,3
651	59	53	48	83	11,8
104	68	62	45	100	18,5
654	69	71	25	100	30,5
378	100	100	100	100	0,0

* unidade = pontos CERCHAR

Os dados apresentados mostram que há uma variação da dureza CERCHAR entre os diversos tipos litológicos ensaiados. As diferenças entre os valores mínimos e máximos, para a maioria das amostras, refletem-se em valores relativamente altos de desvio padrão, indicando que esse índice apresenta uma heterogeneidade (dispersão) alta nos seus resultados. De qualquer modo é possível fazer algumas inferências sobre os resultados obtidos. A Figura 33 mostra o comportamento do índice em relação à classificação petrográfica. Embora não haja uma distinção saliente é possível apontar que os tipos classificados como andesito-basáltico e dacito possuem uma tendência a apresentar índices de dureza mais elevados, o que coincide com a presença de uma textura mais “fechada” dessas rochas.

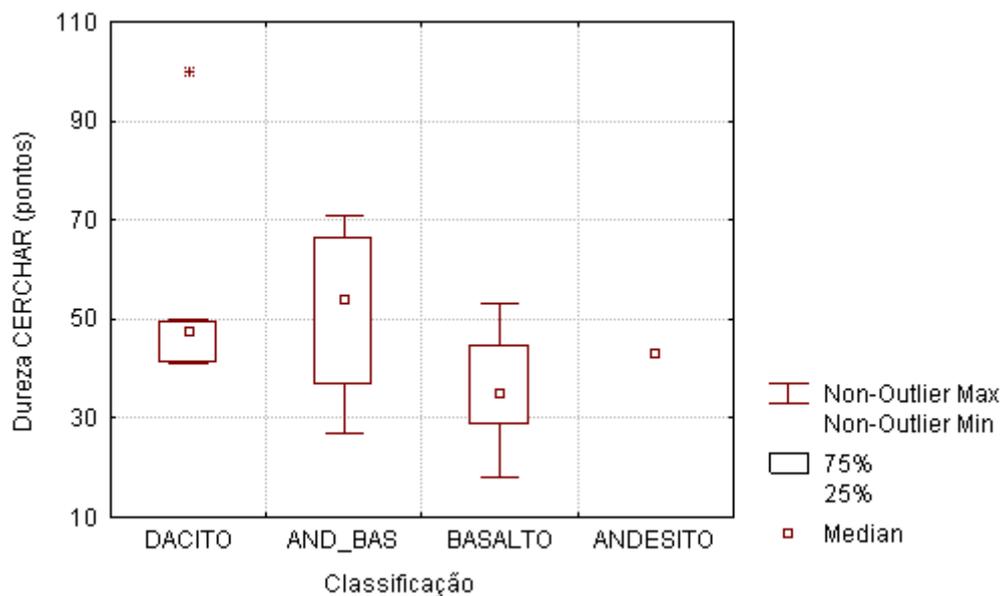


Figura 33- - Distribuição dos resultados de dureza CERCHAR em função da classificação petrográfica.

Com o mesmo intuito do ensaio de abrasividade, construiu-se gráficos de dispersão entre os resultados do índice de dureza e alguns outros ensaios. As Figuras 34 a 36 ilustram o relacionamento com os valores de absorção de água, teor de sílica e índice de carga pontual. A dispersão dos dados mostrou que não há nenhum tipo de correlação envolvendo essas três características. A falta de correlação pode estar salientando a natureza dispersiva apresentada

pelos resultados do ensaio de dureza, ou então que esses ensaios não são realmente correlacionáveis.

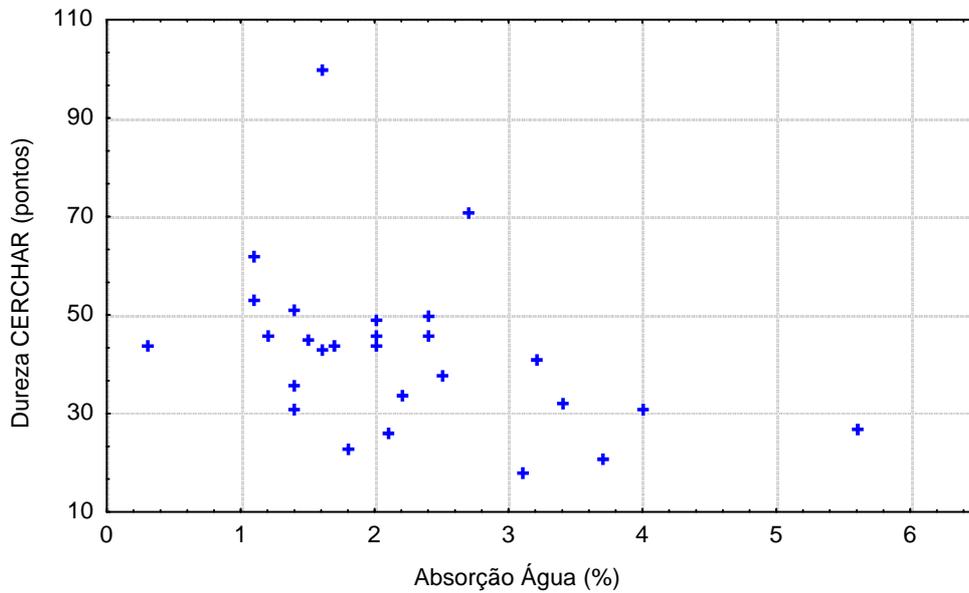


Figura 34- Gráfico de dispersão Absorção de água X Dureza CERCHAR.

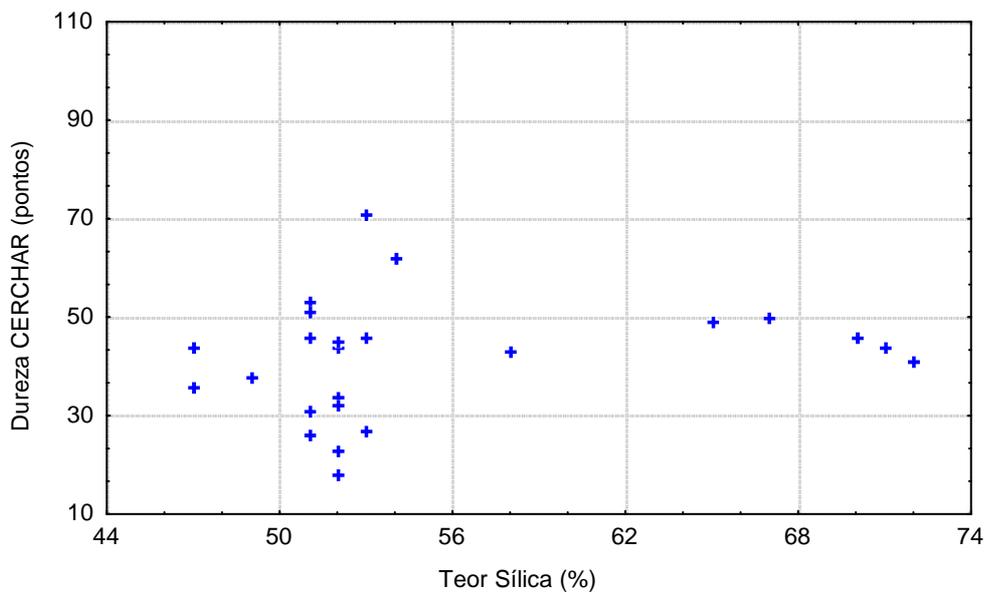


Figura 35- Gráfico de dispersão Teor de sílica X Dureza CERCHAR.

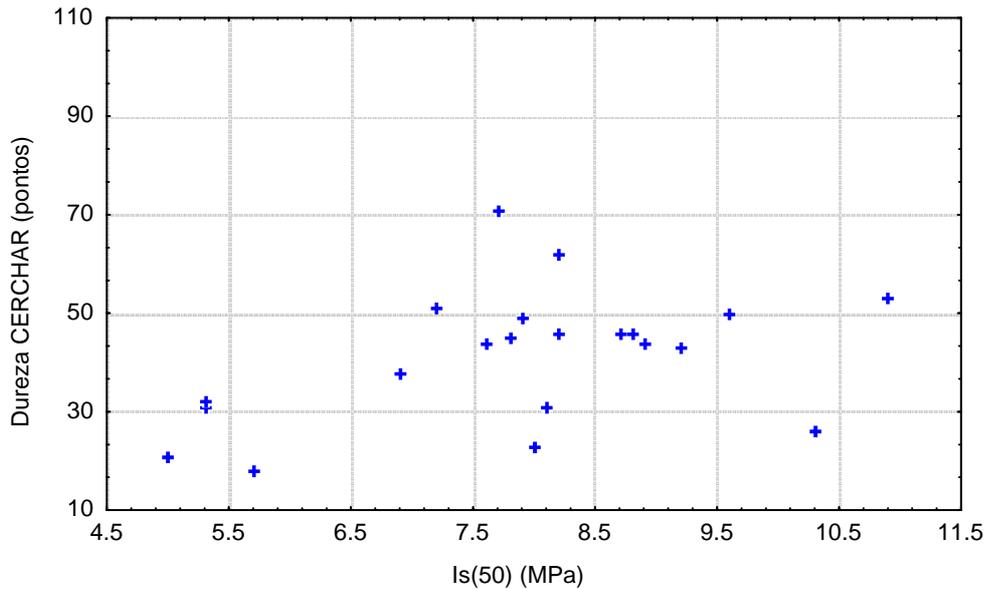


Figura 36- Gráfico de dispersão Is(50) X Dureza CERCHAR.

Com os ensaios que se relacionam mais diretamente com o grau de alteração da rocha os gráficos de perda ao fogo (Figura 37) e sanidade (Figura 38) mostram uma correlação (exponencial negativa e coeficientes de correlação de 71% e 76%, respectivamente), indicando que a dureza CERCHAR também reflete o estado de alteração das rochas (proporção de argilo-minerais e a resistência da trama textural). As equações de correlação são $y = 55,5 e^{(-0,14x)}$, onde x = perda ao fogo e y = dureza, para com o ensaio de perda ao fogo, e $y = 52,75 e^{(-0,037x)}$, onde x = sanidade e y = dureza, para o ensaio de sanidade.

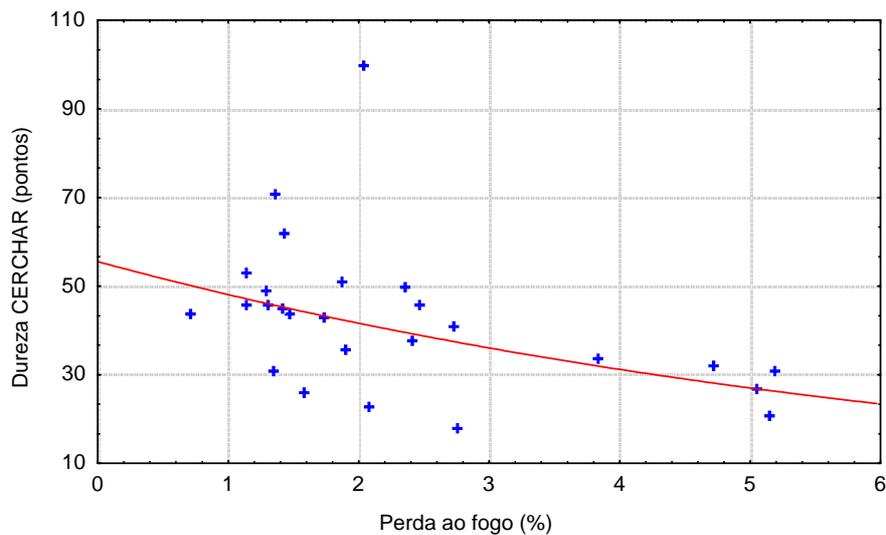


Figura 37- Gráfico de dispersão Perda ao fogo X Dureza CERCHAR.

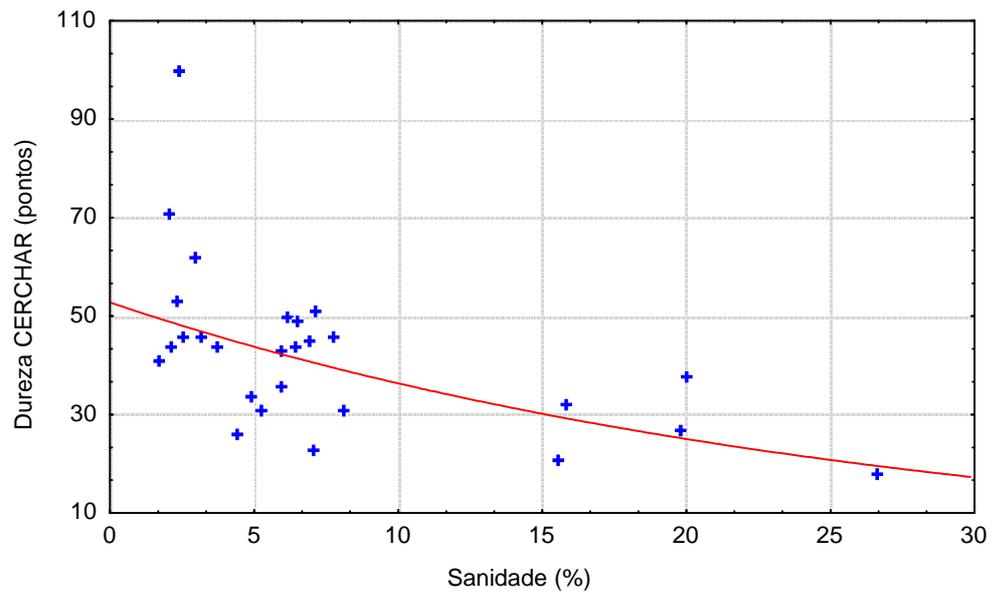


Figura 38- Gráfico de dispersão Sanidade X Dureza CERCHAR

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Análise Petrográfica e Difração de Raios-X

A análise petrográfica se mostrou uma ferramenta apenas de caráter complementar no levantamento de aspectos das rochas que, em conjunto, são os responsáveis pelo comportamento tecnológico das mesmas. Ela deve se deter basicamente sobre aqueles elementos (textura, tipo e estado de alteração) que são os definidores do desempenho da rocha, e precisam ter sua avaliação sempre vinculada ao conhecimento do resultado de outros ensaios. Além disso, é importante que tenha o suporte técnico de técnicas mais precisas no reconhecimento de certos minerais (argilo-minerais), por meio da difração de raios-X. Do contrário a análise petrográfica perde sua função no contexto da caracterização de rochas.

A obtenção de parâmetros quantitativos como o Fator de Minerais Secundários, embora de difícil obtenção por meio de forma direta, deve ser buscado indiretamente para dar a análise petrográfica um elemento numérico palpável, útil para o técnico que a está analisando.

Uma importante conclusão obtida por meio da análise petrográfica, entretanto, foi a de constatar-se que a gênese dos produtos de alteração (principalmente dos argilo-minerais expansivos) está ligada às próprias condições de formação (origem hidrotermal) das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Assim, mesmo que se esteja trabalhando com materiais localizados fora da zona de alteração por intemperismo, é preciso considerar que os mesmos podem apresentar produtos de alteração que poderão comprometer a durabilidade da rocha. Dentro das condições geológicas de formação dessas rochas é possível que cada derrame apresente um grau de alteração distinto, ou ainda que a alteração se apresente com intensidades variáveis até mesmo dentro de um único derrame.

5.2 Durabilidade

1) Os ensaios de absorção de água e perda ao fogo, apesar de serem ensaios de simples e rápida execução, não revelaram serem bons indicadores para a avaliação da durabilidade, considerando essa determinada pelo ensaio de sanidade. Já, tomando-se o ensaio de degradação Washington esses mostraram uma correlação bastante aceitável, sendo

inversamente proporcionais. Esse fato mostra que os ensaios de sanidade e degradação Washington têm mecanismos de atuação diferentes sobre as rochas.

2) O índice de resistência à carga pontual se mostrou sensível a mudanças da durabilidade determinada pelo ensaio de sanidade, mas não mostrou nenhuma correlação com a degradação Washington.

3) O ensaio de absorção de azul de metileno e o correspondente cálculo do fator de minerais secundários (Rsm) mostraram uma boa correlação com o ensaio de sanidade. Tendo em vista a rapidez de execução (podem ser feitos pelo menos quatro a cinco ensaios diariamente), a absorção de azul de metileno se mostra um ensaio adequado para se fazer verificações imediatas em frentes de pedreira que estivesse com suspeitas de modificações de suas características de durabilidade, sem a necessidade de se esperar resultados mais demorados como o de sanidade. A falta de correlação com o ensaio de degradação Washington mostra que esse ensaio não é sensível a presença específica de argilas expansivas. Assim, como as argilas expansivas são elementos de fundamental influência no comportamento da durabilidade, resulta que o ensaio Washington não pode ser o único ensaio definidor da durabilidade de uma rocha.

O ensaio de sanidade tem sido alvo de críticas, particularmente quando se avalia a sua representatividade como forma de determinar a durabilidade de materiais rochosos, diante das condições climáticas (clima subtropical a temperado) à que as rochas estão submetidas em regiões como a do Estado do Rio Grande do Sul. De fato, se nos reportarmos às origens desse ensaio, vê-se que ele foi introduzido para a verificação da durabilidade para locais onde há a atuação de gelo e degelo (precipitação de neve e congelamento do terreno) ou de cristalização de sais (zonas de clima árido), o que distoa da realidade do clima encontrado na maior parte do estado (e do Brasil). Para se ter uma noção do efeito destruidor das diferentes condições intempéricas simuladas por alguns ensaios, reproduz-se a seguir a tabela publicada por Fookes, Gourley & Ohikere (1988.) onde se compara as forças exercidas sobre as rochas expostas a diferentes ambientes climáticos.

Processo (físico) atuante	Pressão aplicada à rocha (MPa)
Congelamento (máximo de -20°C)	200
Cristalização de sais	2 – 20
Hidratação de sais	100
Expansão de argilas	2

Em termos numéricos, um processo de gelo e degelo (congelamento) exerce uma pressão sobre os constituintes da rocha cerca de 100 vezes superior ao processo de expansão de argilas, enquanto que o processo de cristalização de sais pode atingir até 10 vezes mais do que dessas últimas. Ao se adotar ensaios concebidos para simular ações tipo gelo-degelo, cristalização de sais, ou para avaliar a durabilidade de materiais rochosos expostos a condições menos rigorosas de intempérie, estamos exigindo da rocha resistência dezenas ou até centenas de vezes superior. Portanto, o emprego do ensaio de sanidade está exigindo dessas rochas um comportamento muito acima do encontrado no seu futuro ambiente de uso, levando, por conseguinte, a inviabilização do uso de certos materiais que, de outra forma, poderiam ser aproveitados, sem prejuízo para a vida da obra de engenharia.

Por sua vez o ensaio de degradação Washington, preconizado como um ensaio mais adequado para a avaliação da durabilidade por estar mais em acordo com as reais solicitações a que os materiais rochosos serão submetidos, não avalia o efeito causado pelos ciclos de umedecimento e secagem (expansibilidade) e que certamente exercem um papel fundamental na sua durabilidade. Dessa forma, a utilização somente do ensaio de degradação Washington estaria, de uma certa maneira, sub-avaliando o desempenho dos materiais rochosos.

Para o autor, a metodologia de avaliação que melhor representaria a verdadeira condição de ataque nessas rochas seria, primeiramente, o de submetê-las a um ensaio de ciclagem artificial do tipo água-estufa, onde se dariam condições para que a presença eventual de argilas expansivas pudesse atuar em um processo de enfraquecimento inicial, para, posteriormente, ser submetida a um desgaste mecânico através, então, da aplicação do ensaio de degradação Washington. Embora esses dois procedimentos, no seu conjunto, não sejam de rápida execução, estão entre os ensaios de mais fácil execução e atendem melhor as condições

de deterioração à que as rochas ficam submetidas. O seu emprego poderá, inclusive, viabilizar pedreiras hoje condenadas pelo ensaio de sanidade.

A utilização rotineira desse tipo de caracterização exigirá que se façam testes e monitoramento de trechos experimentais com o uso de materiais assim especificados, até que se adquira conhecimento suficiente para substituir ensaios tão tradicionalmente e conservadoramente enraizados dentro do meio técnico. Por isso, sugere-se, como trabalhos complementares ao estudo, testes práticos (trechos experimentais de pavimentos), utilizando como critério para a avaliação da durabilidade do agregado utilizado a combinação do ensaio de ciclagem água-estufa (pelo menos dez ciclos), associado ao desgaste Washington.

5.3 Abrasividade CERCHAR

Os resultados encontrados para o índice de abrasividade CERCHAR mostraram que há uma variabilidade (relativa) no comportamento abrasivo das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, com conseqüentes reflexos tanto no desgaste quanto na performance de ferramentas e equipamentos empregados no desmonte, britagem ou qualquer outra interação destes com rochas desta unidade geológica. Considerando os valores extremos mais baixos e mais altos a variação relativa chega à cerca de treze vezes. Os valores das medianas das rochas classificadas como dacito e andesito basáltico se situam quase uma unidade acima das medianas dos basaltos e andesitos. As correlações encontradas com os ensaios de perda ao fogo e sanidade mostram que a abrasividade é influenciada pela proporção e forma de ocorrência de minerais menos abrasivos (produtos de alteração da rocha).

5.4 Dureza CERCHAR

Este índice, apesar da dispersão significativa de resultados, também mostra que os tipos litológicos da Formação Serra Geral se comportam de maneira variável. A diferença relativa entre as amostras estudadas chega a ser de cinco vezes. Os basaltos aparecem como os tipos mais “moles”, enquanto que os andesitos basálticos e dacitos correspondem aos tipos mais “duros”. Tomando-se os valores das medianas a diferença de dureza entre essas rochas chega à cerca de 20 pontos.

A falta de correlação entre o ensaio de dureza e os de absorção de água, teor de sílica e resistência à compressão pontual parece indicar que o comportamento desse ensaio não é

dependente dessas características. Já os ensaios de perda ao fogo e sanidade estão a indicar que a dureza CERCHAR está relacionada à presença (proporção e modo de ocorrência) de minerais “moles”.

Tanto para os ensaios de abrasividade como dureza CERCHAR recomenda-se, como estudo complementar, a execução de mais ensaios sobre outros tipos litológicos para se verificar melhor o comportamento dessas duas características tecnológicas nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES-BARROS, L. Comparative study between rates of experimental laboratory weathering of rocks and their natural environmental weathering decay. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. n.18, p.169-174, 1978.

AKTINSON, R.H. **Hardness test for rock characterization**. In: HUDSON, J.A. (Ed) *Comprehensive rock engineering: principles, practice and projects*. Oxford, Pergamon, 1993. 5v., il. v3: Rock testing and site characterization. cap.5. p.105-117.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate**: T 104-97. Washington, 1998. 6p.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for major and minor elements in coal and coke ash by x-ray fluorescence**: D4329-97. Philadelphia, 1998. 4p.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate**: C88-90. Philadelphia, 1998. 4p.

ARNOLD, G.P. **Estudo do comportamento mecânico de basaltos alterados do Rio Grande do Sul para emprego em pavimentos rodoviários**. Porto Alegre, 1993. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1988, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação da perda ao fogo**: NBR 5743. Rio de Janeiro, 1989, 3p.

BELLIENI, G.; COMIN-CHIAROMONTI, P.; MARQUES, L.S.; NARDY, A.J.R.; PAPTRECHAS, C.; PICCIRILLO, E.M.; ROISENBERG, A.; STOLFA, D. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationship. **Journal of Petrology**. n.27, p.915-944, 1986.

BIENIAWSKI, Z.T. The point-load test in geotechnical practice. **Engineering Geology**. Amsterdam, n.9, p.1-11, 1975,

BRASIL. **mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul e parte do escudo Sul-Rio-Grandense**. Brasília, 1989. color., 100cm X 125cm. Escala 1:1.000.000 e 1:600.000.

BROCH, E. The influence of water on some rock properties. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ROCK MECHANICS, 3., 1974, Denver. **Proceedings...** p. 33-38.

CALEMBERT, L.; POPESCU, C.; POPESCU, M.; SCHROEDER, C. Relations between geological characteristics of rocks and mechanical properties of road aggregates. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. Krefeld, n.22, p.167-172, 1980.

CHAU, K.T.; WONG, R.H.C. Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Oxford, v.33, 1996, (Technical note).

CHEVASSU, G. Influence des caracteristiques petrographiques de quelques roches sur leur resistance a l'attrition. **Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chausees**. n.39, p.65-72, juil./aout., 1969.

CMILJANIC, S.; PAP, I.; OPACIC, D. Influence of the type and degree of alteration of andesite and dacite on the quality and life of asphaltic concrete. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. Paris, n.30, p.41-45, 1984.

COLE, W.F.; SANDY, M.J. A proposed secondary mineral rating for basalt road aggregate durability. **Australian Road Research**. v.10, n.3, sept. 1980.

CONCA, J.L.; CUBBA, R. Abrasion resistance hardness testing of rock materials. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. London, v.23, n.2, p.141-149, 1986.

CORTELEZZI, C.R. et al. Durability of basalts contaminated with expansive clays. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 5., Buenos Aires, 1986. **Proceedings...** Rotterdam, Balkema, 1986. v.5, p. 1633-1638.

COUNTY ROADS BOARD. **Secondary mineral content using a petrological microscope**. Test Method CRB 3730. Victoria, v.III, 6p., 1982.

DEKETH, H.J.R. Wear of the cutting tools of rock excavations machines. In: SYMPOSIUM OF ROCK MECHANICS, 35, 1995, Reno-University of Nevada. **Proceedings...** Rotterdam, Balkema, 1995. p. 341-347.

DEKETH, H.J.R.; GRIMA, M.A.; HERGARDEN, I.M.; GIEZEN, M.; VERHOEF, P.N.W. Towards the prediction of rock excavation machine performance. **Bulletin of Engineering Geology and Environment**. Wien, v.57, n.1, p.3-15, june, 1998,

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação da sanidade de agregados pelo uso de sulfato de sódio**: EL 104/01. Porto Alegre, 2001. 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio**: DNER-ME 089/94. Rio de Janeiro, 1994. 6p.

DUBART, J.-CH; JOSIEN, J.-P. **Méthode de caractérisation des épontes rocheuses**. 9p. (Separata de: Industrie Minerale-Mine, n.4, 1973).

FARJALLAT, J.E.S. **Estudos experimentais sobre a degradação de rochas basálticas:** basaltos da barragem de Capivari, rio Paranapanema. São Paulo, 1971. 125p. Tese (Doutorado)- Instituto de Geociências e Astronomia da USP.

FARJALLAT, J.E.S. Physical problems of the degradation of basalts. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2.,1974, São Paulo. **Proceedings...** v.3, p.207-229, il.

FARRAN, J.; THENOZ, B. L'alterabilite des roches, ses facteurs, sa prevision. **Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics.** v.18, n.215, p.1533-1548, nov, 1965.

FOOKES,P.G.; DEARMAN,W.R.; FRANKLIN,J.A. Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. **Quarterly Journal of Engineering Geology.** London, v.4, p.139-185, 1971.

FOOKES,P.G.; GOURLEY,C.S.; OHIKERE,C. Rock weathering in engineering time. **Quarterly Journal of Engineering Geology.** London, v.21, p.33-57, 1988.

FOURMAINTRAUX, D.; MASSIEU, E. Determination de l'abrasivite des roches. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY,1978, Madri. **Proceedings...** v.2, Seção 4, p.121-131.

FOWELL,R.J.; GILLANI,T.; ALTINOLUK,S. Wear characterization of rock. In: SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS: EUROCK'92, 1992. **Proceedings...** London, Thomas Telford, 1992. p.13-18. (Tema do evento: Rock Characterization.).

FRASCÁ, M.H.B.O. A petrographic index for alterability evaluation of basaltic rocks. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 8., 1998, Vancouver. **Proceedings...** Rotterdam, Balkema, 1998. p. 2877-2882.

GOSWAMI, S.C. Influence of geological factor on soundness and abrasion resistance of road surface aggregates: a case study. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology.** Paris, n.30, p.59-61, 1984.

GUPTA, A.S.; RAO, K.S. Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment.** Germany, v.57, n.2, p.161-172, sep., 1998.

HAMROL,A. A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 7., Paris, 1961. **Proceedings...**, p. 771-774.

HARALDSSON, H. Relations between petrography and the aggregate properties of icelandic rocks. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology.** Paris, n.30, p.73-76, 1984.

HARTLEY, A. A review of the geological factors influencing the mechanical properties of road surface aggregates. **Quartely Journal of Engineering Geology**. London, v.7, p.69-100, 1974.

HAWKINS, A.B. Aspect of rock strength. **Bulletin of Engineering Geology and Environment**. London, v.57, n.1, p.17-30, june, 1998,

HENNINGSSEN, D. Relationship between petrography and texture of rocks and their properties as road material. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. Paris, n.22, p.191-193, 1980.

HOWARTH, D.F.; ROWLANDS, J.C. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. **Rock Mechanics and Rock Engineering**. Wien, v.20, n.1, p.57-85, Jan./Mar, 1987.

IRFAN, T.Y.; DEARMAN, W.R. The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. **Quarterly Journal of Engineering Geology**. London, n.11, p.233-244, 1978.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS: Suggested method for determining point load strength (revised version). **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Oxford, v.22, p.51-60, 1985.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCKS MECHANICS. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Oxford, v.15, p.89-97, 1978.

JERMY,C.A.; BELL,F.G. Durability of some dolerites from South Africa. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 8.,1998. **Proceedings...** Rotterdam, Balkema, 1998.

JUCHEM, P.L. **Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul**. São Paulo, 1999. 140p. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia)- Instituto de Geociências da USP.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. **Agregados - Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio: E 238-1970**. Lisboa, 1971. 6p.

LADEIRA F.L.; MINETTE E.(a) Indices fisicos de alteracao na quantificacao da alterabilidade de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA,4., Belo Horizonte, 1984. **Anais...** Belo Horizonte, 1984. vol.3, p.359-366.

LADEIRA, F.L.; MINETTE, E.(b) A quantificação da alteração e da alterabilidade de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4.,1984, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 1984. v. 3, p.351-358.

LEES, G.; KENNEDY, C.K. Quality, shape and degradation of aggregates. **Quarterly Journal of Engineering Geology**. London, v.8, n.3, p.193-209, 1975.

LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do Sul do Brasil. **Geologia**. São Paulo. 66p., 1949.

LE MAITRE, R.W. (Ed). **A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the international union of geological sciences subcommission on the systematics of igneous rocks**. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1989. 129p.

LUMB, P. The properties of decomposed granite. **Geotechnique**. v.12, p.226-243, 1963.

MACEDO, J.A.G.; LUCENA, F.B.; FERREIRA, H.C. Degradação de agregados em concreto betuminoso usinado à quente. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 22., 1990, Maceió. **Anais...** Maceió, 1990. 1v., p.131-144.

MANTOVANI, M.S.M. et al. Duration of Paraná magmatism and implications for the evolution and sources regions of continental flood basalts. Proceedings of the Symposium on the physics and chemistry of the upper mantle. São Paulo. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. v.67, supl. 2, p.163-170, 1995.

MARSHALL, T.R. **The Washington degradation test: a status report**. Washington: State Highway Commission, Material Division. 1967. 15p. (Report, 103).

MARTIN, R.P. Use of index tests for engineering assessment of weathered rocks. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 5., 1986, Buenos Aires. **Proceedings...** Rotterdam, Balkema, 1986. v.2, p.433-450.

MATULA, M.; HYANKOVA, A.; ONDRASIK, R. Influence of petrogenetic features on the physical properties of the West Carpathian andesites. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. Krefeld, n.22, p.245-252, 1980.

MELFI, A.J.; LEVI, F. Geochemical and mineralogical study on the first stages of weathering of basic and related rocks - part I - mineralogical study. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v.1, n.1, p.22-28, dezembro, 1971.

MENDES, F.M.; AIRES-BARROS, L.; RODRIGUES, F.P. The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 1., 1966, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa, ISRM, 1966. p.217-223.

MENEGOTTO, E. **Alteração intempérica de rochas ultrabásicas em clima subtropical: evolução mineralógica e geoquímica em alguns maciços ultrabásicos do Rio Grande do Sul-Brasil**. Porto Alegre, 1982. 130p. Tese (Doutorado em Geociências)- Instituto de Geociências, Curso de Pós-graduação em Geociências da UFRGS.

MENEGOTTO, E.; GASPARETTO, N.V.L. Intemperização de rochas vulcânicas básicas e ácidas da região de Santa Maria, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1., 1987, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, 1987. v.2, p. 69-83.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY. **Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements**: Final report. Auburn, Alabama, Auburn University, 1997. 1v. (várias paginações), il. (NCHRP 4-19). Prepared for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.

NUNES, W.P.; LIMA, E.F.; CERATTI, J.A.P. Uso de basaltos alterados em pavimentos delgados. In: CONGRESO URUGUAIO DE GEOLOGIA, 2., Punta del Este, 1998. **Annales...** 1998. p. 401-406.

OLIVEIRA, M.T.G. **Evolução mineralógica da alteração laterítica em rochas vulcânicas básicas na borda sudeste da Bacia do Paraná (Rio Grande do Sul e Santa Catarina)**. Porto Alegre, 1995. 230p. Tese de doutorado (Doutor em Geociências)- Instituto de Geociências, Curso de Pós-graduação em Geoquímica da UFRGS & Universidade de Poitiers.

OLLIER, C. **Weathering**. London, Longman, 1975. 304p.

PICHLER, E. **A petrografia e os ensaios tecnológicos das rochas**. São Paulo, IPT. jan., 1942. 26p. (Separata do Boletim do Departamento de Estradas de Rodagem).

ROISENBERG, A. **Argilo-minerais em rochas basálticas frescas**: mineralogia dos estádios primários de intemperismo de rochas basálticas. Porto Alegre, 1974. 275p. Dissertação (Mestrado em Geociências)- Curso de Pós-graduação em Geociências. Instituto de Geociências da UFRGS.

ROISENBERG, A. **Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da província meridional da bacia do Paraná**. Porto Alegre, 1989. 285p. Tese (Doutorado em Geociências)- Curso de Pós-graduação em Geoquímica. Instituto de Geociências da UFRGS.

RUIZ, M.D. Mecanismo de desagregação de rochas basálticas semi-alteradas. In: CONGRESSO PAN-AMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 2., 1963, Belo Horizonte. **Anais...**, São Paulo, ABMS, 1963. v.1, p.533-543.

RUXTON, B.P. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. **Journal of Geology**. v.76, p.518-527, 1968,

SARTORI, P.I.; FILHO, C.M.; MENEGOTTO, E. Contribuição ao estudo das rochas vulcânicas de bacia do Paraná na região de Santa Maria/RS. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v.5, n.3, p.141-211, Set, 1975.

SCHNEIDER, A.W.; PIRES DA ROCHA, F.X. **Emprego de basaltos em pavimentação rodoviária**. Rio de Janeiro: IPR, 1968. 43 p., il. (Publicação 433)

SCHNEIDER, A.W.; PIRES DA ROCHA, F.X. Contribuição ao emprego de alteração de basalto em pavimentação rodoviária. **Pesquisas**. Porto Alegre, v.4, p.1-101, OUT, 1974.

SCOPEL, R.; FORMOSO, M.L.L.; DUDOIGNON, P.; MEUNIER, A. Hydrothermal alteration of basalts, Southern Paraná Basin - Brazil. **Chemical Geology**. In: v.84, n.1/4, p.249-250, 1990,

SINGH,R.N.; DENBY, B.; EGRETLI, I. PATHAN, A.G. Assessment of ground rippability in opencast mining operations. **Mining Magazine**. University of Nottingham, n.38, p.21-34, 1986,

SMITH, M.R.; COLLIS,L. **Aggregates**: Sand,gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. London, The Geological Society, 1993. 340p, il.

SMITH, R.B. Durability assessment of crush rock road base. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. Paris, n.29, p.443-446, 1984,

STATE OF CALIFORNIA. **Test method No. Calif. 214-D**. San Francisco, 1963. 4p.

STEVENS,C. Weathering and aggregate suitability - A case history from the "Victoria" project, Sri Lanka. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. Paris, n.29, p.447-448, 1984.

SUANA, M.; PETERS, Tj. The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography. **Rock Mechanics**. Wien, v.15, n.1, p.1-7, 1982.

SZLAVIN, J. Relationships between some physical properties of rock determined by laboratory tests. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Oxford, v.11, p.57-66, 1974.

SZUBERT,E.C.; KIRCHNER,C.A.; SHINTAKU,I. Vulcanismo ácido no Planalto Meridional do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...** Recife, SBG, 1978. v.3, p.1350-1354.

TAMMERIK, G.R.; SOARES, L.; DAMASCENO, E.C. Sistema de classificação de maciços quanto a escarificação. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE ROCHAS, 1.,1994, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, FINEP, 1994. p.85-92.

TUGRUL, A.; GÜRPINAR, O. A proposed weathering classification for basalts and their engineering properties (Turkey). **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. Paris, n.55, p.139-149, Avr, 1997.

TURNER, S. et al. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ geochronology. **Earth and Planetary Sciences Letters**. n.121, p.333-348, 1994.

VALANTIN, A. Examen des différents procédés classiques de détermination de la nocivité des roches vis-à-vis de l'abattage mécanique. **Industrie Minerale-Mine**. Paris, p.133-140, nov., 1974.

VALANTIN, A.; GUILLON, P. **Determination de la nocivite des roches vis-a-vis des pics**. Verneuil-en-Halatte, CERCHAR, avril 1971. 10p.

VALLIUS, P. The weak quality rock aggregates can be used for the production of main roads asphalt pavements. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY,8.,1988. **Proceedings...** Rotterdam, Balkema, 1988.

VAZ, L.F. Grau de alteração de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8.,1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1996. v.1, p.71-83.

WEINERT, H.H. A Climatic index of weathering and its application in road construction. **Geotechnique**. London, v.24, n.4, p.475-488, 1974.

WEINERT, H.H. Engineering petrology for roads in South Africa. **Engineering Geology**. Amsterdam, v.2, n.6, p.363-395, 1968.

WEST, G. A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measure rocks. **International Journal of Mining and Geological Engineering**. v.4, p.73-78, 1986.

WEST, G. A review of rock abrasiveness testing for tunnelling. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WEAK ROCK,1981, Tokyo. **Proceedings...** Rotterdam, Balkema, 1981. p.585-594.

WEST, G. Rock abrasiveness testing for tunnelling. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Oxford, v.26, n.2, p.151-160, 1989.

WILLIAMS, H.; TURNER, F.J.; GILBERT, C.M. **Petrography**: an introduction to the study of rocks in thin sections. 2ed. New York, W.H.Freeman and Company, 1982. 320p.

ANEXO I

ANEXO II

Amostra n.º 008**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza esverdeada clara a marrom
 amostra úmida: cinza esverdeada média a marrom
 Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha pouco alterada a alterada
 Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, onde a parte vítrea (caracterizada como resíduos de cristalização) aparece como pequenas manchas de cor castanha clara a castanha escura, preenchendo os interstícios entre os minerais, de forma homogênea (textura intersertal). Os minerais opacos, pelo seu tamanho e forma de ocorrência, indicam também uma textura microporfírica (microfenocristais de até 0,5mm) e poiquilítica (alguns grãos). Relacionada com a matriz, a textura intersertal se associa à textura intergranular.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas curtas, com comprimento médio de 0,15mm e apresenta uma tendência à orientação ou formar feixes. Frequentemente mostra reação com a porção residual. Todos os grãos estão com alteração pouco incipiente a argilo-minerais de cor verde pálida.

Piroxênio: presente como cristais anédricos, de dimensões semelhante à dos plagioclásios estando bastante alterados (argilizados).

Minerais opacos: formam grãos amebóides (os microfenocristais) ou ocorrem como “pontuações” de forma irregular a retangular, na matriz. Alguns dos microfenocristais estão levemente alterados, com a liberação de óxidos de ferro vermelho nas bordas.

Vidro recristalizado: representando resíduos de cristalização. Mostra forte processo de palagonitização e alteração a argilo-minerais de cor castanha.

Alteração: muito incipiente. A alteração, além das formas descritas, aparece como manchas de cor verde amarelada e não possibilita saber se é proveniente do piroxênio ou do vidro recristalizado.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	40
Piroxênio	45
Minerais opacos	10
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	5

Classificação petrográfica: **basalto**

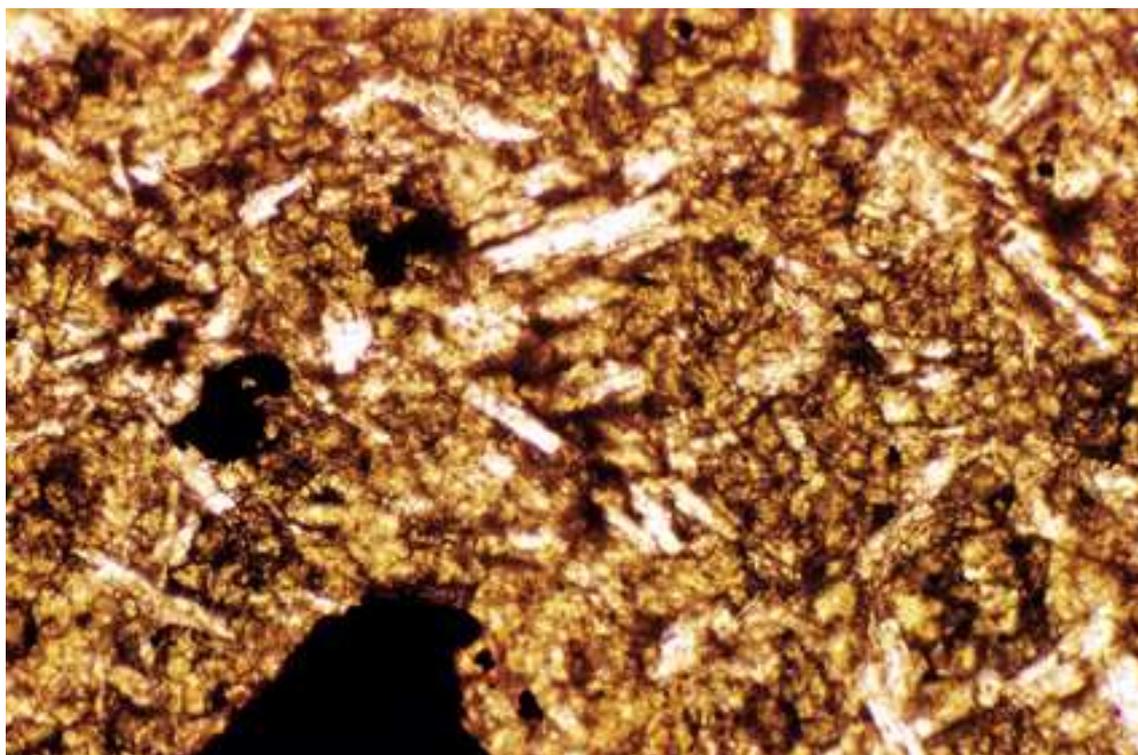


Foto da amostra n.º008; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 009**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza médio com pigmentação e manchas verdes

amostra úmida: cinza avermelhado escuro com manchas verdes

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha sã a pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, onde a parte vítrea (caracterizada como resíduos de cristalização) aparece como pequenas manchas de cor castanha clara a castanha escura, preenchendo os interstícios entre os minerais, de forma homogênea (textura intersertal). Os minerais opacos, pelo seu tamanho e forma de ocorrência, indicam também uma textura microporfírica (microfenocristais de até 0,5mm) e poiquilítica (alguns grãos). Relacionada com a matriz, a textura intersertal se associa à textura intergranular.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas curtas, com comprimento médio de 0,1mm e freqüentemente mostrando reação com a porção residual da rocha (vidro). Todos os grãos estão com alteração pouco incipiente a argilo-minerais de cor verde pálida.

Piroxênio: presente como cristais anédricos, de dimensões semelhante à dos plagioclásios, e bastante alterados (argilizados).

Minerais opacos: formam grãos amebóides (os microfenocristais) ou ocorrem como “pontuações” de forma irregular a retangular, na matriz. Alguns dos microfenocristais estão levemente alterados, com a liberação de óxidos de ferro vermelho nas bordas.

Vidro vulcânico recristalizado: representando resíduos de cristalização que mostra forte processo de recristalização e alteração a argilo-minerais de cor castanha.

Alteração: muito incipiente. A alteração, além das formas descritas, aparece como manchas de cor verde amarelada e não possibilita saber se é proveniente do piroxênio ou do vidro recristalizado.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	28
Piroxênio	60
Minerais opacos	2
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	10

Classificação petrográfica: **basalto**

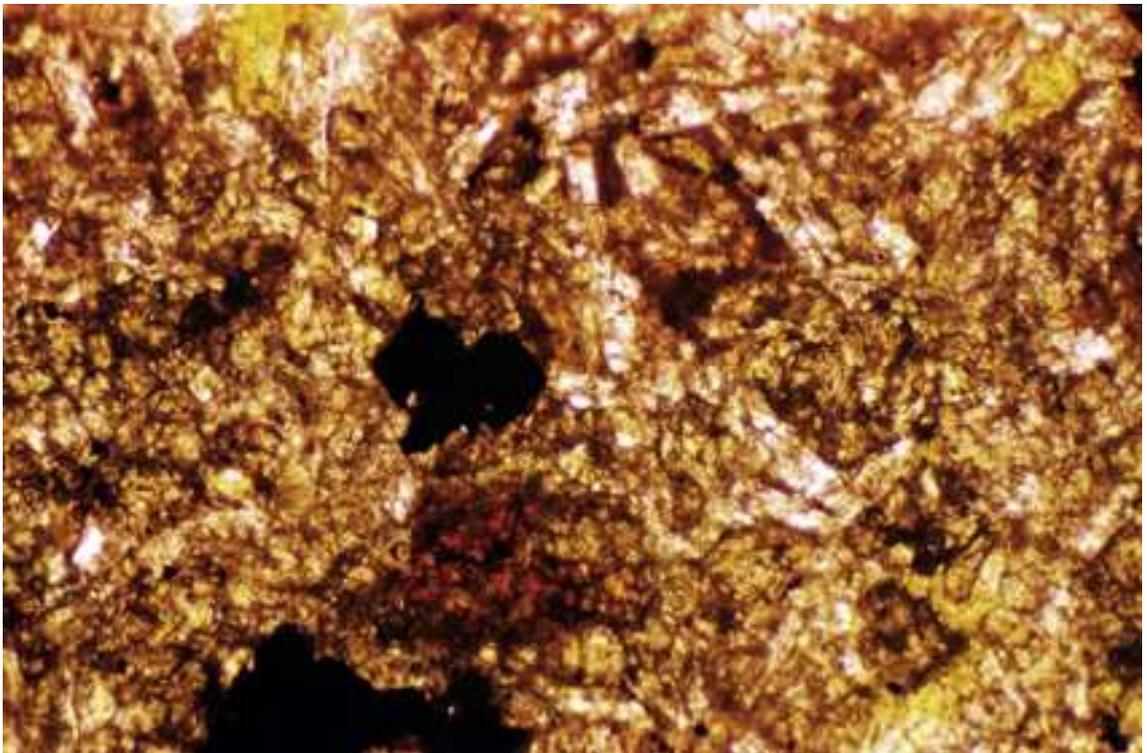


Foto da amostra n.º009; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 010**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza esverdeada com pontuações e manchas vermelhas
 amostra úmida: cinza esverdeada com pontuações e manchas vermelhas
 Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha pouco alterada
 Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, onde a parte vítrea (caracterizada como resíduos de cristalização) aparece como pequenas manchas de cor castanha clara a castanha escura, preenchendo os interstícios entre os minerais, de forma homogênea (textura intersertal). Os minerais opacos, pelo seu tamanho e forma de ocorrência, indicam também uma textura microporfírica (microfenocristais de até 0,5mm) e poiquilítica (alguns grãos). Relacionada com a matriz, a textura intersertal se associa à textura intergranular.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas curtas, com comprimento médio de 0,1mm e freqüentemente mostrando reação com a porção residual da rocha (vidro). Todos os grãos estão com alteração pouco incipiente a argilo-minerais de cor verde pálida.

Piroxênio: ocorre como cristais anédricos, porém de dimensões difíceis de determinar devido ao processo de alteração superimposto.

Minerais opacos: formam grãos amebóides (os microfenocristais), às vezes formando glomeros devido a coalescência de alguns cristais, ou ainda como “pontuações” de forma irregular a retangular, na matriz. Alguns dos microfenocristais estão muito alterados, com a liberação de óxidos de ferro vermelho nas bordas e pigmentando os minerais vizinhos.

Resíduos de cristalização: representados por vidro vulcânico que mostra forte processo de recristalização (palagonitização) e alteração a argilo-minerais de cor castanha.

Alteração: rocha muito alterada. A alteração, além das formas descritas, aparece como grandes manchas de cor verde forte em toda a rocha (associada ao piroxênio e ao vidro recristalizado também), estando algumas interconectadas.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	25
Piroxênio	35
Minerais opacos	10
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	30

Classificação petrográfica: **basalto**

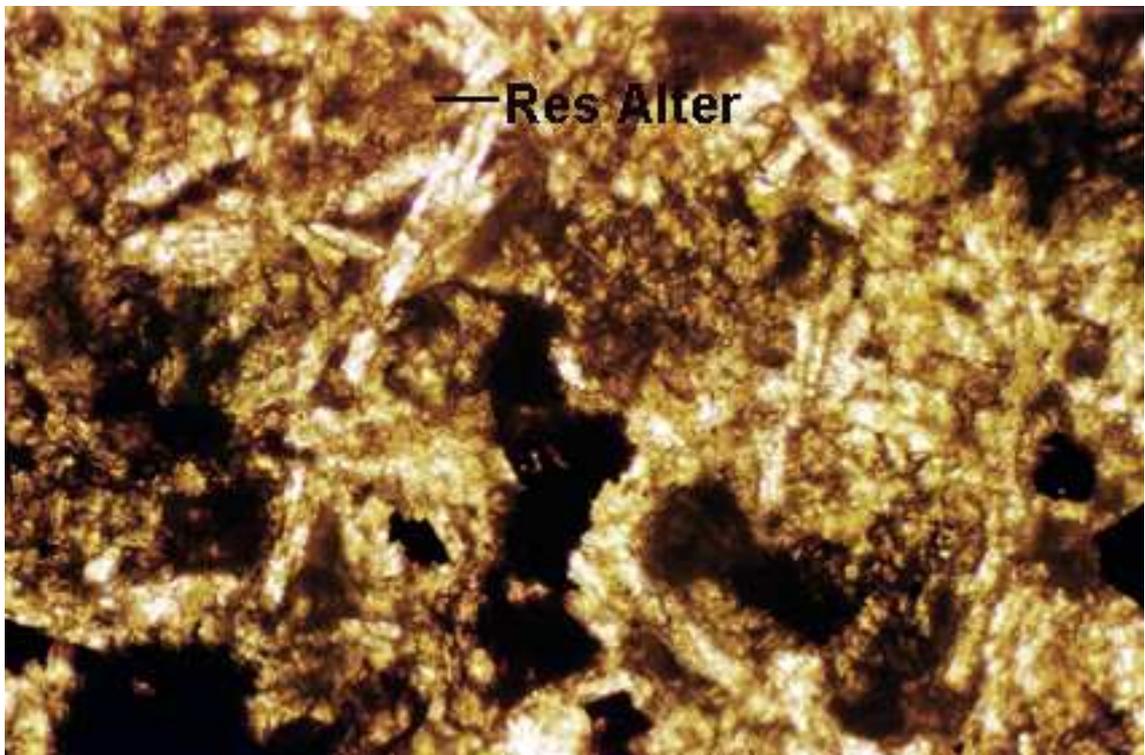


Foto da amostra n.º010; Luz natural (LN); ampliação 100X; Res Alter = resíduo de cristalização alterado

Amostra n.º 011**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza esverdeada com pontuações e listras vermelhas

amostra úmida: cinza esverdeada com pontuações e listras vermelhas

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha são a pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, com a porção vítrea representada pelos resíduos de cristalização, localmente preenchendo os interstícios (textura intersertal) Associada a esta observa-se também a textura intergranular formada pelos grãos de plagioclásio, piroxênio e minerais opacos.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas curtas de comprimento em torno de 0,15mm, mostrando, às vezes, bordas reabsorvidas pela parte residual. Está incipientemente alterado a argilo-minerais verdes pálidos, com alguns cristais apresentando ainda fissuras preenchidas por sericita (?).

Piroxênio: grãos com formas anédricas, às vezes subédricas, sempre com contornos quase indefinidos devido à alteração. Tamanhos dos cristais inferiores à dos plagioclásios. A alteração é muito incipiente indicada por uma argilização (argilo-minerais verdes amarelados), com alguma liberação de ferro (hidróxidos).

Minerais opacos: ocorrem disseminados na rocha sob a forma de pontuações negras ou como cristais de forma irregular e dimensão até 0,3mm. Alguns grãos apresentam bordas alteradas e com pigmentação vermelha que tingem os minerais no entorno.

Vidro recristalizado: apresenta cor marrom, está distribuído homoganeamente sobre a rocha e às vezes ocorre como pequenas manchas de alteração (argilo-minerais) verdes amareladas. A recristalização é representada por agregados quartzo-feldspáticos que apresentam extinção esferulítica a microfelsítica. Junto a este ocorrem também inúmeras acículas (cristálitos) de mineral opaco.

Alteração: rocha alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	32
Piroxênio	15
Minerais opacos	28
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	25

Classificação petrográfica: **basalto**

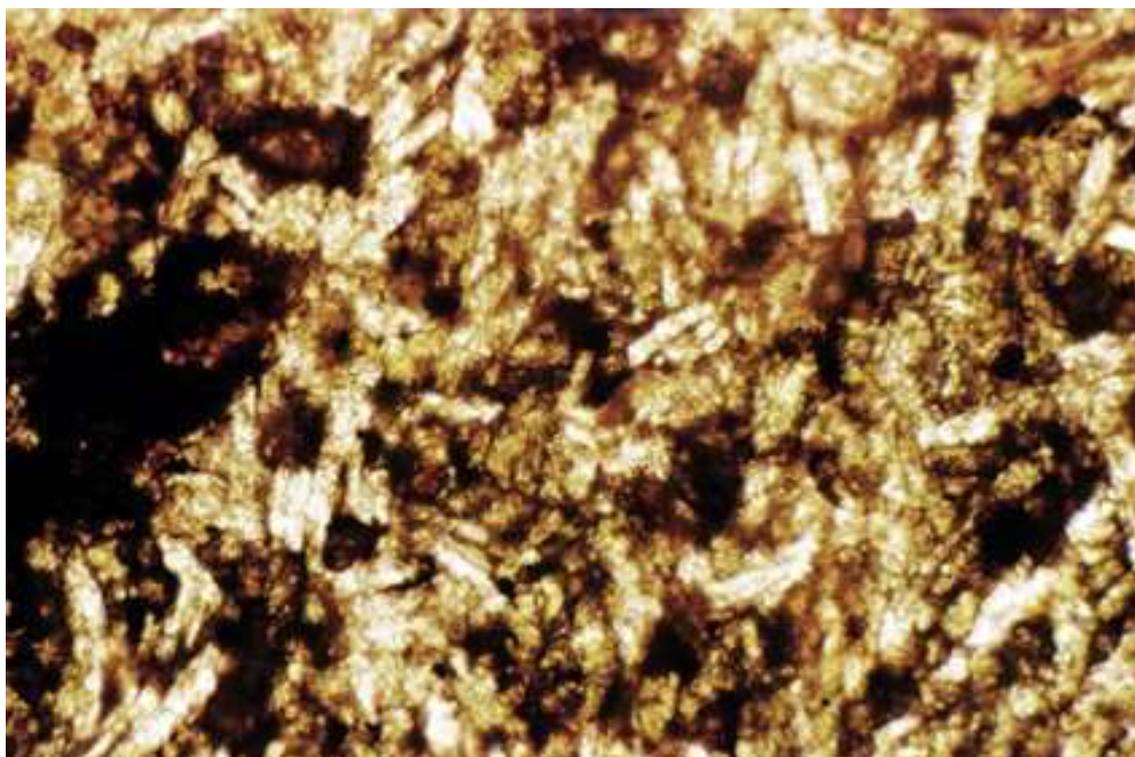


Foto da amostra n.º011; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 012**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza esverdeada clara com pontuações e manchas vermelhas

amostra úmida: marrom esverdeado escuro com pontuações e manchas vermelhas

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, com a porção vítrea representada pelos resíduos de cristalização, localmente preenchendo os interstícios (textura intersertal) A textura predominante é a intergranular formada pelos grãos de plagioclásio, piroxênios e minerais opacos.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas curtas de comprimento médio de 0,1mm, podendo atingir excepcionalmente 0,6mm e mostrando forte reação com a parte do resíduo de cristalização. Estão incipientemente alterados a argilo-minerais verdes pálidos, com alguns cristais apresentando ainda fissuras preenchidas por sericita (?).

Piroxênio: grãos com formas anédricas, às vezes subédricas, sempre com contornos quase indefinidos devido à alteração. Tamanhos dos cristais inferiores à dos plagioclásios. A alteração é muito incipiente indicada por uma argilização (argilo-minerais verdes amarelados) e com alguma liberação de ferro (hídróxidos).

Minerais opacos: ocorrem disseminados na rocha sob a forma de pontuações negras ou como cristais de forma irregular e dimensão até 0,3mm. Quase todos os grãos apresentam bordas alteradas e com pigmentação vermelha que tingem os minerais no entorno.

Vidro recristalizado: apresenta cor verde amarelada, mas pigmentados por óxidos/hidróxidos de ferro (que tingem o material de cor castanha avermelhada). É constituído ainda por agregados quartzo-feldspáticos que apresentam extinção esferulítica a microfelsítica. Junto a este ocorrem também inúmeras acículas (cristálitos) de mineral opaco.

Alteração: rocha alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	30
Piroxênio	30
Minerais opacos	12
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	28

Classificação petrográfico-química: **dacito**

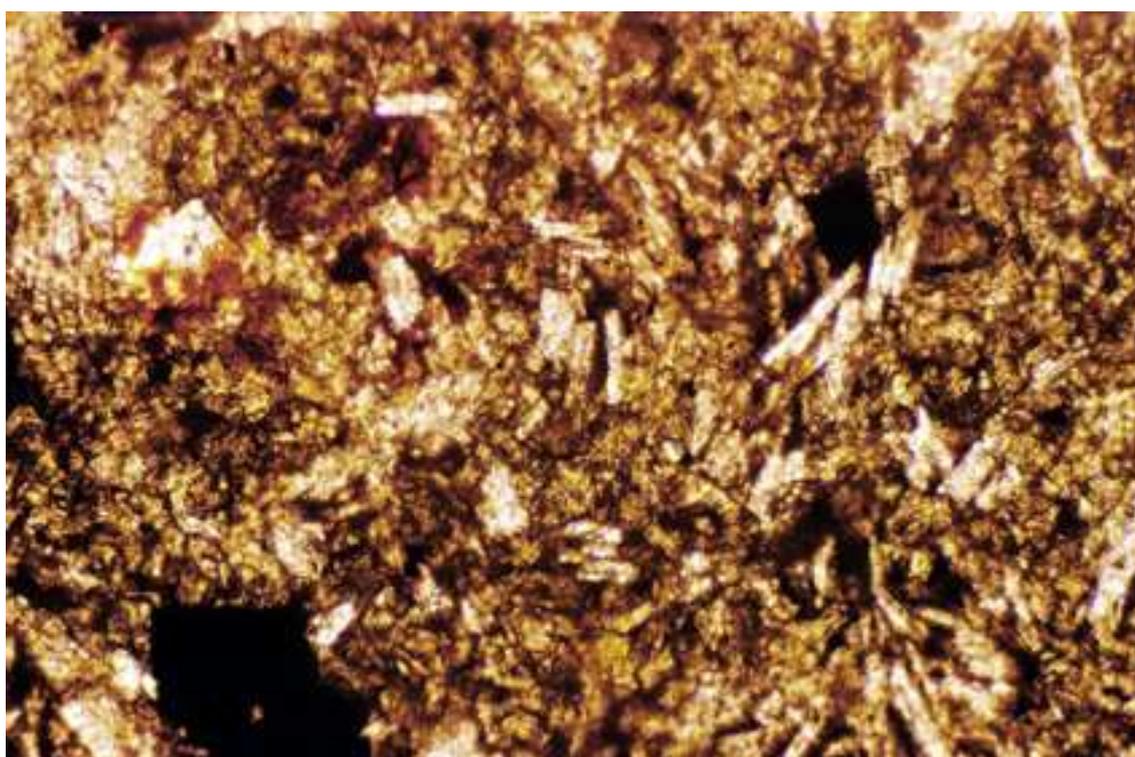


Foto da amostra n.º012; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 020**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza claro com pontuações castanho avermelhadas

amostra úmida: cinza médio com pontuações castanho avermelhadas

Estrutura: maciça

Textura: afanítica a granular fina. É possível se individualizar alguns cristais de feldspatos (plagioclásio) que se destacam do restante da massa.

Alteração: rocha sã

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura holocristalina, granular a subofítica (os cristais de piroxênio e olivina envolvem os grãos de plagioclásio localmente).

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como cristais anédricos a subédricos, com tamanho dos grãos variando de 0,1 a 2,0mm. Quase todos estão pouco alterados (argilização). .

Piroxênio: cristais subédricos a anédricos, com tamanho dos cristais que varia de 0,5 a 1,0mm. Algumas fissuras intragranulares cortam os mesmos de forma aleatória. .

Olivina: grãos de contorno irregular a arredondados, invariavelmente fissurados e com tamanhos desde 0,2 até 2,0mm (macroscopicamente são identificados por pontuações castanhas escuras). As fissuras encontram-se freqüentemente preenchidas por minerais opacos e hidróxidos de ferro (material de cor vermelha e transparente), que pigmenta os cristais em volta. Raramente aparecem como grãos com alteração parcial, ou então como pseudomorfos de serpentina.

Alteração: rocha sã.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	25
Piroxênio	56
Olivina	19

Classificação petrográfica: **basalto (diabásio?)**

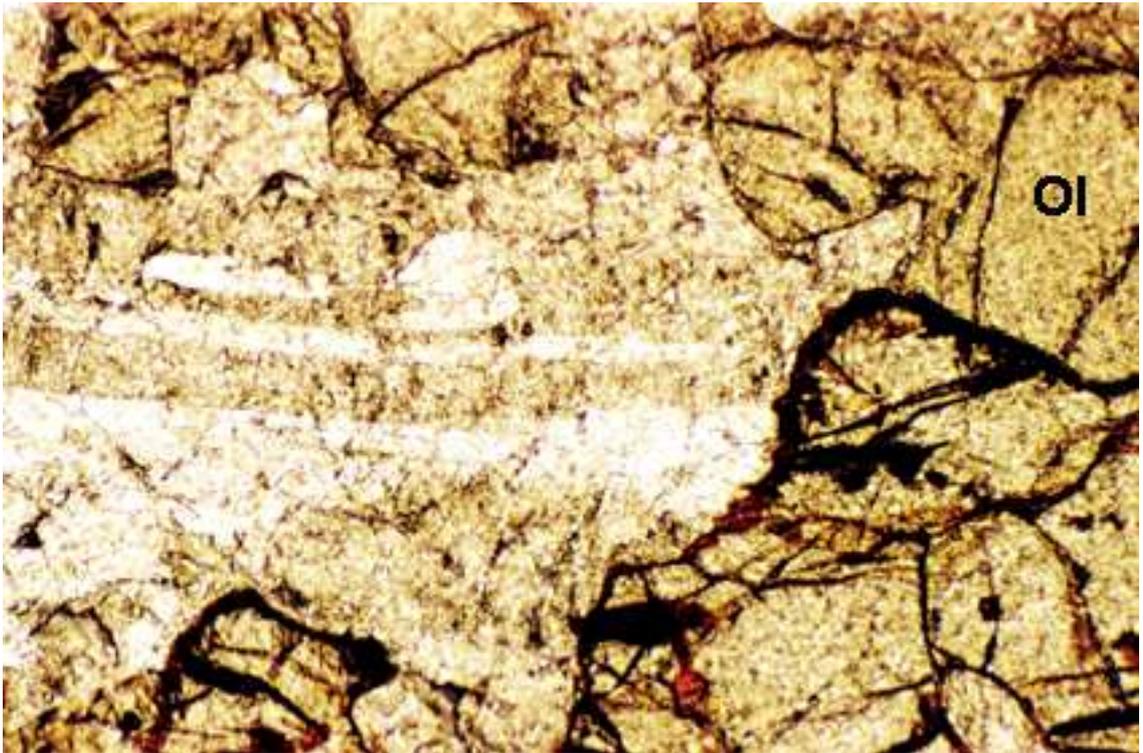


Foto da amostra n.º020; Luz natural (LN); ampliação 100X; Ol = cristal de olivina

Amostra n.º 051**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza amarelada clara com pontuações cinza escura

amostra úmida: cinza amarelada clara com pontuações cinza escura

Estrutura: maciça a vesicular, com raras vesículas parcialmente preenchidas por massa de cor branca esverdeada

Textura: afanítica (comumente denominada “carijó”)

Alteração: rocha sã a pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hialofítica a micropórfira, onde o componente dominante é o material vítreo na forma de manchas de cor cinza amarelada, com bordas mostrando aspectos de recristalização. A parte cristalina é formada por grãos retangulares e subédricos de plagioclásio, piroxênio e grãos com forma irregular de minerais opacos. Raramente aparecem amígdalas com formato amebóide e preenchidas por argilo-minerais verdes amarelados.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como cristais isolados ou em grumos, com comprimento variável de 0,1 a 0,5mm e sempre mostrando um dos lados em reação com a matriz vítrea. Está pouco alterado, com a formação de argilo-minerais verdes pálidos.

Piroxênio: aparece raramente sob a forma de grãos anédricos a subédricos (retangulares) e sempre muito alterados, com a formação de materiais argilosos de cor verde amarelada, material opaco e pigmentos vermelho (hidróxido de ferro).

Minerais opacos: ocorrem sob a forma de cristais de contorno irregular a circular, as vezes sob a forma de grumos, com tamanho no máximo de 0,25mm. Mostram quase sempre também uma reação com a porção vítrea, havendo liberação de hidróxido de ferro.

Vidro vulcânico: apresenta porções (centro) totalmente isotropas à luz natural e, nas bordas, mostra indícios de recristalização, com a formação de agregados quartzo-feldspáticos com textura esferulítica, acompanhada de grande quantidade de pontuações e acículas de minerais opacos, às vezes curvados.

Alteração: rocha pouco alterada

Composição Modal

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	5
Piroxênio	traços
Minerais opacos	5
Vidro recristalizado	45
Agregados quartzo-feldspáticos	45

Classificação petrográfica: **dacito**

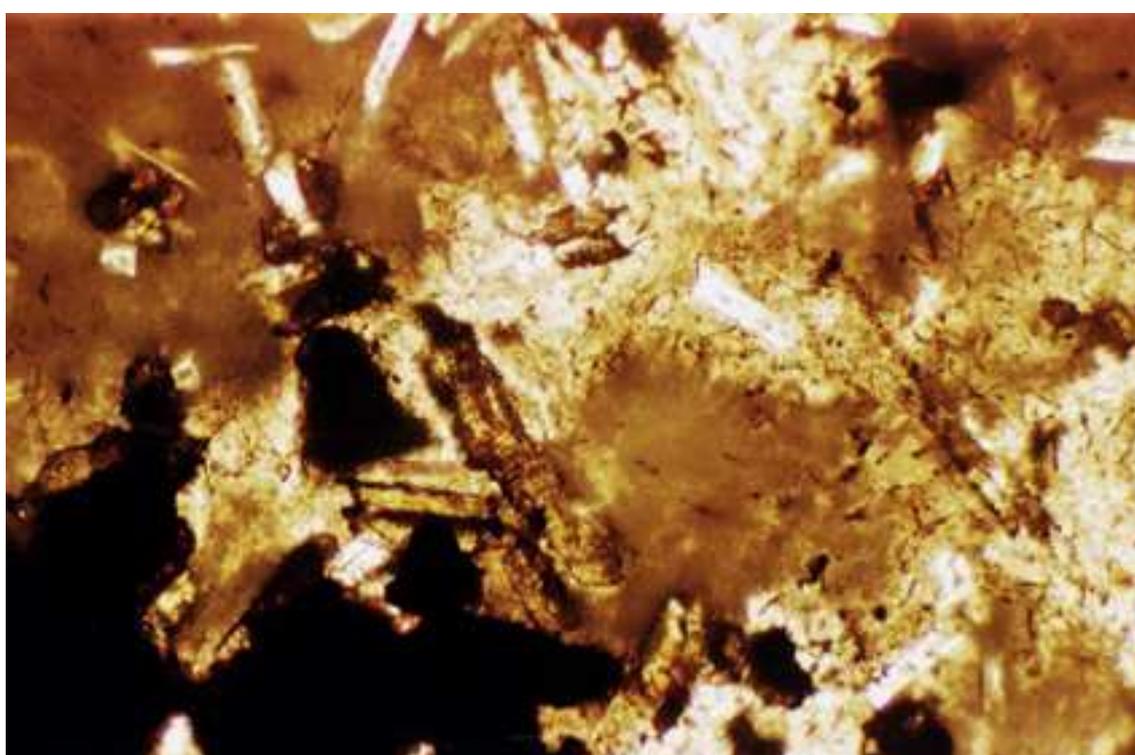


Foto da amostra n.º051; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 104**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: marrom escura

amostra úmida: marrom escura com pontuações pretas

Estrutura: maciça

Textura: afanítica a pórfira (raras ripas de feldspato se ressaltam da massa)

Alteração: rocha sã a pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura intergranular a granular, localmente dando espaço à textura intersertal, onde se encontra o resíduo de cristalização.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre sob a forma de ripas e grãos subédricos a anédricos (com comprimento médio de 0,25mm). Os cristais maiores (subédricos) tendem a formar grumos. Todos os grãos estão pouco alterados a argilo-minerais verdes pálidos. Acompanha, às vezes, fissuras intragranulares, preenchidas por argila de cor castanha e sericita(?). Alguns cristais mostram reação com a porção vítrea.

Piroxênio: ocorrem em geral anédricos, raramente como forma de prismas curtos e possuem dimensões em torno de 0,1mm. Todos os cristais estão também com incipiente alteração, com a formação de argilo-minerais de cor castanha e verde amareladas, que se mostra presente principalmente nas bordas e clivagens. Estes argilo-minerais são acompanhados por uma pequena pigmentação vermelha de hidróxido de ferro.

Olivina: encontra-se como raros grãos com formas irregulares a arredondadas e dimensões próximas às dos plagioclásios e piroxênios. Quase sempre estão arranjados em grumos e mostram alguma alteração, principalmente ao longo de fissuras. Também há produção de argilo-minerais castanhos e verdes amarelados, acompanhados de alguma liberação de hidróxido de ferro.

Minerais opacos: ocorrem como grãos de formato irregular a amebóides, às vezes engolfando outros minerais. Quase sempre estão alterados nos bordos, com forte liberação de hidróxido de ferro, que pigmenta também os minerais ao redor.

Alteração: rocha pouco alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	40
Piroxênio	45
Minerais opacos	10
Olivina	traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	5

Classificação petrográfica: **andesito basáltico**

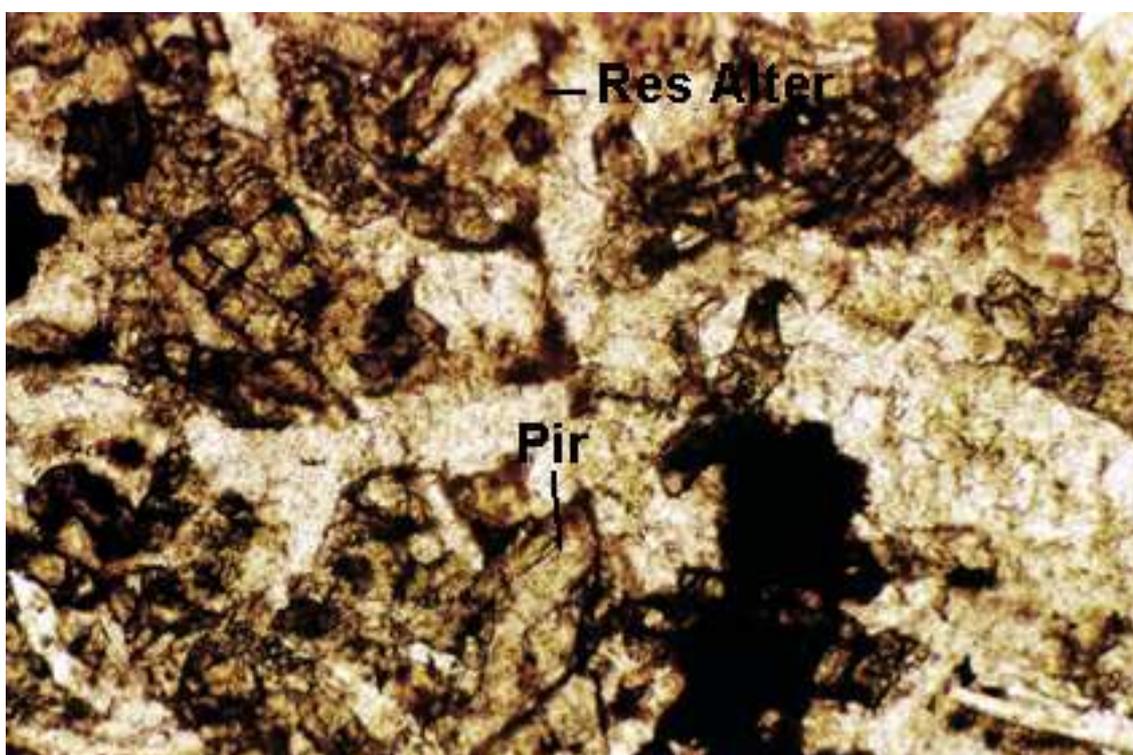


Foto da amostra n.º104; Luz natural (LN); ampliação 100X; Res Alter = resíduo de cristalização alterado; Pir = cristal de piroxênio

Amostra n.º 136**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza esverdeada clara com pontuações pretas
amostra úmida: cinza esverdeada média

Estrutura: maciça

Textura: afanítica, porém se ressaltam alguns raros cristais de minerais opacos de até 1,0mm

Alteração: rocha pouco alterada (alteração dada pela cor esverdeada da rocha)

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Rocha hemicristalina onde o vidro vulcânico ocorre preenchendo os interstícios da massa cristalina (textura intersertal). Outras partes da rocha são compostas por intercrescimentos quartzo-feldspáticos em textura felsítica, acompanhados por ripas alongadas de plagioclásio e grãos de minerais opacos e raros piroxênios.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: formado por ripas bastante alongadas, atingindo quase 1,0mm de comprimento. Os cristais estão imersos na matriz quartzo-feldspática e apresentam contatos de reação com esta.

Piroxênio: está representado por grãos extremamente modificados por processos de reação com a massa em volta, ou por argilização, com a formação também de óxidos/hidróxidos de ferro junto às clivagens e fraturas.

Minerais opacos: ocorrem disseminados na forma de grãos de contorno irregular (dimensões variáveis de 0,1 a 0,5mm), ou então em grumos, onde podem atingir até 2,0mm.

Intercrescimentos quartzo-feldspáticos: são o grosso da massa da rocha e se parecem como microfenocristais anédricos, não individualizáveis.

Vidro vulcânico: apresenta cor cinza esverdeada escura e distribui-se de forma distinta na rocha.

Alteração: rocha pouco alterada, se apresentando disseminada homogeneamente em toda a rocha e representada por uma argilização de cor verde clara e óxido/hidróxidos de ferro (junto aos piroxênios e minerais opacos).

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	15
Piroxênio	10
Minerais opacos	10
Vidro	35
Intercrescimentos quartzo-feldspáticos	30

Classificação petrográfica: **dacito**

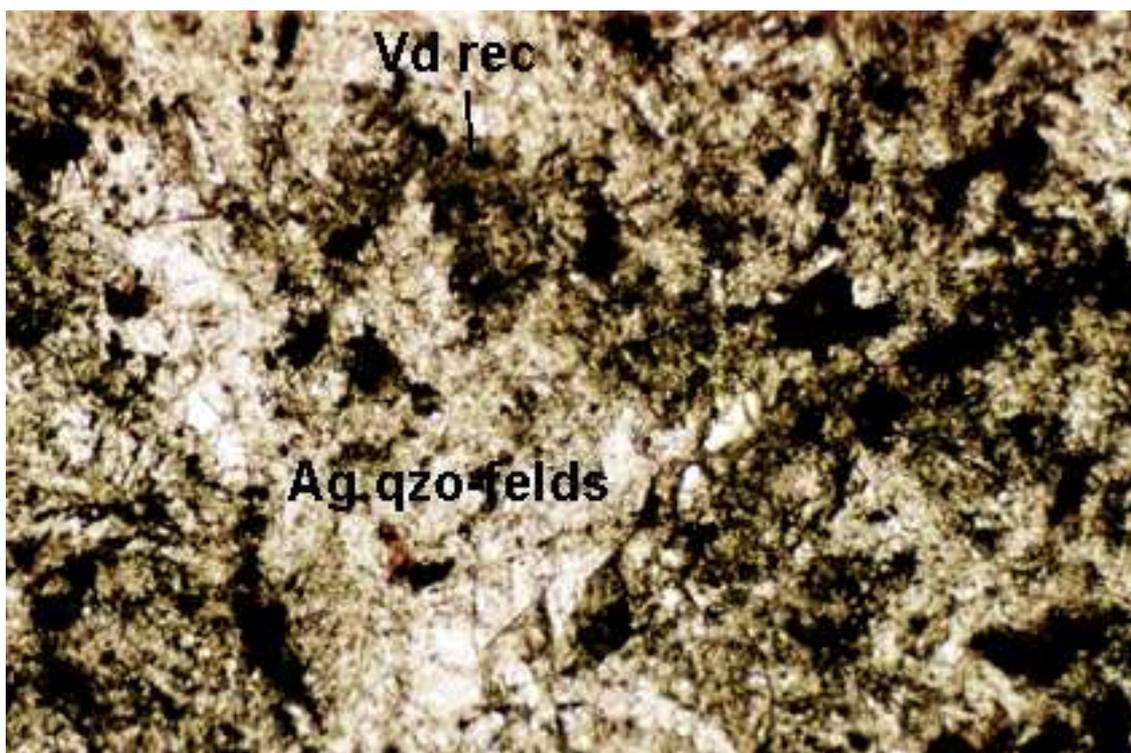


Foto da amostra n.º136; Luz natural (LN); ampliação 100X; Vd rec = vidro recristalizado; Ag qzo felds = agregados quartzo-feldspático

Amostra n.º 251**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza escuro com pontuações brancas

amostra úmida: marrom com pontuações amarelas claras

Estrutura: maciça, porém apresenta raras vesículas parcialmente preenchidas por massa branca esverdeada e amígdalas em torno de 1,0mm e preenchidas por quartzo.

Textura: afanítica (comumente denominada “carijó”)

Alteração: rocha sã

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hipocrystalina, micropórfira a microporfirítica, onde os microfenocristais estão representados por cristais de plagioclásio e piroxênio. A matriz, bem mais representativa em quantidade é formada por agregados quartzo-feldspáticos, em textura felsítica, e vidro (parcialmente recristalizado), englobando ripas de plagioclásio, minerais opacos e quartzo.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: os microfenocristais (até 1,0mm) se mostram fragmentados, e as ripas (tamanho em torno de 0,1mm) estão com bordas de reação e totalmente engolfadas pela massa microgranular quartzo-feldspática e vidro recristalizado. A alteração a argilo-minerais é incipiente.

Piroxênio: apresenta tamanho máximo de 0,5mm e também possui cristais algo fragmentados, com intensa alteração a minerais opacos e hidróxido de ferro nas bordas e planos de clivagem.

Minerais opacos: ocorrem na forma de grãos irregulares, às vezes com seção quadrada, e muito mais freqüente, como agulhas distribuídas em toda a rocha. A grande maioria dos grãos mostra alteração nos seus contornos, pigmentando a matriz.

Quartzo: aparece localmente em grumos de cristais anédricos e intimamente associado à matriz felsítica.

Agregados quartzo-feldspáticos: mostram acentuada alteração, com formação de argilo-minerais.

Vidro (resíduo de cristalização): distribue-se como manchas escuras e está parcialmente recristalizado e alterado.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Percentual
Plagioclásio	20
Piroxênio	10
Minerais opacos	6
Quartzo	traços
Agregados quartzo-feldspáticos	14
Vidro (Resíduos de cristalização)	50

Classificação petrográfica: **dacito**

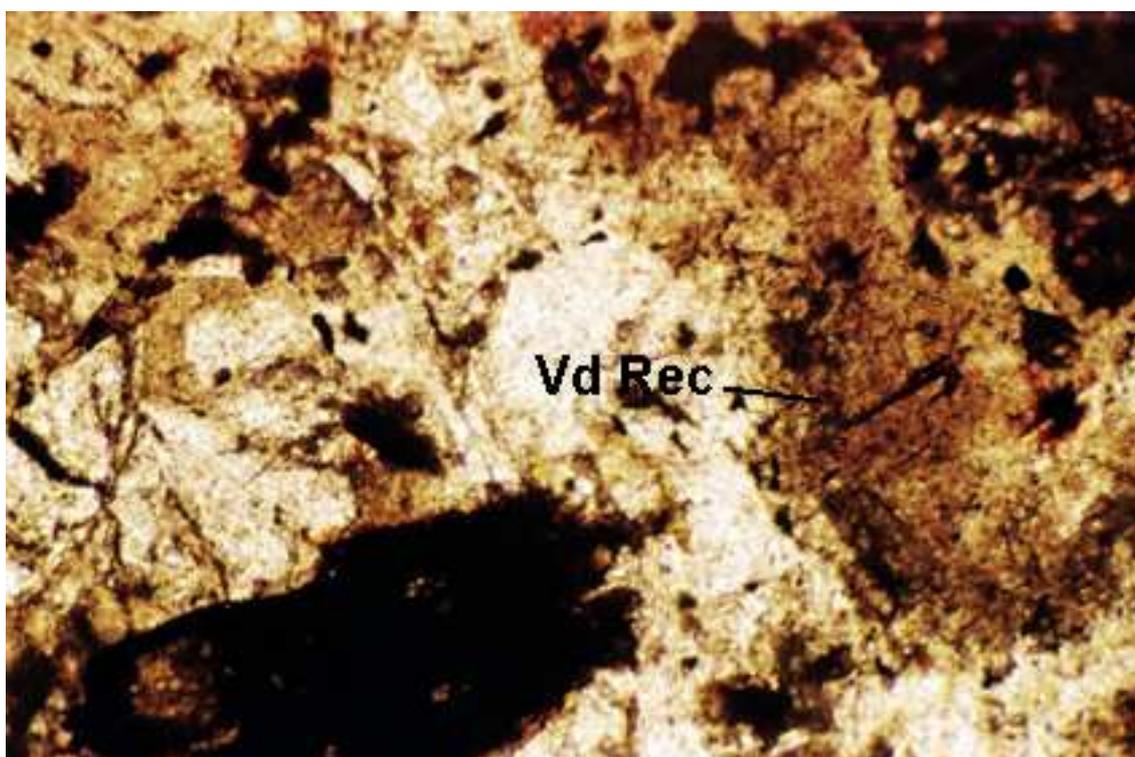


Foto da amostra n.º251; Luz natural (LN); ampliação 100X; Vd rec = vidro recristalizado

Amostra n.º252**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: marrom avermelhada a cinza esverdeada

amostra úmida: marrom avermelhada escura a cinza esverdeada escura

Estrutura: vesicular. Vesículas submilimétricas de diversas formas, preenchidas parcialmente por quartzo (?) e zeólitas incolores

Textura: afanítica

Alteração: rocha alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Rocha de difícil caracterização devido à intensa cor marrom escura a preta assumida pelos resíduos de cristalização (vidro desvitrificado) que formam a porção mais significativa da mesma. A cor, em lâmina delgada, varia em função da quantidade de resíduo presente em relação à parte cristalina. Esta parte cristalina é representada por simples micrólitos alterados de plagioclásio e talvez de piroxênio (muito alterado) também. Acompanham estes micrólitos uma quantidade enorme de pontuações negras de minerais opacos. O conjunto dá a rocha uma textura hialofítica a intersertal.

Composição Mineralógica

Todos os micrólitos presentes apresentam feição de corrosão (reabsorção) pela massa residual. Ocorrem ainda amígdalas (visíveis macroscopicamente) de dimensões milimétricas, preenchidas por zeólitas e argilo-minerais de cor amarela esverdeada.

Alteração: rocha muito alterada, com a formação de argilo-minerais e grande quantidade de óxido/hidróxido de ferro.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio (micrólitos)	10
Mínerais opacos	20
Vidro (Resíduos de cristalização)	65
Amígdalas	5

Classificação petrográfica: **andesito basáltico**

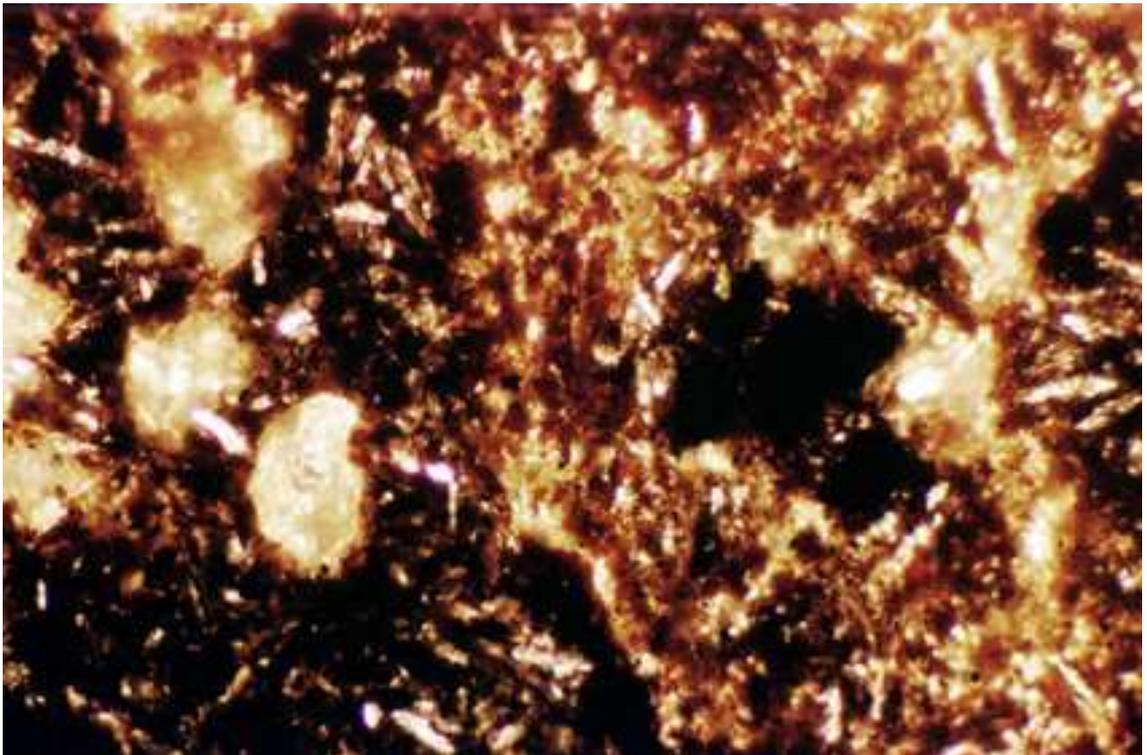


Foto da amostra n.º252; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 266**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza esverdeada com pontuações e listras vermelhas
amostra úmida: cinza esverdeada com pontuações e listras vermelhas

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha sã a pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, com a porção vítrea representando resíduos de cristalização, localmente preenchendo os interstícios (textura intersertal). Associada a esta se observa também a textura intergranular formada pelos grãos de plagioclásio, piroxênios e minerais opacos.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas curtas de comprimento médio de 0,2mm, mostrando, às vezes, bordas reabsorvidas pela parte residual. Estão incipientemente alterados a argilo-minerais verdes pálidos, com alguns cristais apresentando ainda fissuras preenchidas por sericita (?).

Piroxênio: grãos com formas anédricas, às vezes subédricas, sempre com contornos quase indefinidos devido à alteração. Tamanhos dos cristais inferiores à dos plagioclásios. A alteração é muito incipiente indicada por uma argilização (argilo-minerais verdes amarelados) e com alguma liberação de ferro (hídróxidos).

Minerais opacos: ocorrem disseminados na rocha sob a forma de pontuações negras ou como cristais de forma irregular e dimensão até 0,3mm. Quase todos os grãos apresentam bordas alteradas e com pigmentação vermelha que tingem os minerais no entorno.

Vidro recristalizado: de cor marrom clara (alteração), às vezes é constituído por agregados quartzo-feldspáticos que apresentam extinção esferulítica a microfelsítica. Junto a este ocorrem também inúmeras acículas (cristálitos) de mineral opaco.

Alteração: rocha alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Percentual
Plagioclásio	20
Piroxênio	30
Minerais opacos	15
Vidro alterado	35

Classificação petrográfica: **andesito**

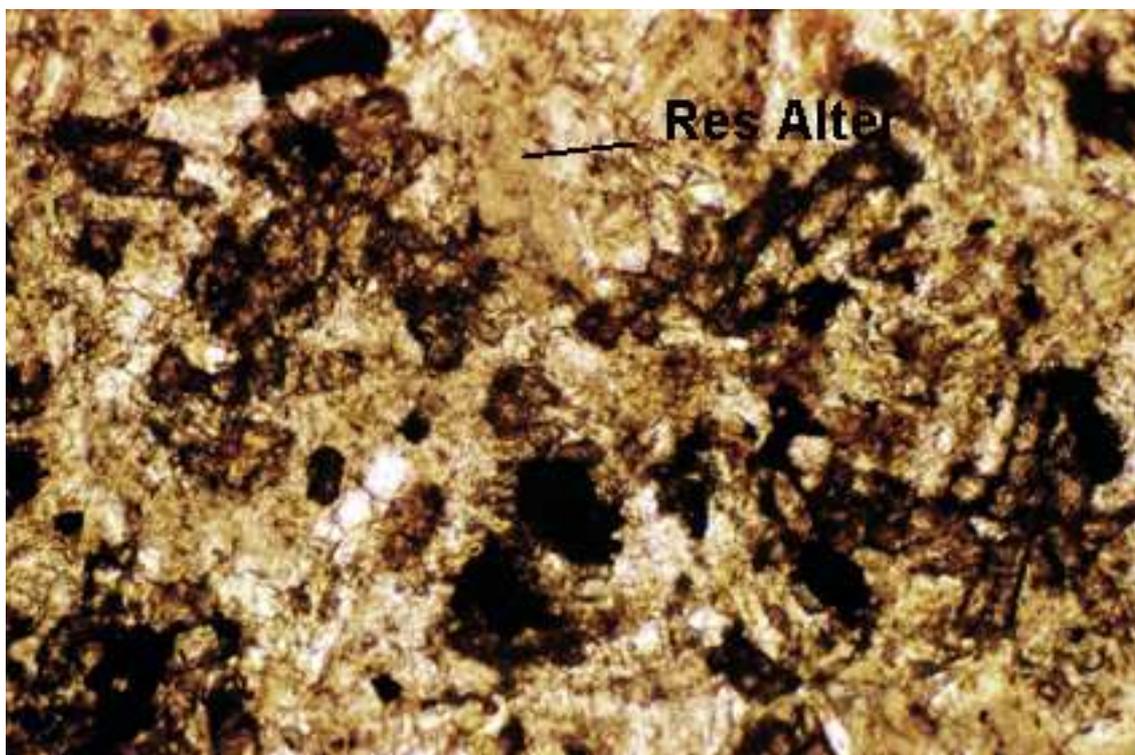


Foto da amostra n.º266; Luz natural (LN); ampliação 100X; Res Alter = resíduo de cristalização alterado

Amostra n.º 300**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza média com pontuações brancas
amostra úmida: cinza esverdeada a avermelhada

Estrutura: maciça
Textura: afanítica

Alteração: rocha sã
Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hipocristalina, microporfirítica, formada por raros microfenocristais de plagioclásio e minerais opacos, imersos numa matriz felsítica, com resíduos de cristalização e ripas de plagioclásio associado, muito alterado.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: como microfenocristais apresentam dimensão até 2,0mm, formas subédricas (grãos fragmentados) e com reação com a matriz (resíduos de cristalização). As ripas, de modo geral, se mostram muito alteradas (argilizadas) e também com corrosão pela matriz.

Minerais opacos: apresentam formas irregulares e quadradas (mais raramente acicular), com tamanho variando de 0,01 a 0,5mm. A alteração se mostra através de aureolas vermelhas de óxido/hidróxido de ferro.

Piroxênio: ocorre com grãos subédricos a anédricos, com aspecto de sombras, resultante do processo de absorção pela matriz ou da alteração (forte argilização e formação de pontuações de opacos).

Matriz quartzo-feldspática: representando a textura felsítica, com fraca alteração a argilo-minerais, superimposta.

Resíduos de cristalização: caracteriza-se por vidro recristalizado e aparecem como manchas distribuídas de forma uniforme junto com a matriz felsítica.

Alteração: rocha com incipiente alteração

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	15
Piroxênio	10
Minerais opacos	15
Matriz quartzo-feldspática	55
Vidro	5

Classificação petrográfica: andesito (pela cor e mineralogia), mas **dacito**, utilizando-se a classificação TAS.

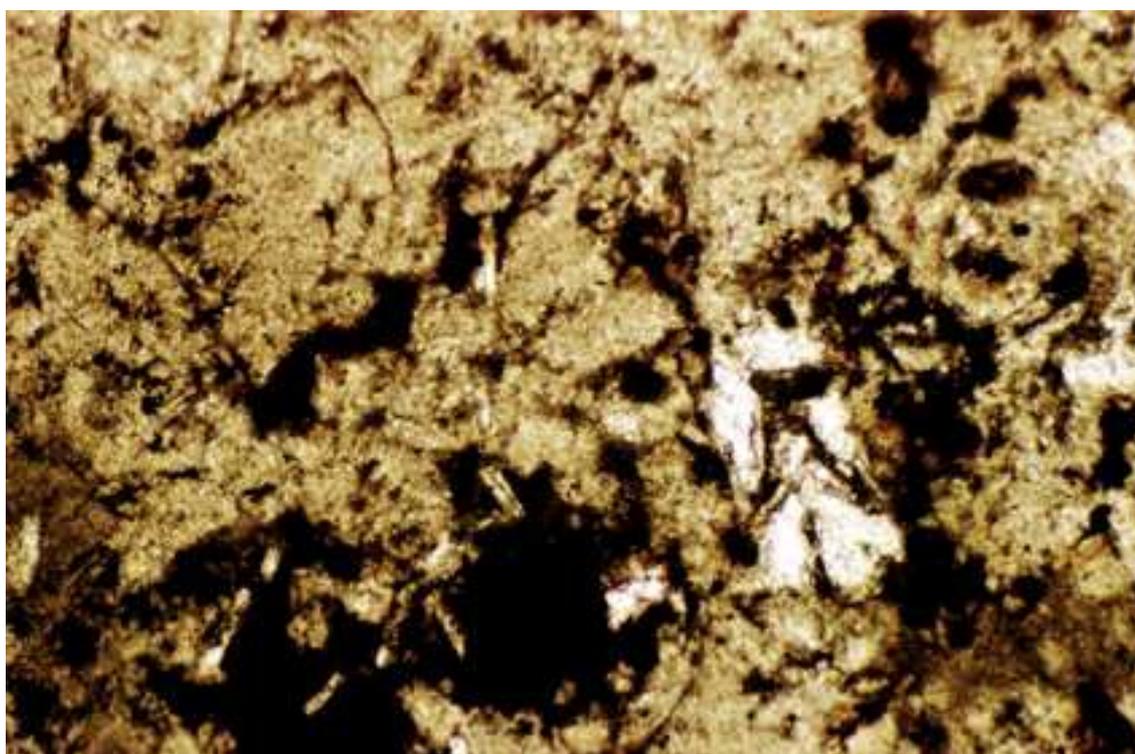


Foto da amostra n.º300; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 376**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: marrom esverdeado a avermelhado escuro com manchas vermelhas e pontuações verdes

amostra úmida: marrom avermelhado a preto

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha sã

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Rocha hipocristalina, onde a porção vítrea (resíduos de cristalização) encontra-se alterada a argilo-minerais de cor verde amarelada (pigmentados por óxido/hidróxidos de ferro), distribuída em forma de manchas isoladas, preenchendo os interstícios dos cristais (textura intersertal) Alguns dos grãos de minerais opacos se destacam pelo tamanho e dão à rocha uma textura microporfírica também.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: se apresenta como ripas curtas, de comprimento mais ou menos uniforme, e atingindo no máximo 0,3mm. Os cristais estão parcialmente argilizados (argilo-minerais de cor verde pálido).

Piroxênio: ocorrem sob a forma de grãos subédricos, com contornos indefinidos pela alteração superimposta que, por ser de mesma natureza do material intersertal (vidro recristalizado) não permite determinar uma dimensão para seus cristais.

Olivina: apresenta-se sob a forma de grãos arredondados e, embora ocorram com dimensões próximas às dos plagioclásios e piroxênios, são mais evidentes como microfenocristais. Todos os cristais apresentam fissuras intragranulares e estão muito pouco alterados, gerando material opaco e uma massa (hidróxidos de ferro) de cor vermelha e aspecto transparente.

Alteração: rocha medianamente alterada, com alteração distribuída de forma homogênea na rocha.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Percentual
Plagioclásio	25
Piroxênio	60
Minerais opacos	10
Olivina	5
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	traços

Classificação petrográfica: **basalto**

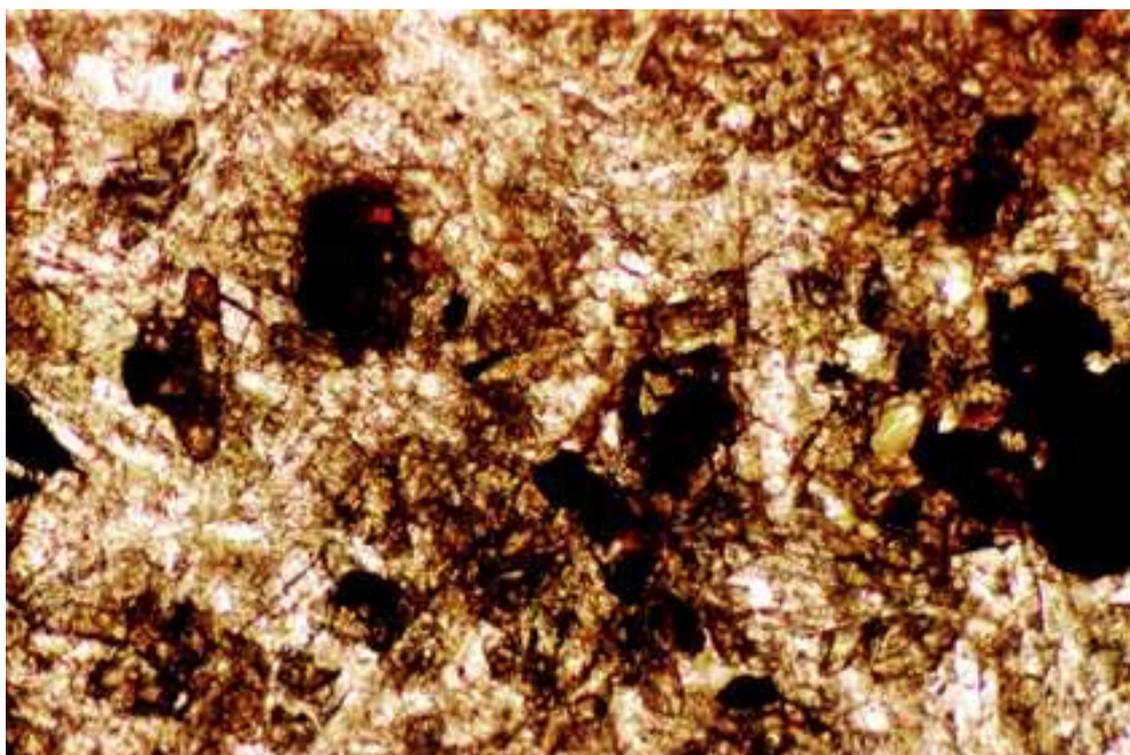


Foto da amostra n.º376; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 378**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza clara a cinza média com pontuações brancas

amostra úmida: cinza escura com pontuações brancas amareladas a esverdeadas

Estrutura: maciça

Textura: afanítica (comumente denominada “carijó”, salientada pela alteração)

Alteração: rocha sã a alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, onde a porção do vidro vulcânico (resíduos de cristalização) e a massa cristalina da rocha aparecem distribuídos homogeneamente, refletindo a textura macroscópica. O vidro representa as partes escuras da rocha e as porções cristalinas, a branca.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: aparece como ripas com comprimento da ordem de 0,1mm, quase sempre mergulhados no resíduo de cristalização e em reação com este.

Piroxênio: ocorre como cristais anédricos, particularmente devido aos contornos de reação também com o resíduo de cristalização. Alguns cristais podem chegar a medir 0,8mm de comprimento.

Intercrescimento quartzo-feldspático: tanto o quartzo como o feldspato alcalino se mostram como grãos anédricos e em contato irregular.

Minerais opacos: ocorrem disseminados em toda a rocha, desde minúsculas pontuações (menor do que 0,1mm) até grãos subédricos (quadrados) com 0,2mm de dimensão. As pontuações se dispõem em linha. Além disto os minerais opacos são os produtos de alteração dos piroxênios.

Vidro recristalizado: forma massas (piscinas), com forte reação (assimilação) com a parte cristalina.

Alteração: rocha pouco alterada, manifestada apenas pela presença de uma argilização de cor verde. Os minerais opacos apresentam, às vezes, áreas com formação de óxidos/hidróxidos de ferro vermelha e transparente.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	5
Piroxênio	5
Minerais opacos	15
Vidro recristalizado	40
Intercrescimento quartzo-feldspáticos	35

Classificação petrográfica: **dacito**

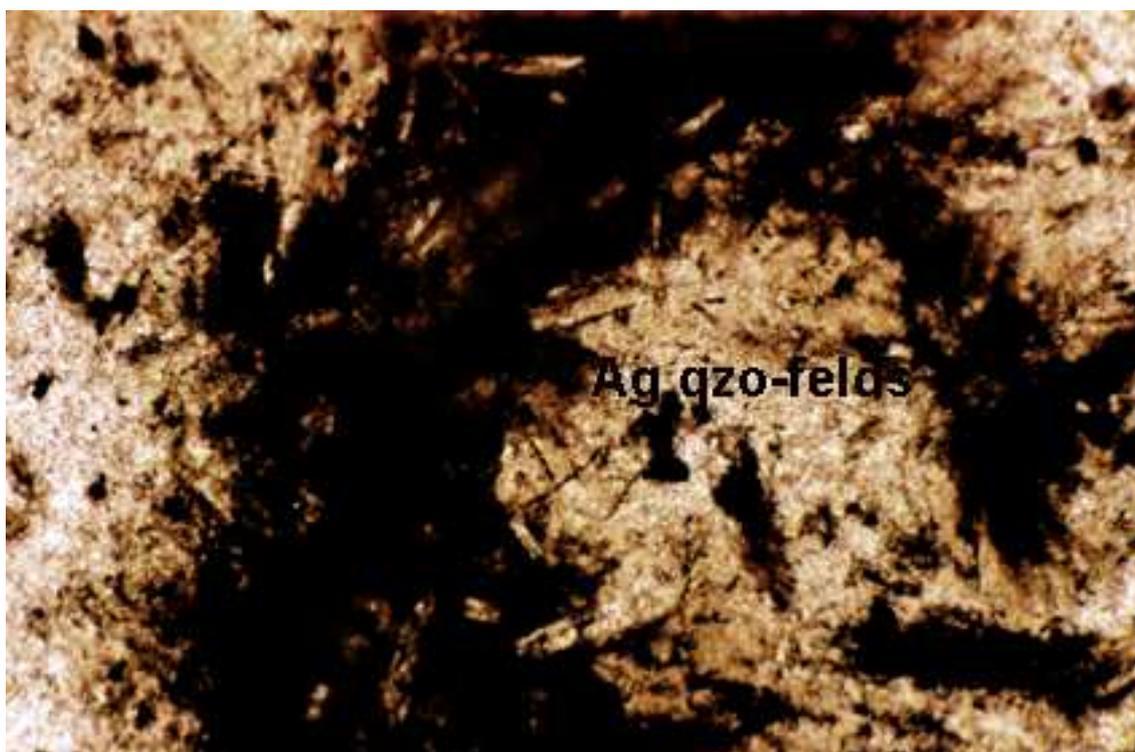


Foto da amostra n.º378; Luz natural (LN); ampliação 100X; Ag qzo-felds = agregado quartzo feldspático

Amostra n.º 390**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: verde

amostra úmida: cinza esverdeada escura

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha pouco alterada a alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, onde a parte vítrea (caracterizada como resíduos de cristalização) aparece como pequenas manchas de cor marrom escura (às vezes alterada a argilo-minerais verde amarelados), preenchendo os interstícios entre os minerais, de forma homogênea (textura intersertal). Os minerais opacos, pelo seu tamanho e forma de ocorrência, indicam também uma textura microporfirítica (microfenocristais de até 0,5mm) e poiquilítica (alguns grãos). Relacionado com a matriz, à textura intersertal se associa a textura intergranular. Presença ainda de raras amígdalas com contorno irregular e preenchidas por argilo-minerais verdes (tingidos nas bordas e centro por hidróxidos de ferro), e zeólitas(?).

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas alongadas, com comprimento médio de 0,3mm e frequentemente mostrando reação com a porção residual da rocha (vidro). Todos os grãos estão com alteração pouco incipiente a argilo-minerais de cor verde pálida.

Piroxênio: presentes como cristais anédricos de dimensões abaixo à dos plagioclásios, estão bastante alterados (argilizados).

Minerais opacos: formam grãos amebóides (os microfenocristais) ou ocorrem como “pontuações” de forma irregular a retangular, na massa. Alguns dos microfenocristais estão levemente alterados, com a liberação de óxidos de ferro vermelho nas bordas.

Vidro recristalizado: mostra forte processo de recristalização (palagonitização) e alteração a argilo-minerais de cor castanha.

Alteração: muito incipiente. A alteração, além das formas descritas, aparece como manchas de cor verde amarelada e pigmento de ferro, não possibilitando saber se é proveniente do piroxênio ou do vidro recristalizado.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	30
Piroxênio	40
Minerais opacos	10
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	20
Amígdalas	traços

Classificação petrográfica: **basalto**

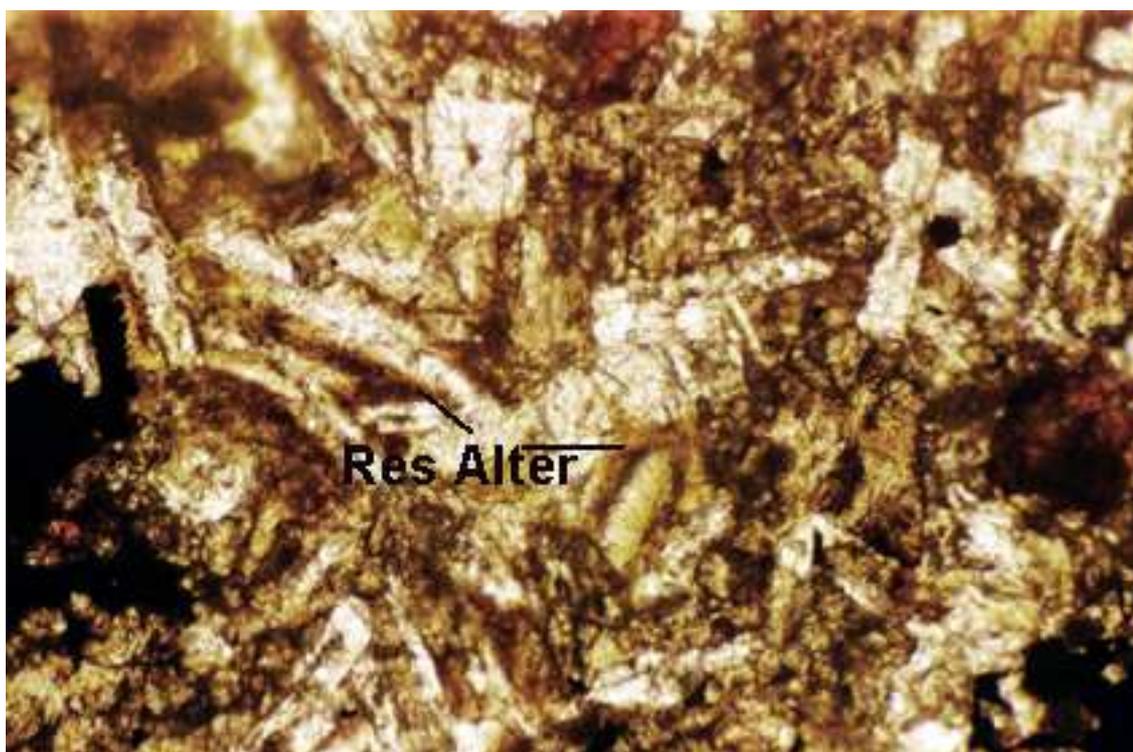


Foto da amostra n.º390; Luz natural (LN); ampliação 100X; Res Alter = resíduo de cristalização alterado

Amostra n.º 483**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza amarronzada escura com pontuações verdes
amostra úmida: marrom com pontuações verdes

Estrutura: maciça, porém se observa raras vesículas e amígdalas (preenchidas por massa de cor branca a verde)

Textura: afanítica

Alteração: rocha pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hipocristalina, onde o vidro (resíduos de cristalização) preenche os interstícios da parte cristalina da rocha, às vezes englobando as ripas de plagioclásio (textura hialofítica).

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre sob a forma de prismas retangulares de comprimento variável entre 0,1 a 1,0mm. As terminações dos cristais estão freqüentemente corroídas, mostrando uma reação com a parte vítrea. Todos os grãos estão pouco alterados no seu interior para argilo-minerais cor de palha.

Piroxênio: ocorrem raramente e sob a forma de cristais subédricos e fraturados. A alteração para argilo-minerais é disseminada por todo o grão.

Olivina: dispersa na rocha sob a forma de cristais arredondados, ou com forma irregular. Os cristais estão invariavelmente alterados ao longo de fissuras intragranulares, com a produção de massas opacas e hematita.

Vidro vulcânico: ocorre preenchendo os espaços intercrystalinos. Encontra-se totalmente modificado por recristalização (formação de minúsculos grãos de opacos) e/ou alteração a argilo-minerais. A cor marrom avermelhada mostrada em luz natural se deve provavelmente a pigmentação por óxido/hidróxidos de ferro.

Minerais opacos: além de serem produtos de alteração formando manchas que contornam outros minerais, aparecem disseminados como grãos de formato irregular mas com dimensão abaixo de 0,1mm.

Alteração: presente em toda a rocha, conforme descrita acima e sob a forma de manchas irregulares ou em pseudomorfose, de cor verde amarelada. Como sua ocorrência é expressiva ela forma, localmente, interconexões entre as manchas e amígdalas.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Percentual
Plagioclásio	45
Piroxênio	15
Minerais opacos	10
Olivina	traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	30
Amígdalas	traços

Classificação petrográfica: **basalto**

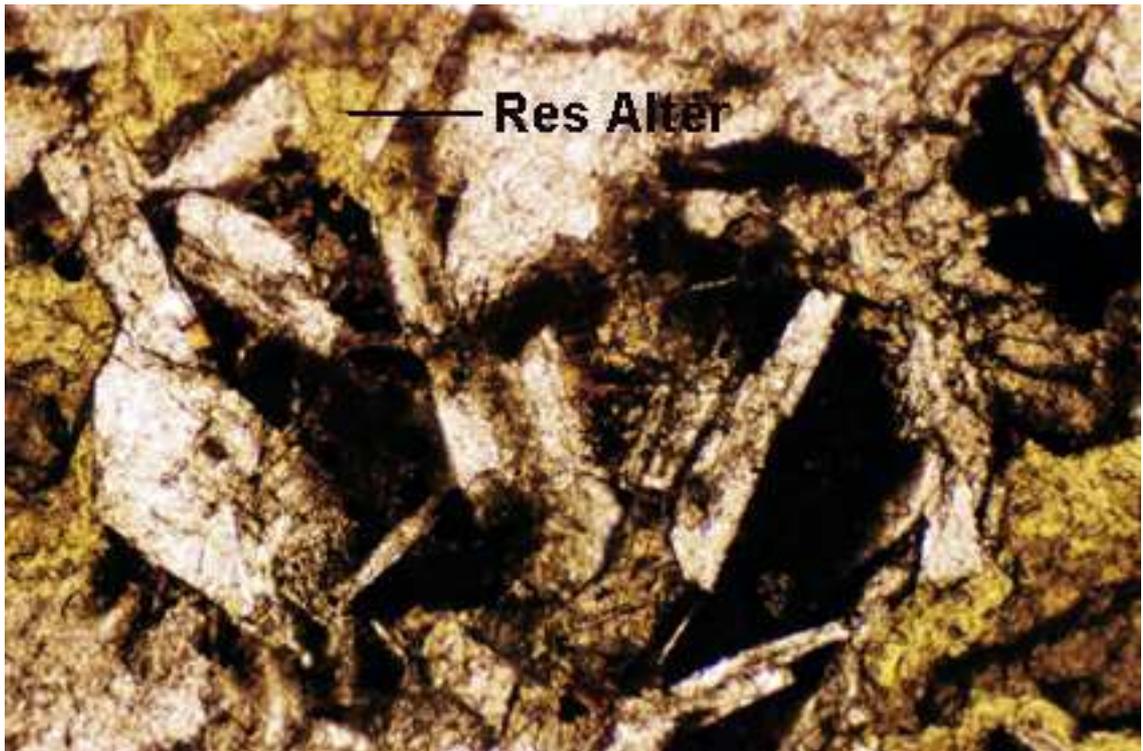


Foto da amostra n.º483; Luz natural (LN); ampliação 100X; Res Alter = resíduo de cristalização alterado

Amostra n.º 485**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza avermelhada a esverdeada escura

amostra úmida: marrom avermelhada a esverdeada escura

Estrutura: vesicular a amigdalóide, com vesículas de dimensões milimétricas e formatos irregulares, preenchidas parcial ou totalmente por massa branca (calcedônia ou argilo-minerais) e zeólitas

Textura: afanítica

Alteração: rocha pouco alterada a alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Rocha hemicristalina com porção vítrea (resíduos de cristalização) preenchendo os interstícios dos grumos de plagioclásio e piroxênio. A parte vítrea apresenta cor castanha avermelhada e é rica em cristalitos (acículas) e pontuações de minerais opacos. Secundariamente aparece a estrutura amigdalóide, com amígdalas de contorno circular ou amebóide e preenchida por argilo-minerais, calcedônia ou vidro. O vidro, parcialmente recristalizado e as amígdalas formam um sistema interconetado.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: forma ripas ou cristais retangulares, subédricos, com comprimento em torno de 0,3mm (grãos individuais). Alguns deles mostram contornos de reação com a parte vítrea. Estão em geral pouco alteradas, com produção de argilo-minerais castanhos a verdes pálidos.

Piroxênio: estão normalmente presentes na forma de grumos de grãos anédricos, com dimensões dos indivíduos próximas à dos plagioclásios. Apresenta-se pouco alterado, sendo a alteração representada por uma argilização de cor verde amarelada.

Olivina: ocorre como raros cristais de formato irregular, algo arredondados, e são marcadas pela intensa produção de material opaco nas bordas e nas fissuras intragranulares, oriundos da alteração. Esta alteração gera ainda pseudomorfos de argilo-minerais de cor verde forte a verde amarelada, acompanhada pela pigmentação vermelha a castanha escura de hidróxido de ferro.

Alteração: rocha alterada, marcada principalmente pelas interconexões do resíduo intersticial com as amígdalas.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	45
Piroxênio	15
Olivina	traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	25
Amígdalas	15

Classificação petrográfica: **basalto**

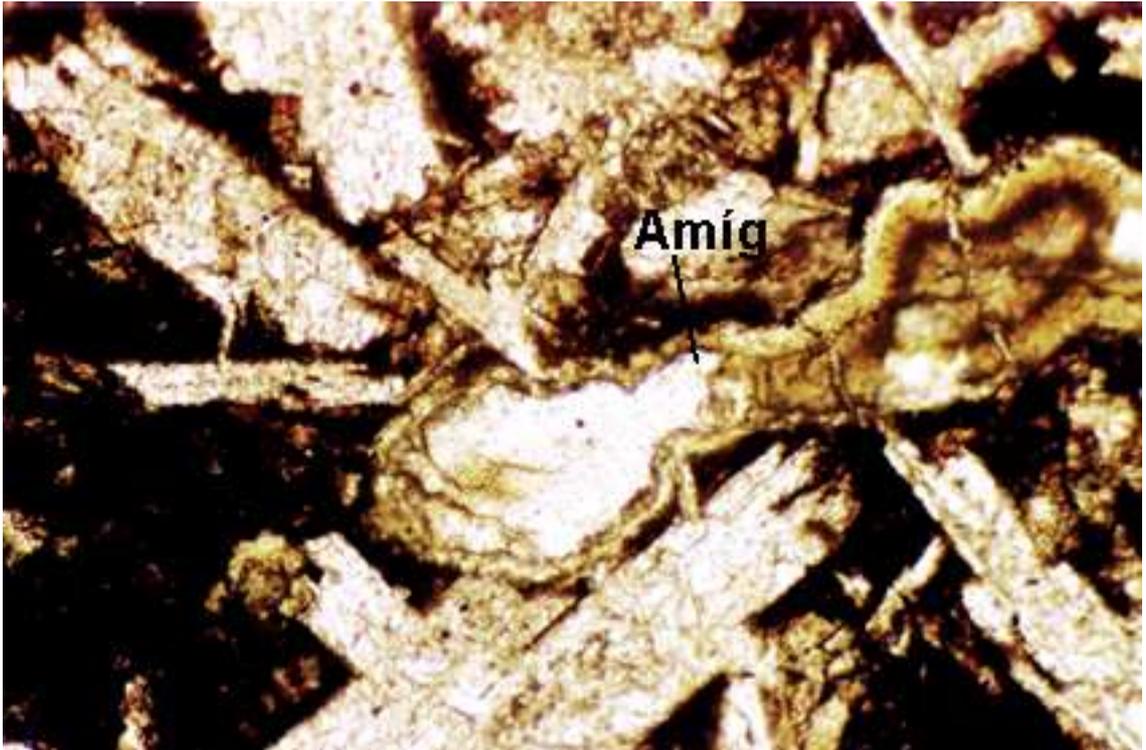


Foto da amostra n.º485; Luz natural (LN); ampliação 100X; Amíg = amígdala

Amostra n.º 504**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: verde amarronado
 amostra úmida: cinza esverdeada escura
 Estrutura: maciça a amigdalóide
 Textura: afanítica
 Alteração: rocha pouco alterada a alterada
 Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, onde a parte vítrea (caracterizada como resíduos de cristalização) aparece como pequenas manchas de cor castanha clara a castanha escura, preenchendo os interstícios entre os minerais, de forma homogênea (textura intersertal). Os minerais opacos, pelo seu tamanho e forma de ocorrência, indicam também uma textura microporfirítica (microfenocristais de até 0,5mm) e poiquilítica (alguns grãos). Relacionado com a matriz, à textura intersertal se associa a textura intergranular. A rocha apresenta ainda estrutura amigdaloidal, com amígdalas de diâmetro milimétrico, de formato amebóide, às vezes interconectadas, e preenchidas por argilo-minerais de cor verde amarelada e vidro recristalizado (na porção mais interna de algumas).

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas curtas (com comprimento médio de 0,1mm), ou cristais retangulares subédricos (entre 0,2 e 1,0mm de comprimento), e freqüentemente mostrando reação com a porção residual da rocha (vidro). Todos os grãos estão com alteração pouco incipiente a argilo-minerais de cor verde pálida.

Piroxênio: presentes como cristais anédricos, de dimensões semelhante à dos plagioclásios, ou então formando glómeros; estão bastante alterados (argilizados).

Olivina: grãos com dimensões pouco acima dos plagioclásios, alteradas a argilo-minerais de cor verde amarelada.

Minerais opacos: formam grãos amebóides (os microfenocristais) ou ocorrem como “pontuações” de forma irregular a retangular, na matriz. Alguns dos microfenocristais estão levemente alterados, com a liberação de óxidos de ferro vermelho nas bordas.

Vidro vulcânico: mostra forte processo de recristalização (palagonitização) e alteração a argilo-minerais de cor castanha.

Alteração: rocha muito alterada, principalmente pelo aspecto de interconexão das amígdalas com a parte residual, também alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	38
Piroxênio	10
Minerais opacos	20
Olivina	traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	22
Amígdalas	10

Classificação petrográfica: **basalto**

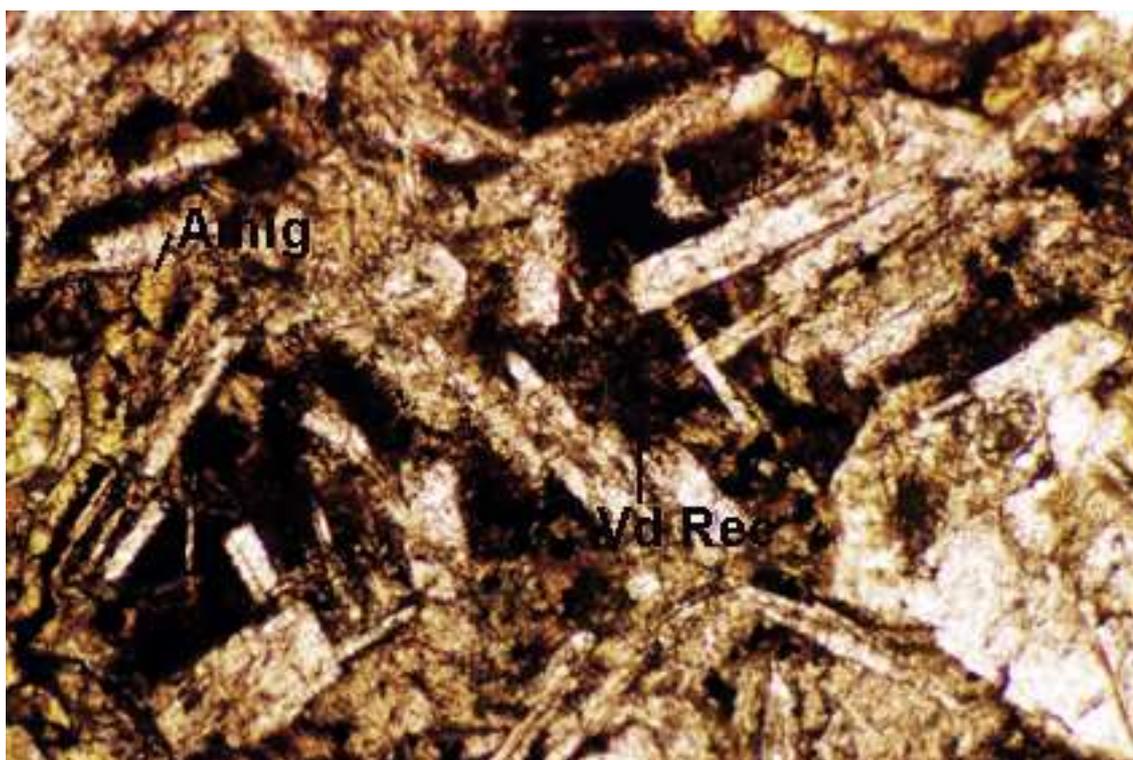


Foto da amostra n.º504; Luz natural (LN); ampliação 100X; Amíg = amígdala; Vd Rec = vidro recristalizado

Amostra n.º 515**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza esverdeada escura com manchas vermelhas

amostra úmida: preta com manchas vermelhas

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha sã a pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, com porção vítrea representando resíduos de cristalização, que se dispõe nos interstícios dos grãos, e que está invariavelmente alterada a argilo-minerais de cor verde forte, verde amarelada ou castanha. A maior parte da rocha é, no entanto, constituída pela textura intergranular. Presença de fissuras intergranular, preenchidas por argilo-minerais verdes amarelados e castanhos.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre, na maioria, sob a forma de ripas, ou então, como prismas retangulares curtos (comprimento médio de 0,1 a 0,2mm). Às vezes se agrupam, formando feixes ou apresentam aspecto poiquilítico (podendo chegar a 0,8mm), englobando outros minerais. Os cristais são pouco alterados, com formação de argilo-minerais verdes pálidos. Presença de algumas fissuras intragranulares.

Piroxênio: grãos anédricos, sempre pouco alterados, com a formação de produtos argilosos de cor castanha avermelhada e óxido de ferro.

Olivina: apresenta-se como cristais subédricos, algo arredondados e sempre bastante fissurados. Formam grãos maiores do que os de plagioclásios (em torno de 0,3mm, podendo chegar a 0,8mm). Está parcial a totalmente alterada, com a formação de argilo-minerais verde a amarelos, com pigmentação vermelha.

Minerais opacos: formas irregulares a amebóides, englobando, muitas vezes, os plagioclásios e os piroxênios, dando um aspecto poiquilítico à rocha.

Alteração: incipiente, presente em toda a rocha e de forma homogênea.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Percentual
Plagioclásio	20
Piroxênio	60
Minerais opacos	15
Olivina	traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	5

Classificação petrográfica: **basalto**

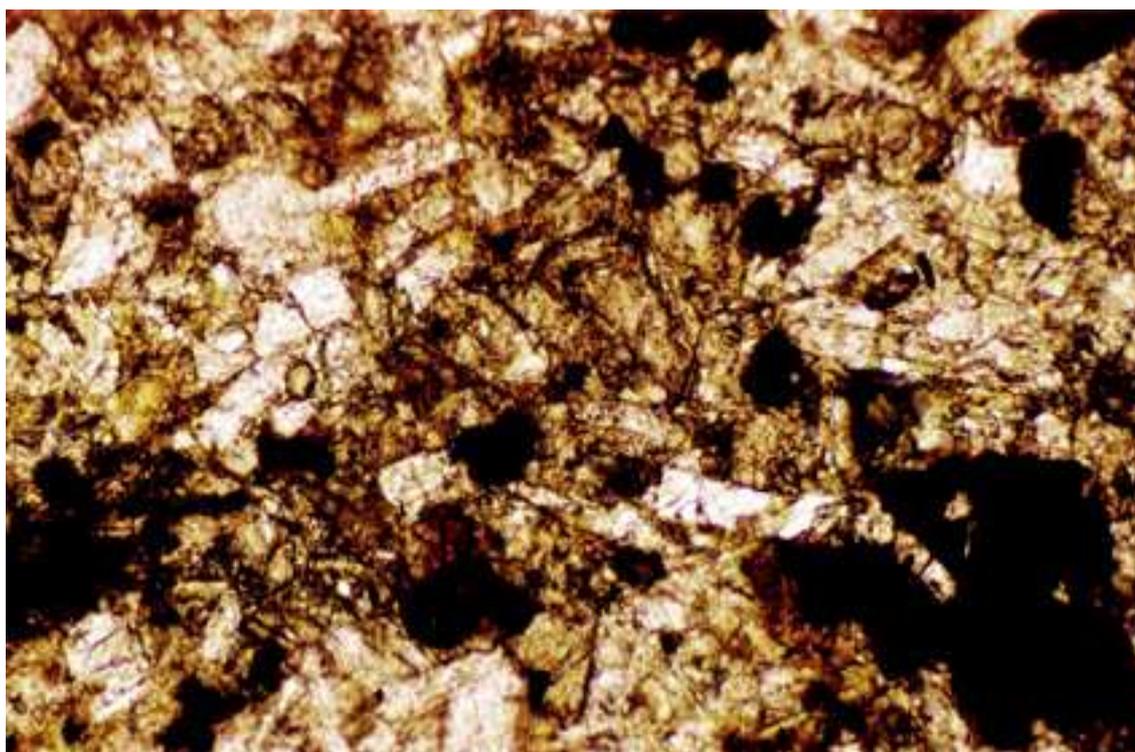


Foto da amostra n.º515; Luz natural (LN); ampliação 100X

Amostra n.º 545**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: marrom avermelhada com pigmentos esverdeados

amostra úmida: marrom avermelhada

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha pouco alterada a alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura homo a hemicristalina, com a porção vítrea (resíduos de cristalização) presente apenas localmente, preenchendo os interstícios granulares. A textura predominante é a granular, constituída por grãos de plagioclásio, piroxênio e minerais opacos. Contorno dos cristais mal definido devido à reação com a parte residual e alteração superimposta.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre na forma de pequenos cristais, com comprimento da ordem de 0,1mm. Estão invariavelmente alterados, com a geração de argilo-minerais de cor verde pálido e apresentam contorno de reação com a porção residual vítrea.

Piroxênio: normalmente são anédricos, com dimensões próximas à dos plagioclásios. A alteração é muito incipiente, com produção de argilo-minerais castanhos e verdes amarelados, e liberação de ferro.

Minerais opacos: mostram contornos mais ou menos límpidos, às vezes difuso, devido à reação com os resíduos de cristalização. Também liberam pigmento avermelhado quando alterados.

Resíduos de cristalização: também se mostram alterados, com a produção de argilo-minerais de cor castanha e verde amarelada, em intensidade variável, podendo formar pequenas manchas.

Alteração: rocha alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	30
Piroxênio	60
Minerais opacos	5
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	5

Classificação petrográfica: **basalto**

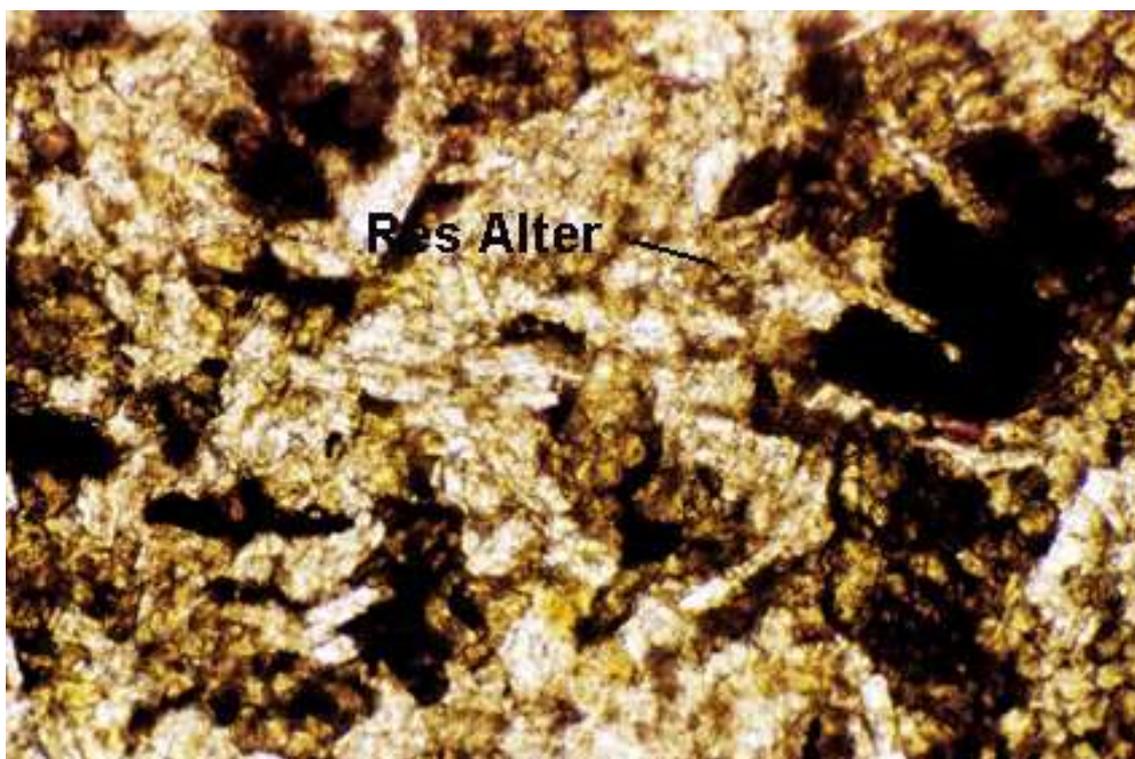


Foto da amostra n.º545; Luz natural (LN); ampliação 100X; Res Alter = resíduo de cristalização alterado

Amostra n.º 634**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza amarronada a esverdeada escura
 amostra úmida: marrom avermelhada com pontuações verdes
 Estrutura: maciça
 Textura: afanítica
 Alteração: rocha pouco alterada
 Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hipocristalina, onde a porção vítrea está representada por material de cor castanha escura, muito argilizado e com inúmeras pontuações de minerais opacos. Esta parte vítrea é irregularmente distribuída na rocha e ocorre preenchendo os interstícios (textura intersertal), ou em pequenas manchas envolvendo as ripas de plagioclásio (textura hialofítica). Associado a este material aparecem várias amígdalas de formato amebóide e preenchida por banda de argilo-minerais de cor verde amarelada (na porção mais externa) e calcedônia ou vidro (estrutura fibroradiada) alterado, no centro. Todo o conjunto forma uma espécie de cimento entre as ripas de plagioclásio e olivina.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre sob a forma de ripas curtas, com comprimento máximo de 0,8mm. Estão desde pouco até moderadamente alterados com a formação de material argiloso de cor marrom fraco. Alguns grãos parecem apresentar início de sericitização.

Piroxênio: os raros grãos presentes ocorrem são anédricos e com alteração a argilo-minerais de cor verde amarelada fraca.

Olivina: apresenta-se na forma de grãos arredondados, às vezes em grumos e os cristais atingem até 1,0mm de diâmetro. Estão pouco alteradas a argilo-minerais de cor verde ou marrom fraco, mas com fissuras intragranulares normalmente pigmentadas de vermelho, que permeia também por outros minerais e a porção vítrea.

Alteração: rocha alterada. Além da formação de argilo-minerais se observa intensa pigmentação por óxidos/hidróxidos de ferro, vermelhas.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	30
Piroxênio	30
Minerais opacos	5
Olivina	traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	25
Amígdalas	10

Classificação petrográfica: **basalto**

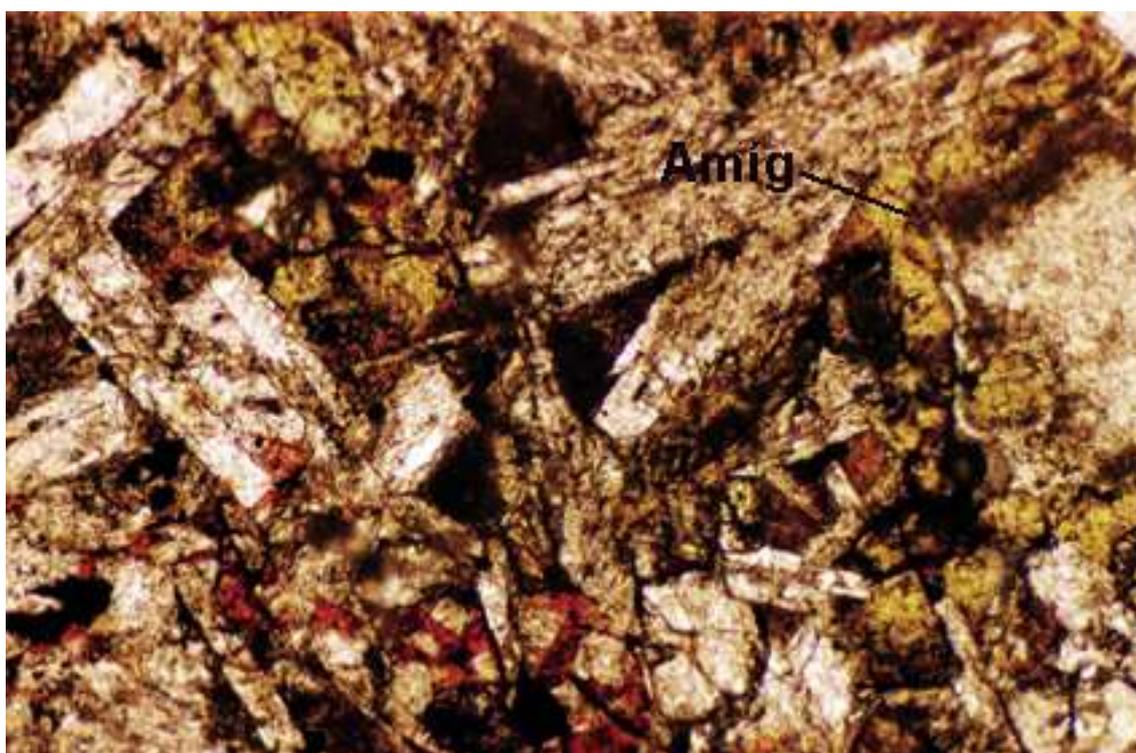


Foto da amostra n.º634; Luz natural (LN); ampliação 100X; Amíg = amígdala

Amostra n.º 651**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: marrom esverdeada

amostra úmida: marrom avermelhada escura

Estrutura: maciça

Textura: afanítica

Alteração: rocha sã a pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura homo a hemicristalina, com a porção vítrea (resíduos de cristalização) presente apenas localmente, preenchendo os interstícios granulares. A textura predominante é a granular, constituída por grãos de plagioclásio, piroxênio e minerais opacos. Contorno dos cristais mal definido devido à reação com a parte residual e alteração superimposta.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas e grãos anédricos, apresentando comprimento médio de 0,2mm, podendo chegar a 0,5mm. Estão invariavelmente alterados, com a geração de argilo-minerais de cor verde pálido.

Piroxênio: normalmente são anédricos, com dimensões inferiores (0,1mm) à dos plagioclásios. Raramente ocorrem ainda como grãos alongados, mas fissurados, podendo atingir , então, 3mm. A alteração é muito incipiente, com produção de argilo-minerais castanhos e verdes amarelados, e liberação de ferro.

Minerais opacos: mostram contornos mais ou menos límpidos, mas, às vezes difuso devido à reação com os resíduos de cristalização. Também liberam pigmento avermelhado quando alterados.

Vidro recristalizado: mostra-se alterado, com a produção de argilo-minerais de cor castanha a marrom, em intensidade variável, podendo formar pequenas manchas verdes amareladas.

Alteração: rocha incipientemente alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	40
Piroxênio	35
Minerais opacos	15
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	10

Classificação petrográfica: **basalto**

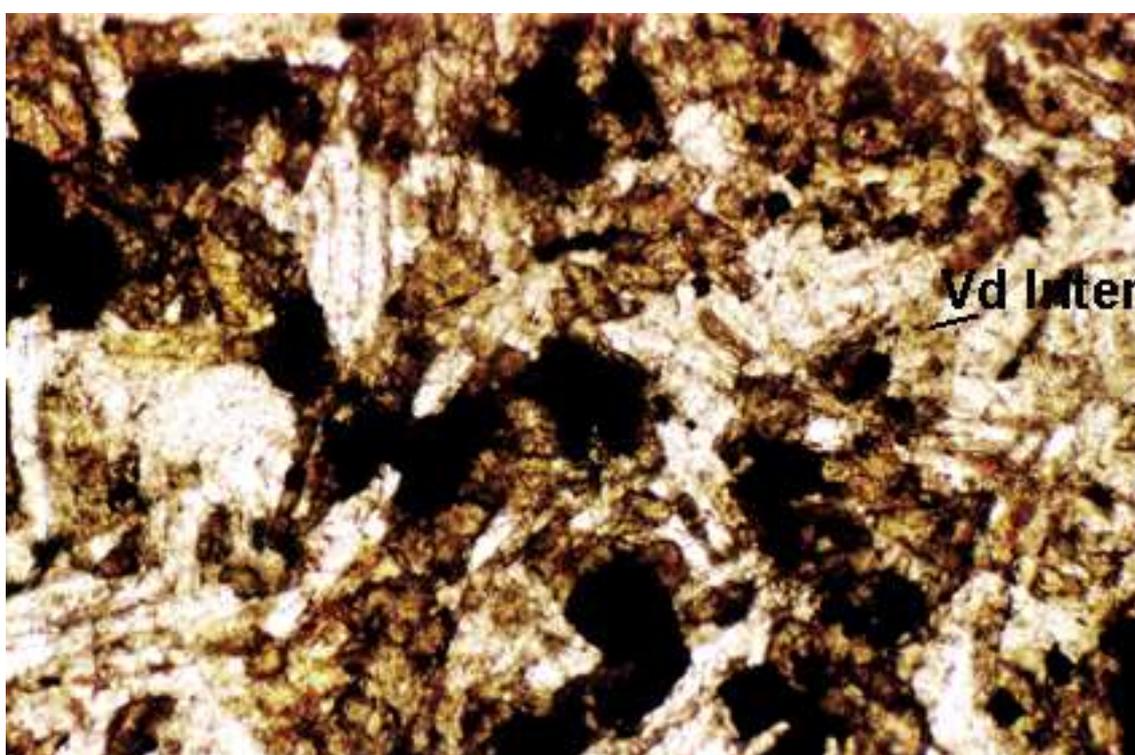


Foto da amostra n.º651; Luz natural (LN); ampliação 100X; Vd Inter = vidro intersticial

Amostra n.º 652**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: castanha avermelhada escura a verde escura
 amostra úmida: castanha avermelhada escura a verde escura
 Estrutura: maciça
 Textura: afanítica
 Alteração: rocha pouco alterada
 Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hipocristalina representada pela presença de vidro vulcânico recristalizado (palagonitizado) junto aos interstícios da parte cristalina da rocha (textura intersertal). Subordinadamente aparece a textura poiquilítica dada por alguns cristais de minerais opacos.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como prismas retangulares curtos e grãos anédricos (tamanho máximo de 1,0mm). Os cristais estão normalmente corroídos nas faces laterais e principalmente nas terminações devido à reação com a parte vítrea, sendo, às vezes, totalmente assimilados por esta. Apresentam ainda fraturas intragranulares e uma alteração a argilo-minerais pouco incipiente e distribuída heterogeneamente.

Piroxênio: ocorre raramente como cristais anédricos, invariavelmente fissurados e com incipiente alteração a argilo-minerais (substituição pseudomórfica).

Olivina: grãos de forma arredondada ou anédricos, sempre fissurados e com dimensão máxima de 0,6mm. Apresentam incipiente alteração, com a geração também de argilo-minerais e minerais opacos.

Minerais opacos: apresenta-se como grãos de formato irregular (dimensão até 1,0mm) e como produtos de alteração da olivina. Normalmente possuem as bordas alteradas, havendo produção de material vermelho transparente (hematita), que colore e salienta as fissuras da rocha.

Alteração: rocha com incipiente alteração, com produtos de alteração se mostrando interconetado com as fissuras intragranulares.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	38
Piroxênio	27
Minerais opacos	25
Olivina	Traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	10

Classificação petrográfica: **basalto**

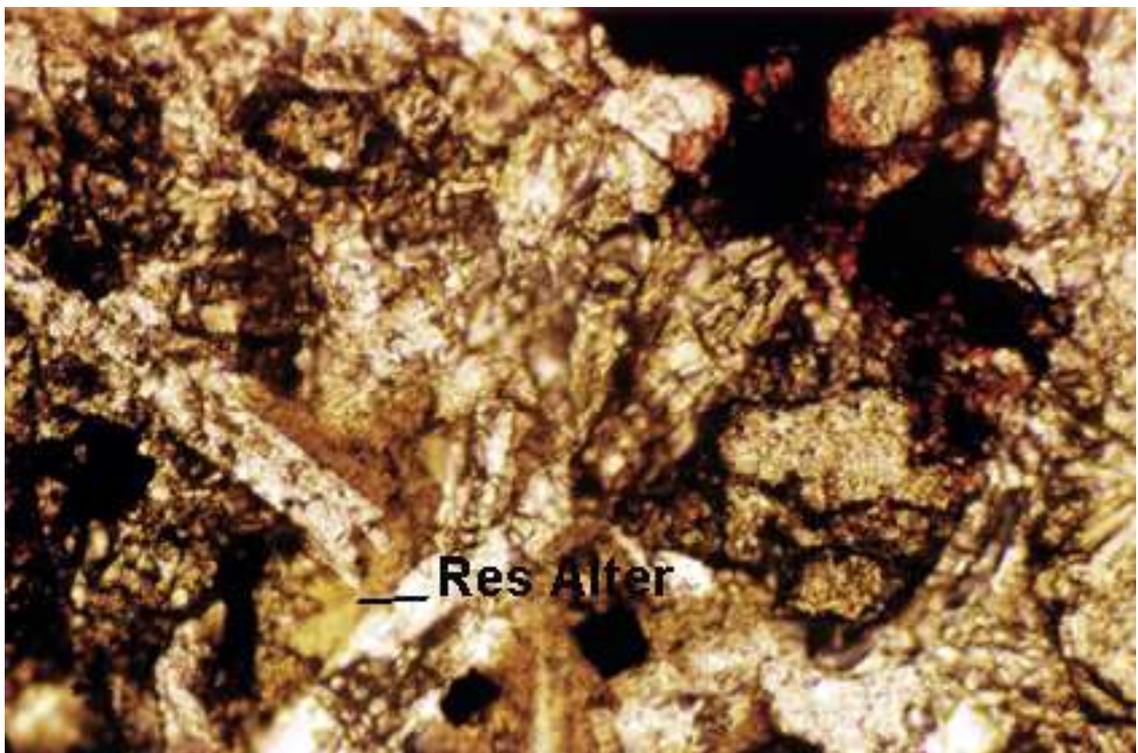


Foto da amostra n.º652; Luz natural (LN); ampliação 100X; Res Alter = resíduo de cristalização alterado

Amostra n.º 653**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: marrom esverdeada escura
 amostra úmida: preta com manchas vermelhas
 Estrutura: maciça
 Textura: afanítica
 Alteração: rocha pouco alterada
 Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, com a parte vítrea (palagonitizada) preenchendo os interstícios (textura intersertal), ou formando pequenas manchas de cor marrom e parcial ou totalmente alterada a argilo-minerais de cor verde amarelada (agregados fibrorradiados).

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorrem na forma de ripas ou cristais retangulares subédricos (comprimento variável de 0,1mm a pouco mais de 1,0mm). Estão pouco alterados, com a formação de argilo-minerais verde claro e, às vezes, sericitizados. Presença de algumas fissuras intragranulares.

Piroxênio: aparece como cristais anédricos a subédricos e pouco alterados (formação de argilo-minerais verdes amarelados principalmente nas bordas). Tamanho dos grãos gira em torno de 0,5mm.

Olivina: presente na forma de grãos subarredondados (dimensões semelhantes à dos piroxênios), com fissuras intragranulares e normalmente pouco alterados (os raros cristais alterados formam argilo-minerais de cor verde amarelada no centro, e pigmentação vermelha nas bordas e fissuras).

Minerais opacos: formam grãos amebóides ou ocorrem como “pontuações” de forma irregular a retangular, na matriz. A maioria dos cristais está levemente alterados, com a liberação de óxidos de ferro vermelho nas bordas.

Alteração: rocha pouco alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Percentual
Plagioclásio	32
Piroxênio	50
Minerais opacos	18
Olivina	traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	traços
Amígdalas	traços

Classificação petrográfica: **basalto**

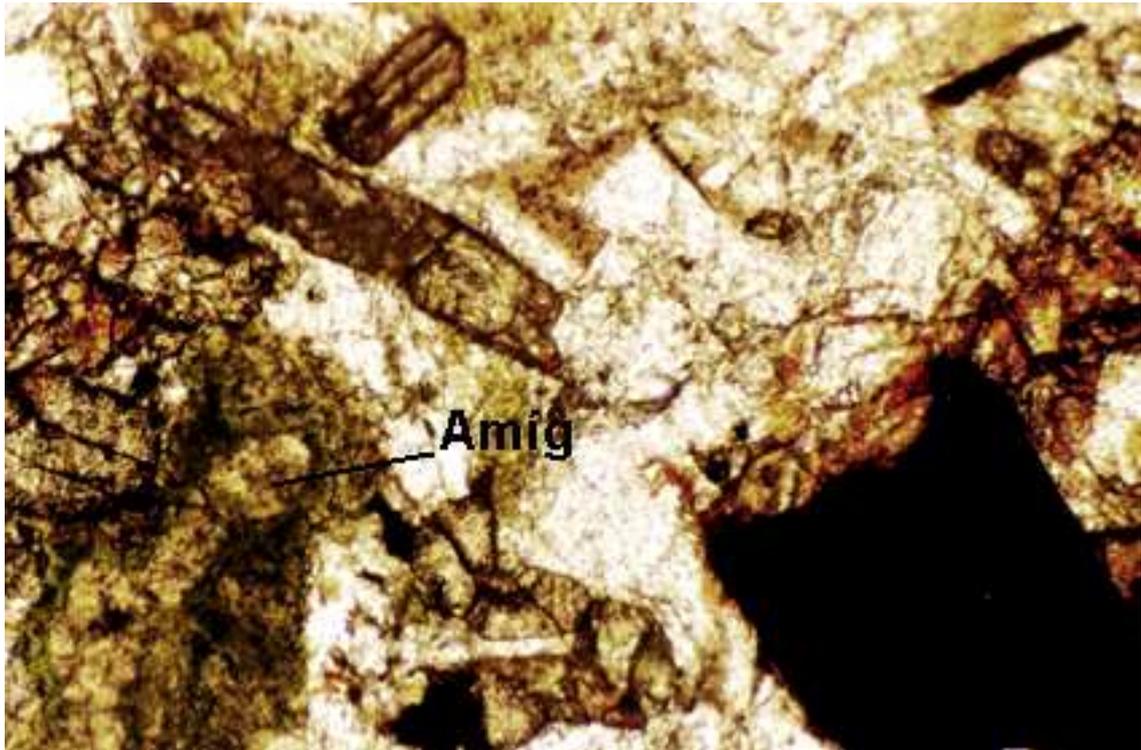


Foto da amostra n.º653; Luz natural (LN); ampliação 100X; Amíg = amígdala

Amostra n.º 654**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza médio com pontuações brancas

amostra úmida: cinza médio com pontuações brancas

Estrutura: maciça

Textura: afanítica (comumente denominada “carijó”)

Alteração: rocha sã a pouco alterada

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, com a porção cristalina representada por alguns poucos cristais euédricos de plagioclásio, piroxênios e minerais opacos. O restante da rocha é formado por uma massa de natureza vítrea, recristalizada heterogeneamente na forma de manchas de cor marrom clara e cinza escura (texturas felsítica, granofírica e esferulítica).

Composição Mineralógica

Parte cristalina: composta por cristais de plagioclásio, piroxênio e minerais opacos, sendo que o plagioclásio e o piroxênio se apresentam como grãos euédricos (às vezes em grumos, no caso do plagioclásio), mas com bordas de reação e quase sempre fragmentados. A dimensão dos grãos destes minerais pode chegar a 2,0mm. Ambos mostram alteração a argilo-minerais, sendo que a dos plagioclásios é de cor verde pálido e a do piroxênio verde amarelada. Os minerais opacos também se apresentam alterados, com a liberação de pigmento vermelho.

Parte vítrea: aparece como massas com graus de recristalização não uniforme. A recristalização gera agregados quartzo-feldspáticos, acompanhados por pontuações e cristálitos de minerais opacos.

Alteração: rocha pouco alterada.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Parte cristalina	27
Vidro recristalizado	53
Agregados quartzo-feldspáticos	20

Classificação petrográfica: **andesito basáltico**

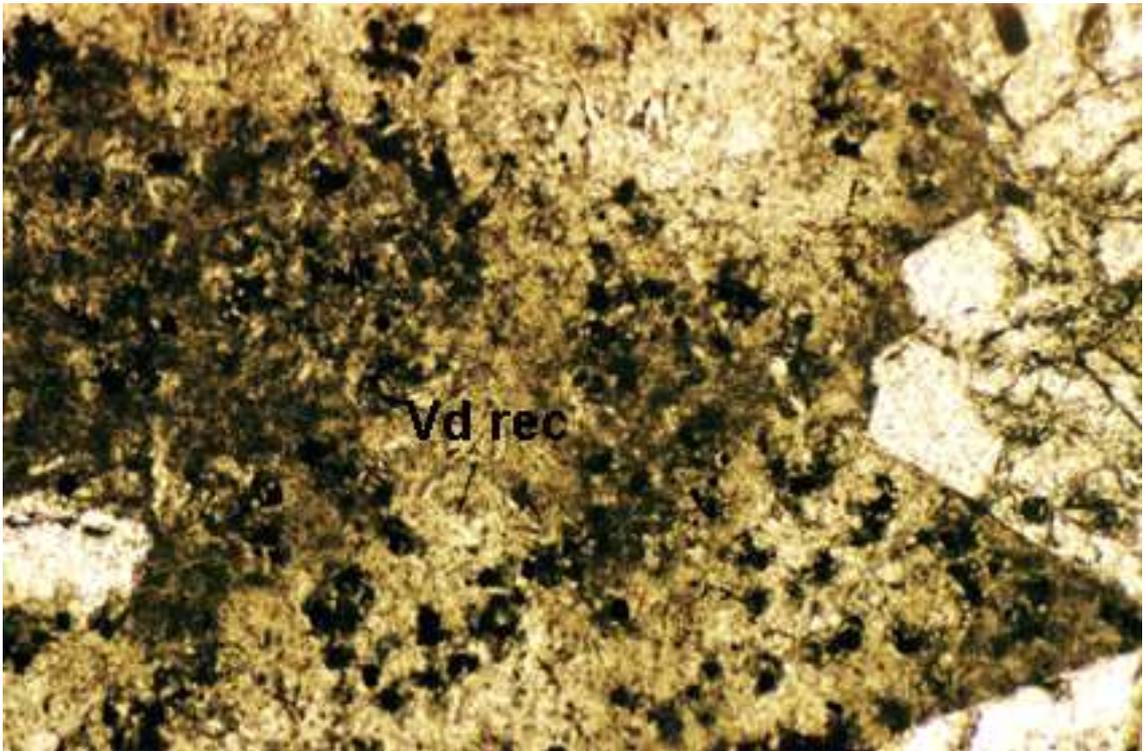


Foto da amostra n.º654; Luz natural (LN); ampliação 100X; Vd rec = vidro recristalizado

Amostra n.º 684**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA**

Cor amostra seca: cinza esverdeada a amarronada média
 amostra úmida: marrom com pequenas manchas verdes
 Estrutura: maciça
 Textura: afanítica
 Alteração: rocha pouco alterada
 Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente

DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

Textura hemicristalina, predominantemente intergranular, com material vítreo ocupando apenas raros interstícios intermineralógico. A textura dominante é a intergranular.

Composição Mineralógica

Plagioclásio: ocorre como ripas e prismas curtos (comprimento variável de 0,1 a 0,9mm). Todos os grãos estão pouco alterados (argilização de cor verde pálida).

Piroxênio: cristais subédricos e pouco alterados (alguns deles mostram apenas liberação de pigmento de ferro e produção de material opaco).

Olivina: grãos de contorno irregular a arredondados, invariavelmente fissurados. As fissuras encontram-se frequentemente preenchidas por minerais opacos e hidróxidos de ferro (material de cor vermelha e transparente), que pigmenta os cristais em volta.

Minerais opacos: ocorrem na forma de pontuações (produto de alteração) e prismas subédricos.

Vidro recristalizado: apresenta-se localmente alterados a argilo-minerais verdes.

Alteração: rocha sã.

Composição Modal:

Constituintes	Avaliação Porcentual
Plagioclásio	45
Piroxênio	15
Minerais opacos	traços
Olivina	traços
Vidro recristalizado (Resíduos de cristalização)	25
Amígdalas	15

Classificação petrográfica: **andesito basáltico**

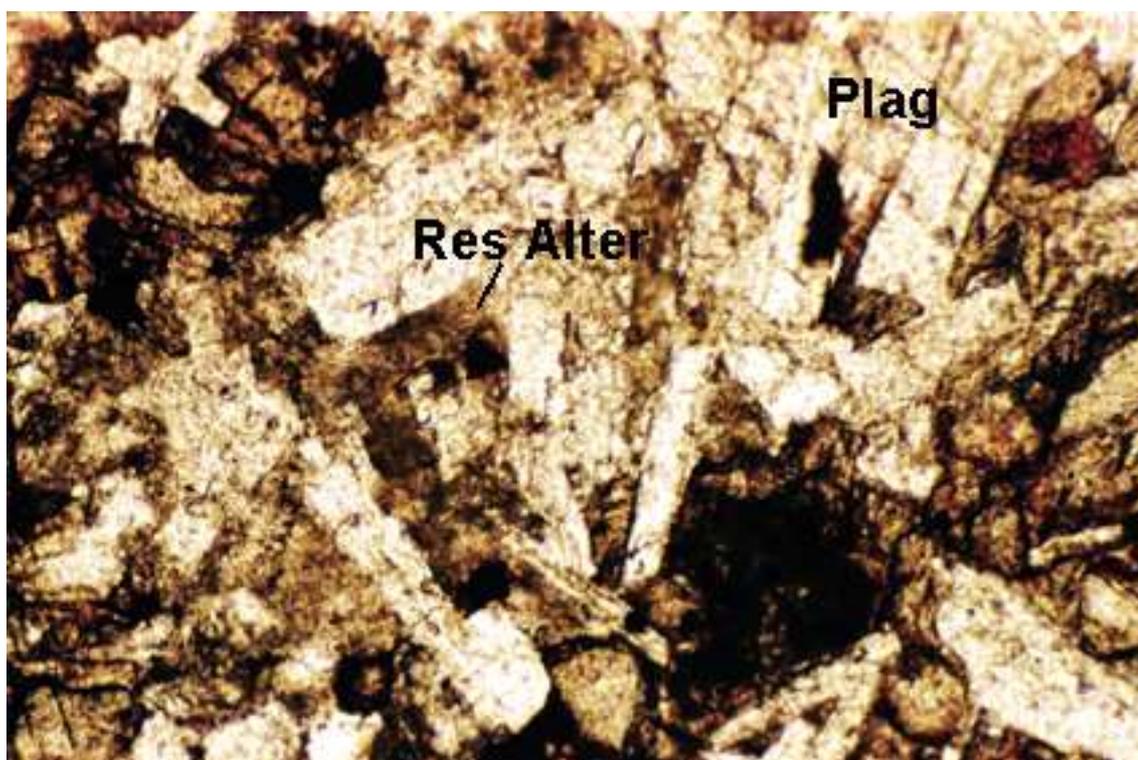
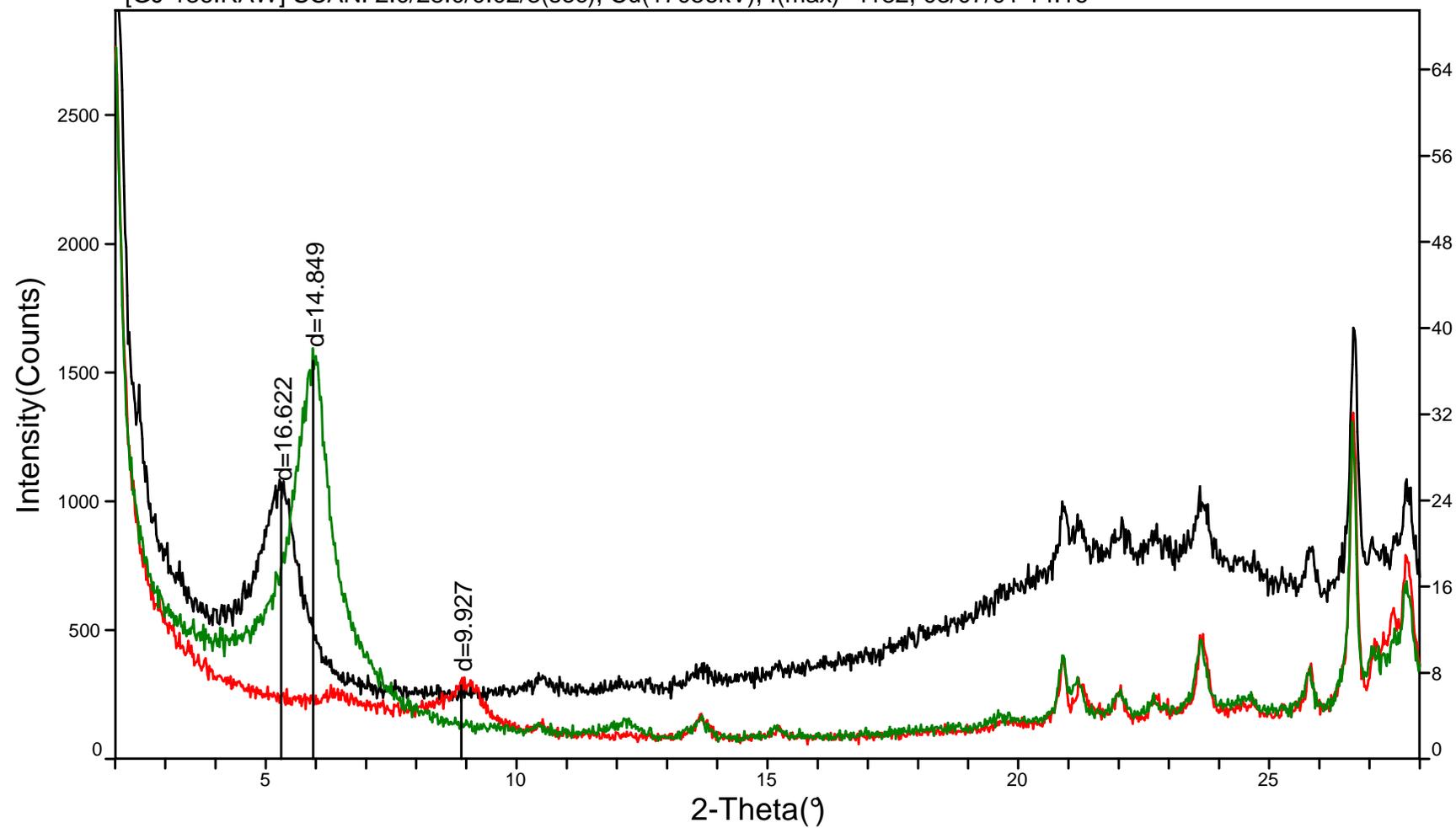


Foto da amostra n.º684; Luz natural (LN); ampliação 100X; Res Alter = resíduo de cristalização alterado; Plag = cristal de plagioclásio

[NJ-136.RAW] SCAN: 2.0/28.0/0.02/2(sec), Cu(17056kV), I(max)=2769, 03/07/01 12:02

[CJ-136.RAW] SCAN: 2.0/28.0/0.02/2(sec), Cu(17056kV), I(max)=2773, 03/09/01 12:31

[GJ-136.RAW] SCAN: 2.0/28.0/0.02/3(sec), Cu(17056kV), I(max)=4182, 03/07/01 14:16

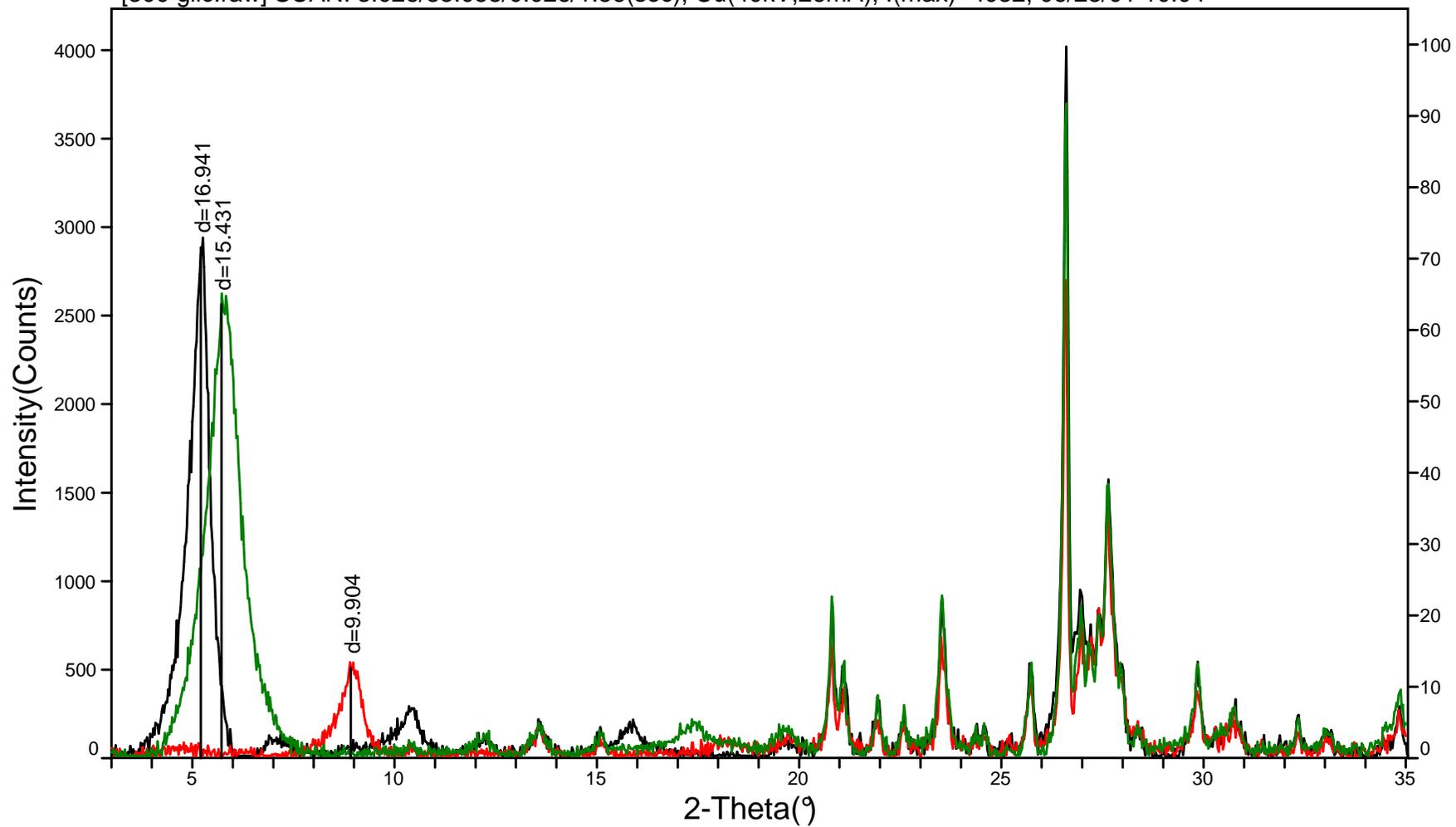


Difratograma da amostra n.º136.

[300.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=3707, 05/23/01 11:08

[300 calcin.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2705, 07/09/01 11:57

[300 glic.raw] SCAN: 3.026/35.058/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=4032, 06/28/01 10:04

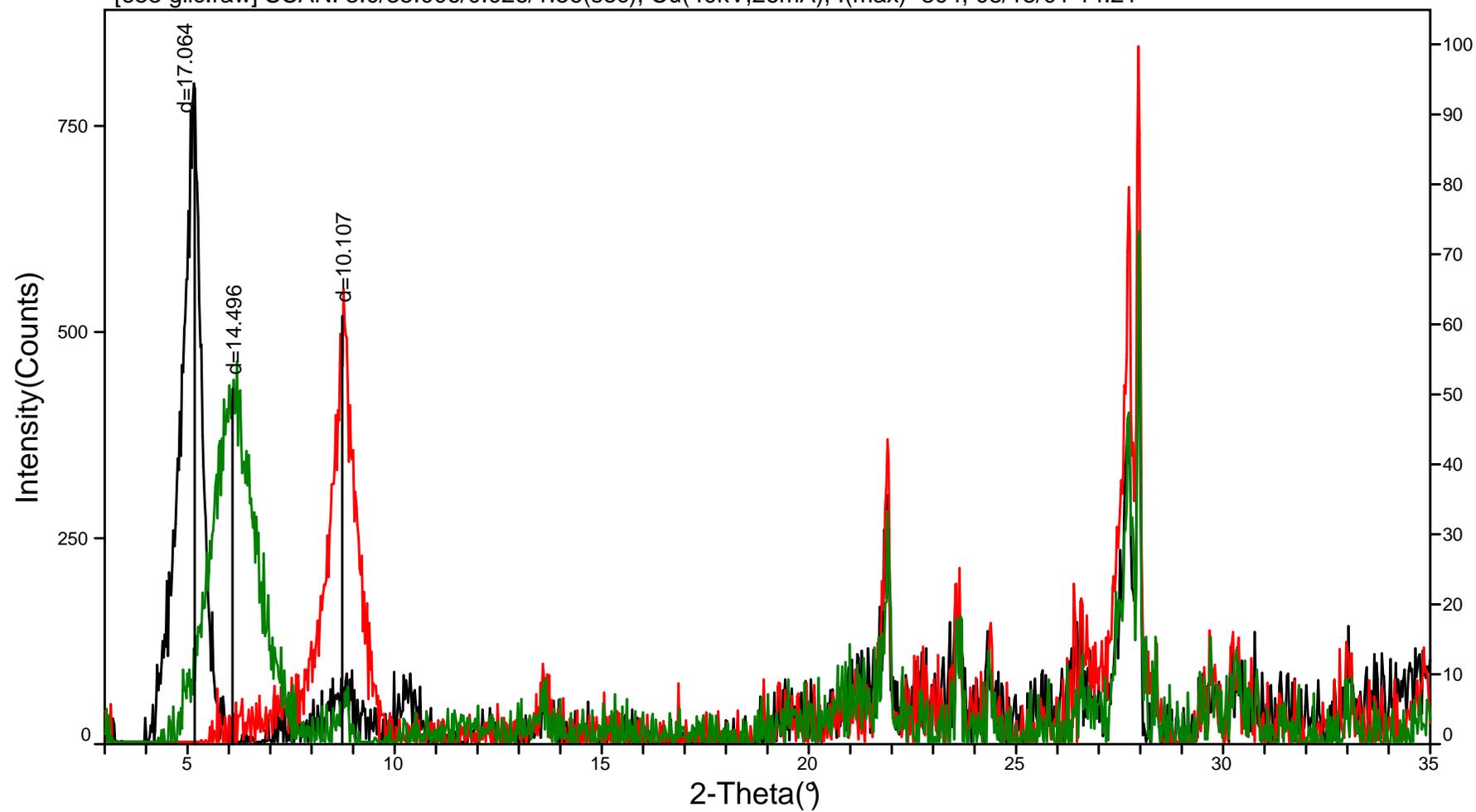


Difratograma da amostra n.º300.

[653.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=624, 06/21/01 13:53

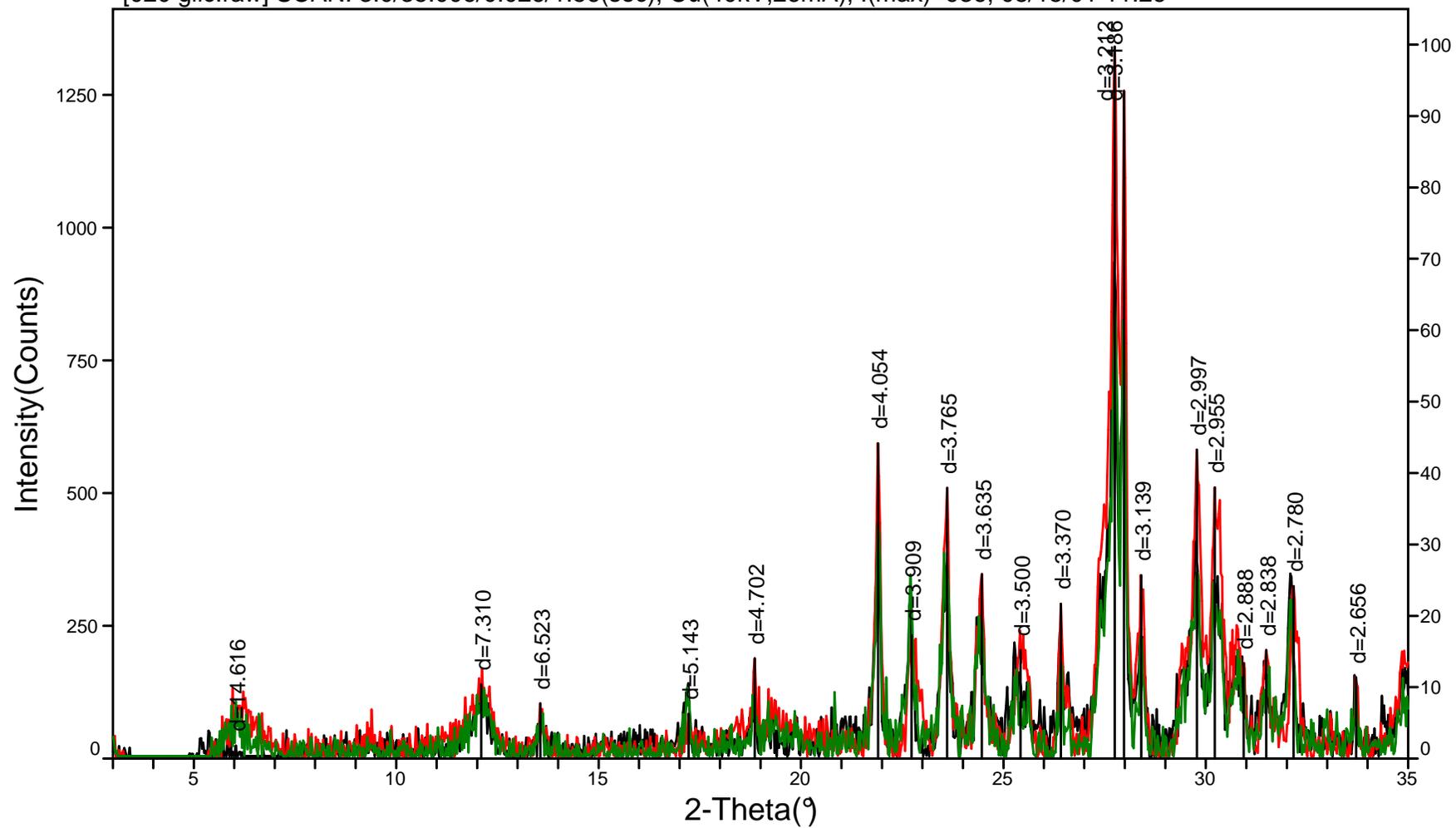
[653 calcin.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=849, 08/21/01 15:52

[653 glic.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=804, 08/15/01 14:21



Difratograma da amostra n.º653.

[020.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=870, 06/21/01 10:57
[020 calcin.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=1345, 08/21/01 13:05
[020 glic.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=936, 08/15/01 11:26

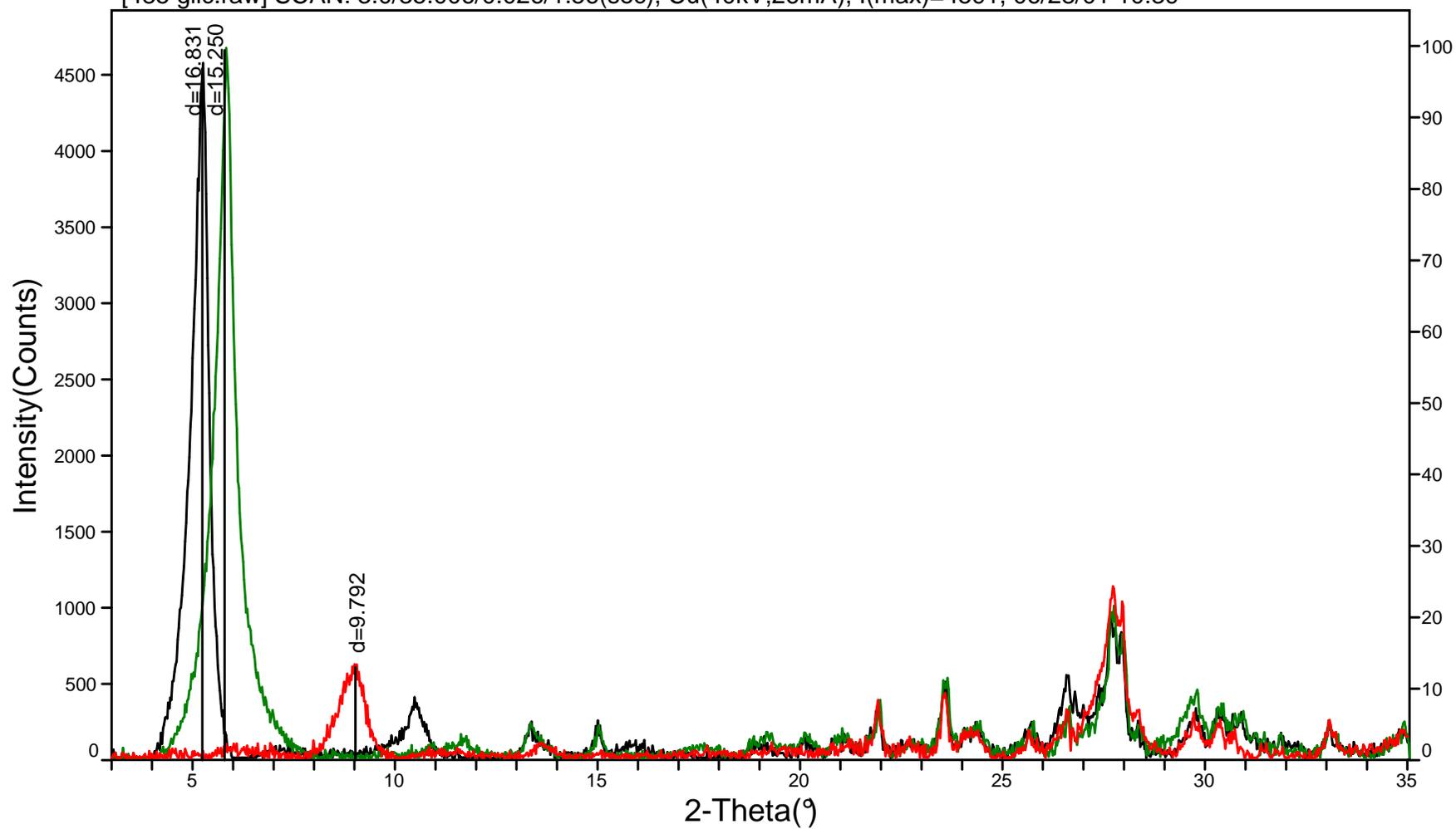


Difratograma da amostra n.º020.

[485 calcin.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=1132, 07/09/01 11:23

[485.raw] SCAN: 3.026/35.058/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=4689, 05/23/01 10:31

[485 glic.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=4591, 06/28/01 10:39

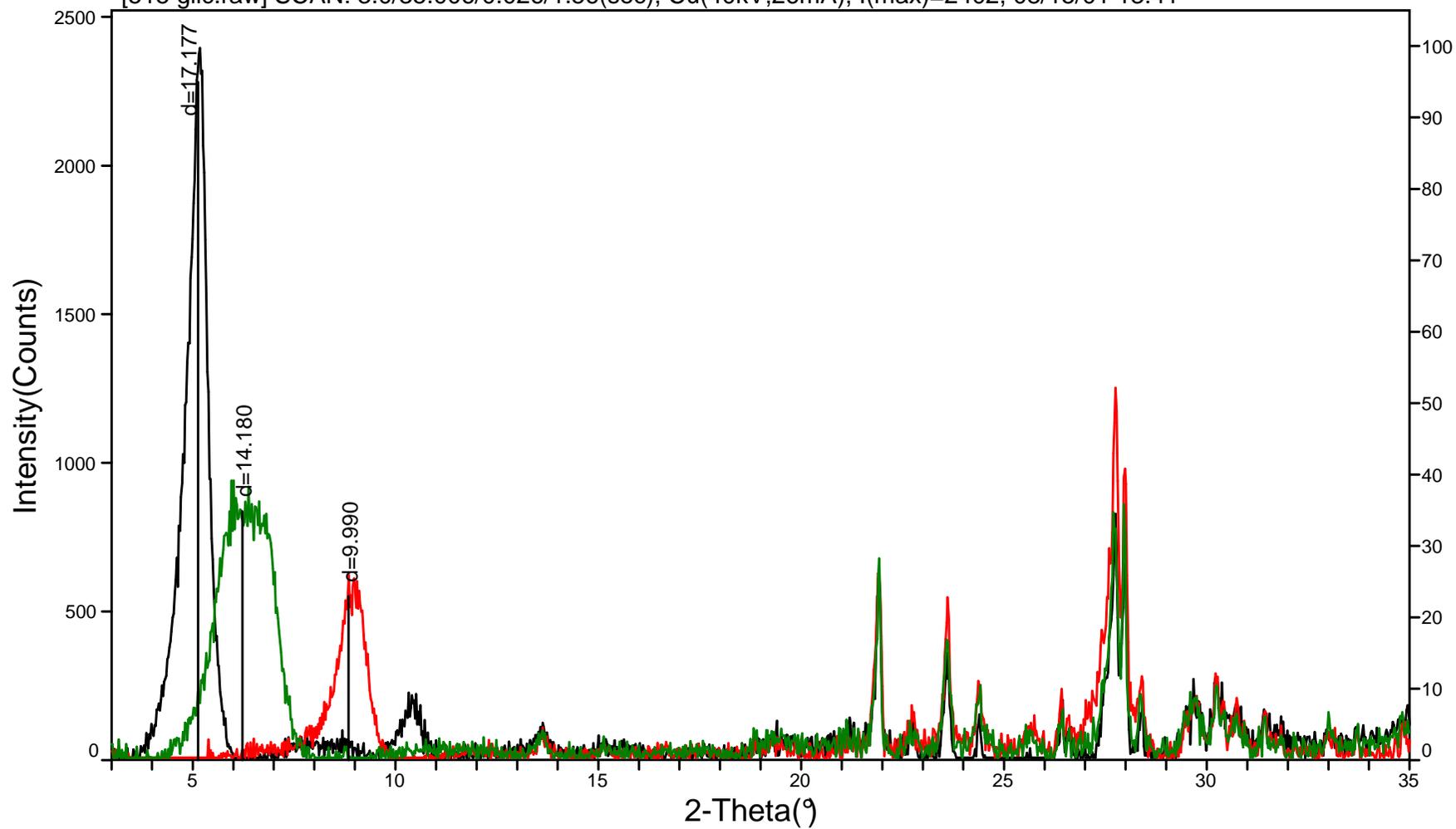


Difratograma da amostra n.º485.

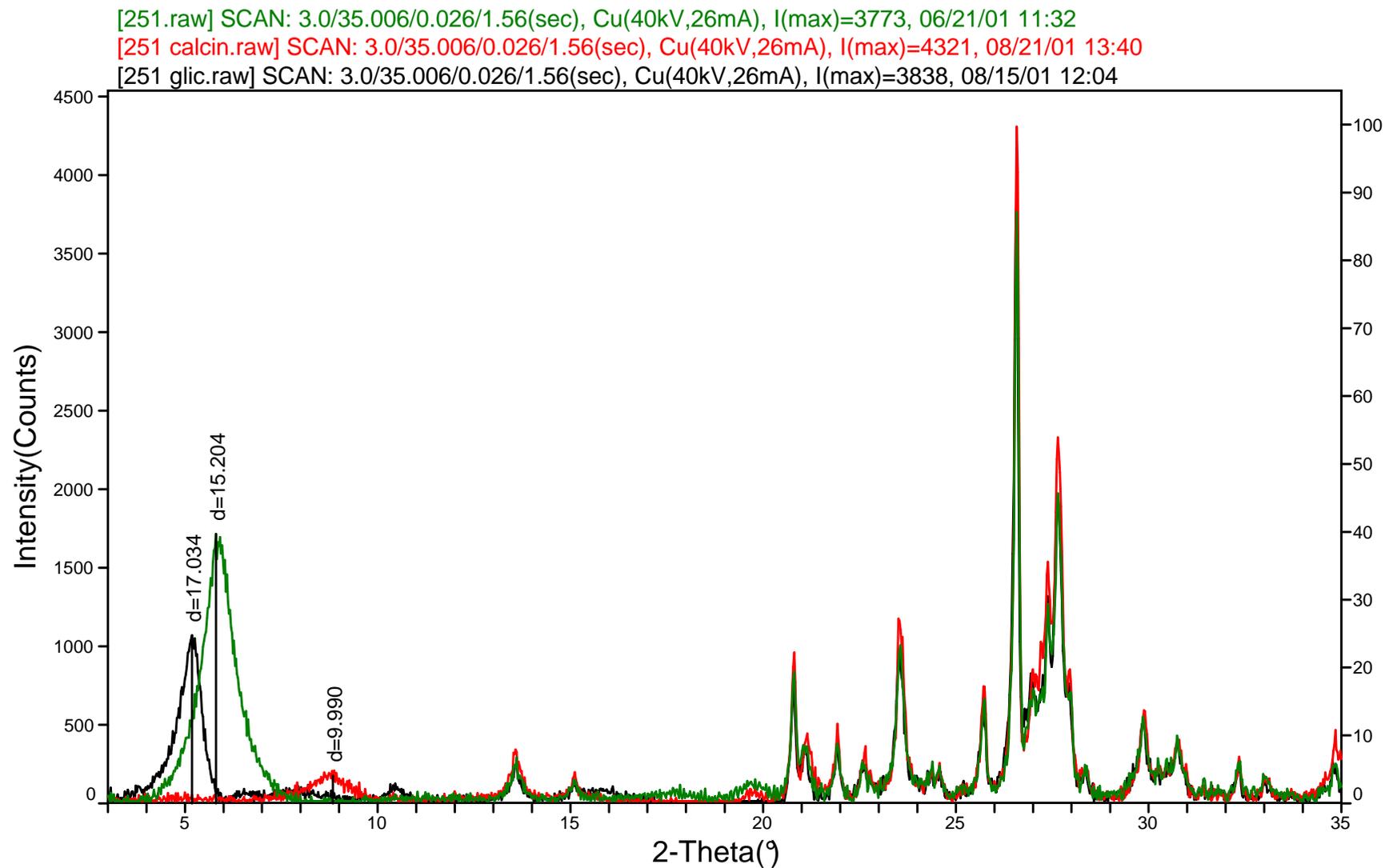
[515.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=938, 06/21/01 12:47

[515 calcin.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=1252, 08/21/01 15:16

[515 glic.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2402, 08/15/01 13:41



Difratograma da amostra n.º515.

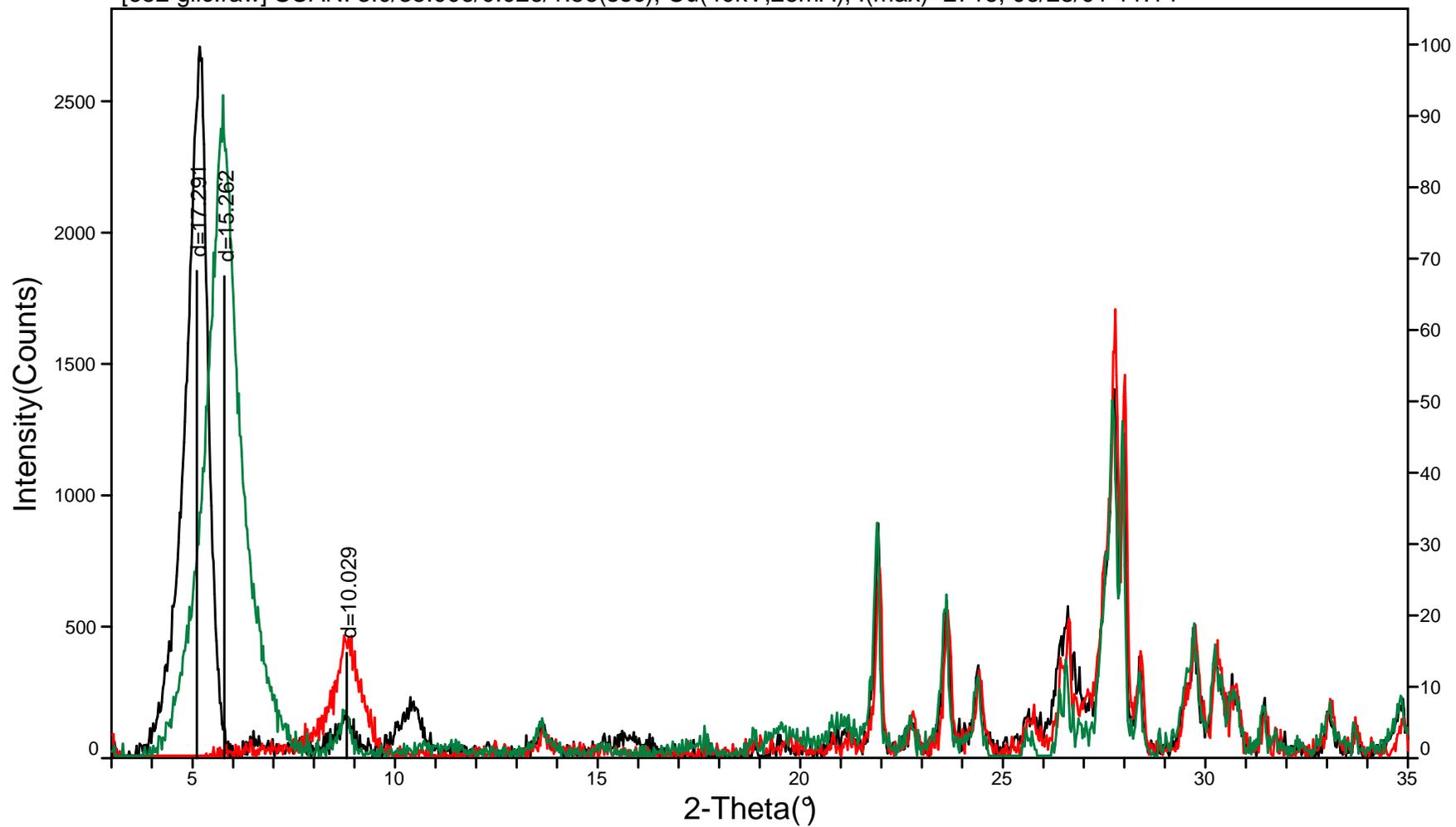


Difratograma da amostra n.º251.

[652.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2529, 05/23/01 12:29

[652 calcin.raw] SCAN: 3.026/35.058/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=1710, 07/09/01 10:16

[652 glic.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2716, 06/28/01 11:14

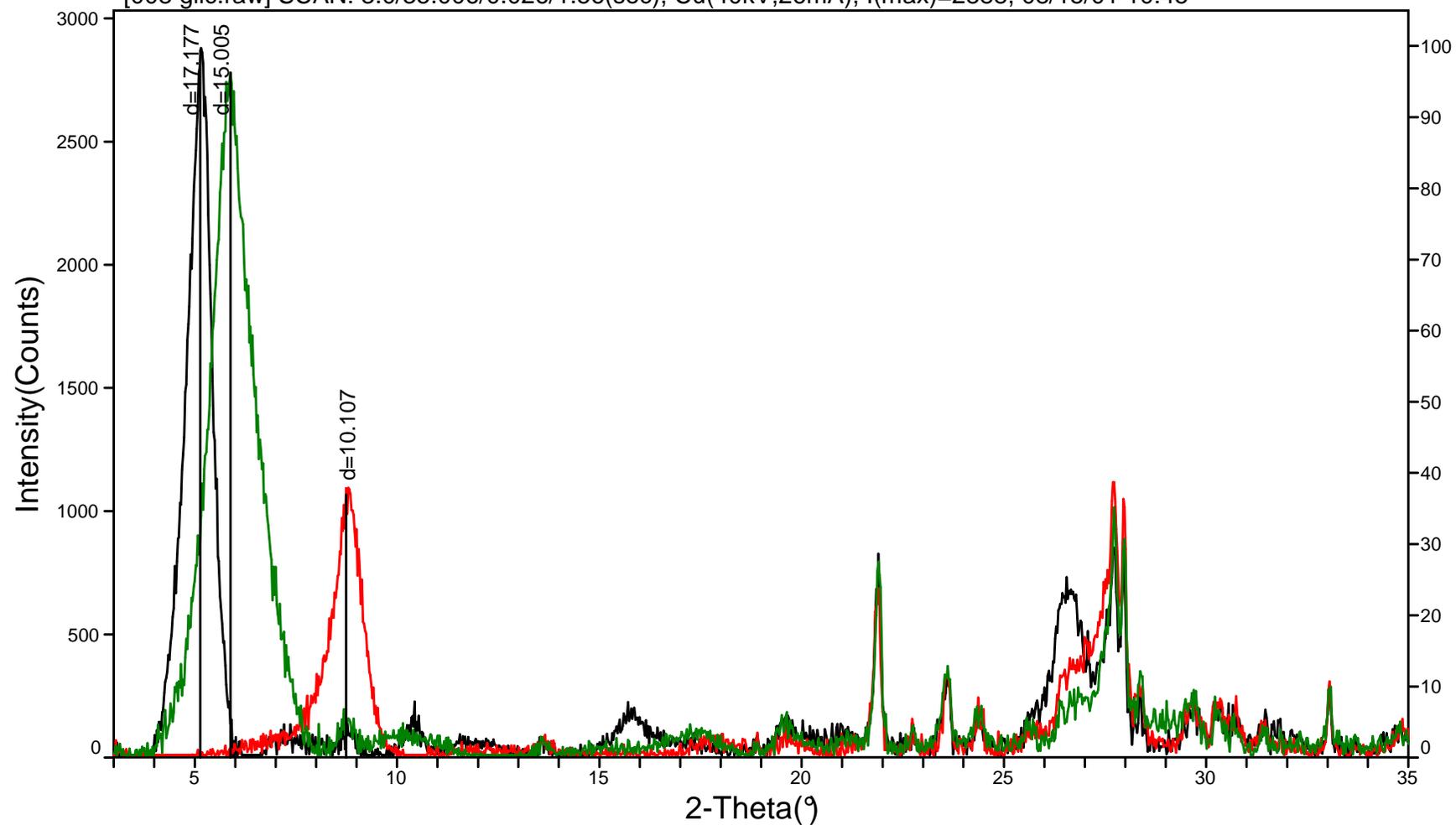


Difratograma da amostra n.º652.

[008.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2787, 06/21/01 10:17

[008 calcin.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=1115, 08/21/01 12:30

[008 glic.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2888, 08/15/01 10:45

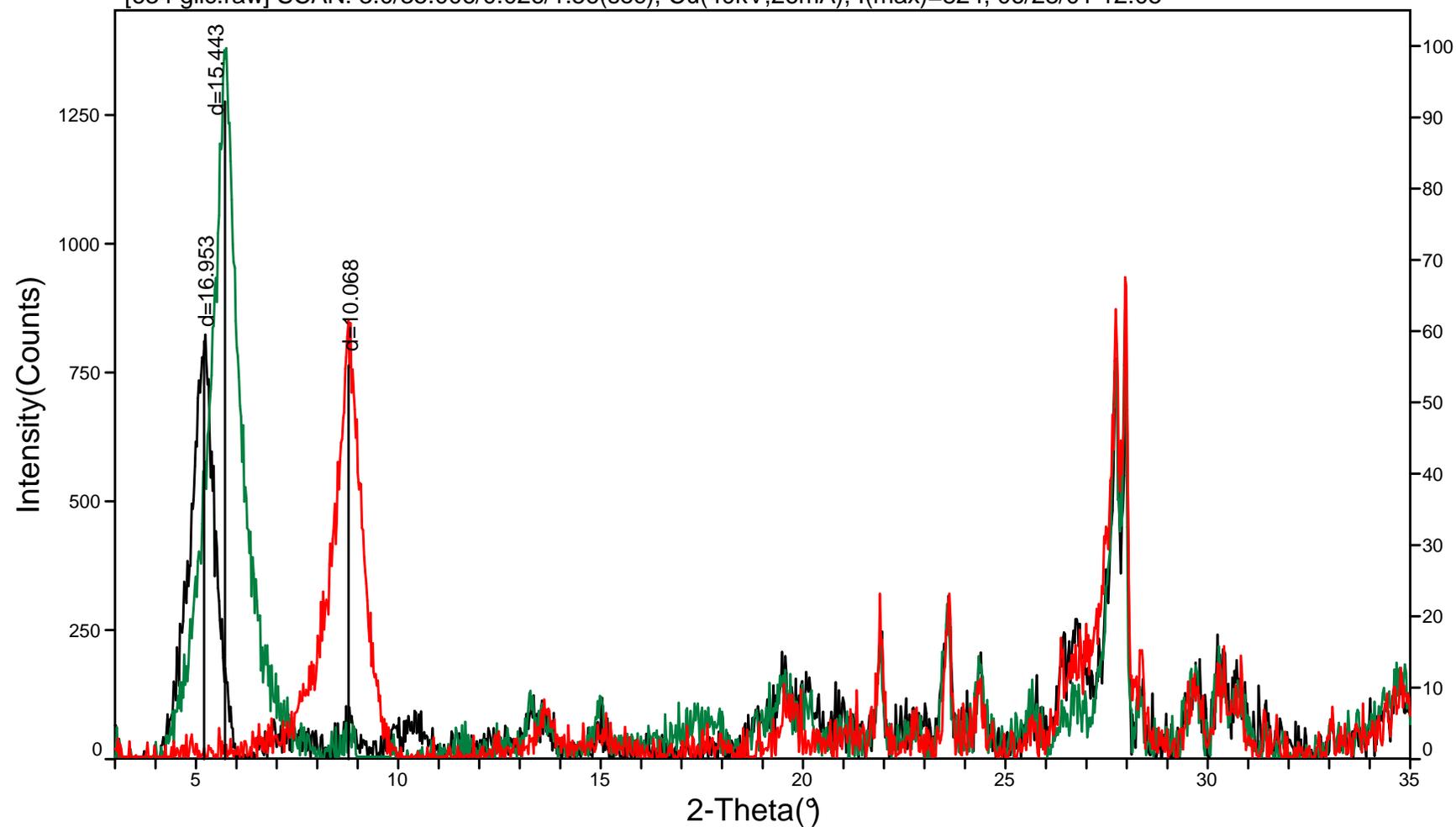


Difratograma da amostra n.º008.

[634 calcin.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=936, 07/09/01 10:49

[634.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=1384, 05/23/01 11:42

[634 glic.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=824, 06/28/01 12:05

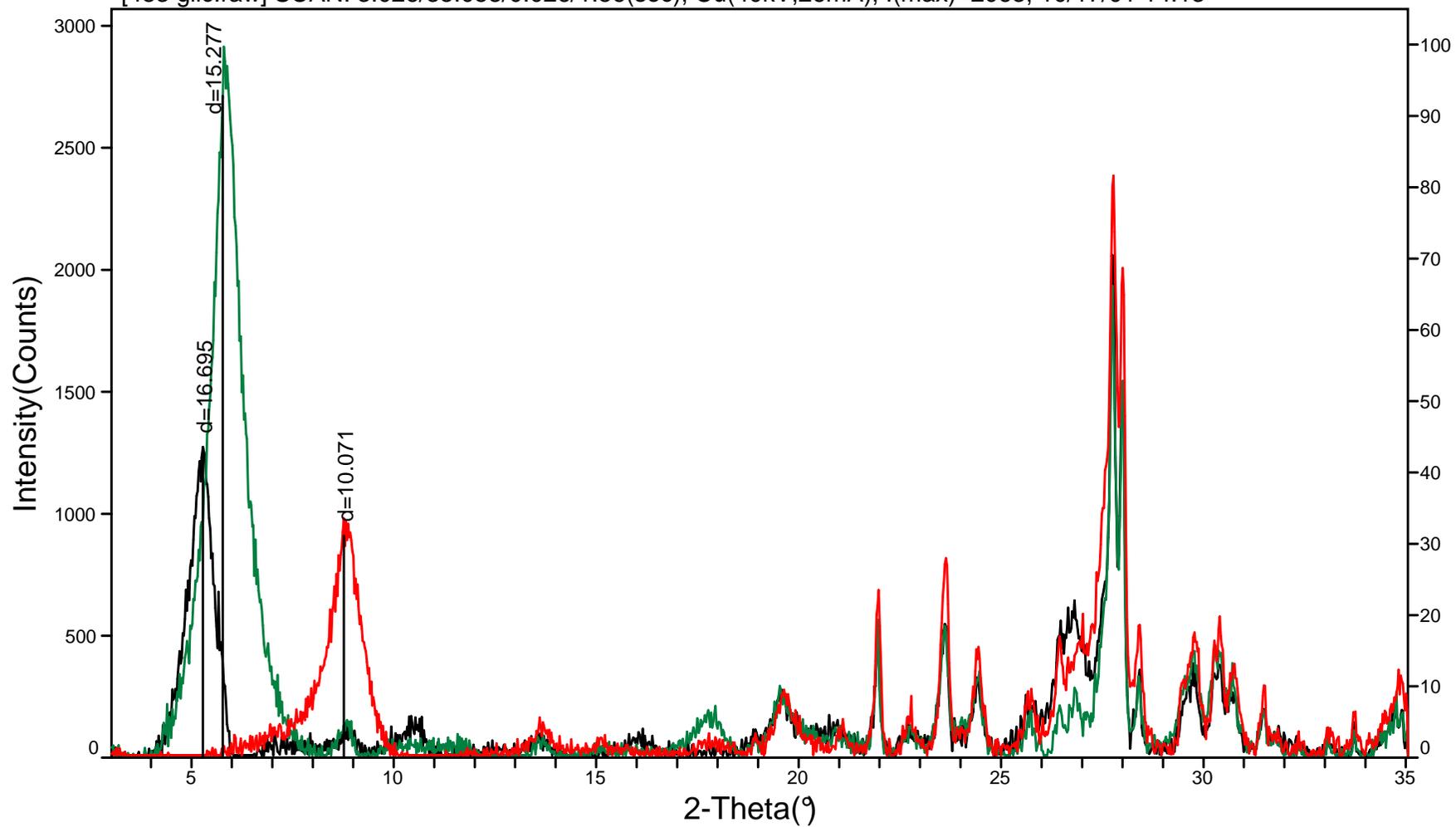


Difratograma da amostra n.°634.

[483 calcin.raw] SCAN: 3.026/35.058/0.026/3.12(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2391, 10/18/01 10:00

[483.raw] SCAN: 3.026/35.058/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2923, 10/11/01 10:52

[483 glic.raw] SCAN: 3.026/35.058/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=2063, 10/17/01 14:13

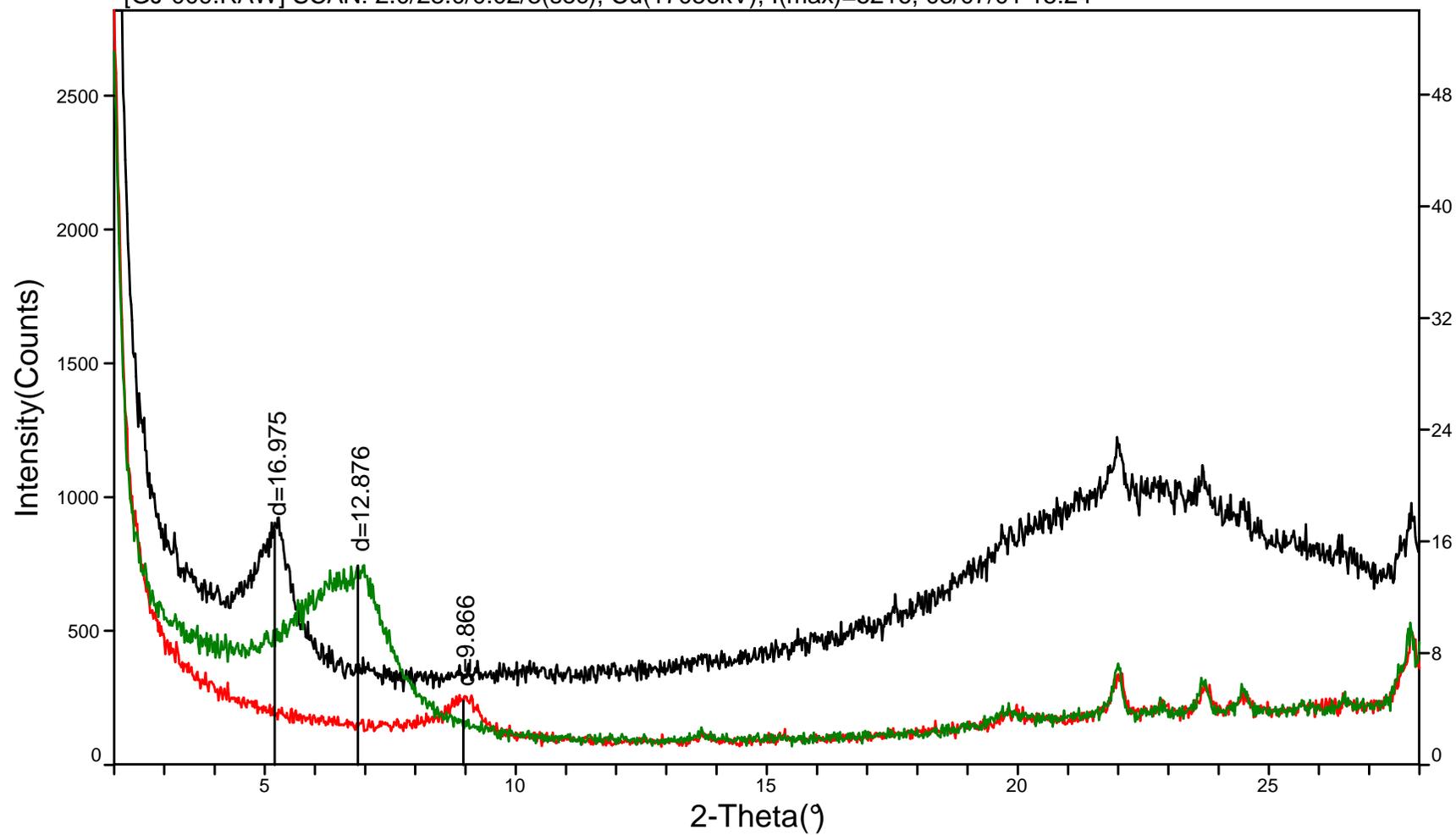


Difratograma da amostra n.º483.

[NJ-009.RAW] SCAN: 2.0/28.0/0.02/2(sec), Cu(17056kV), I(max)=2672, 03/07/01 13:03

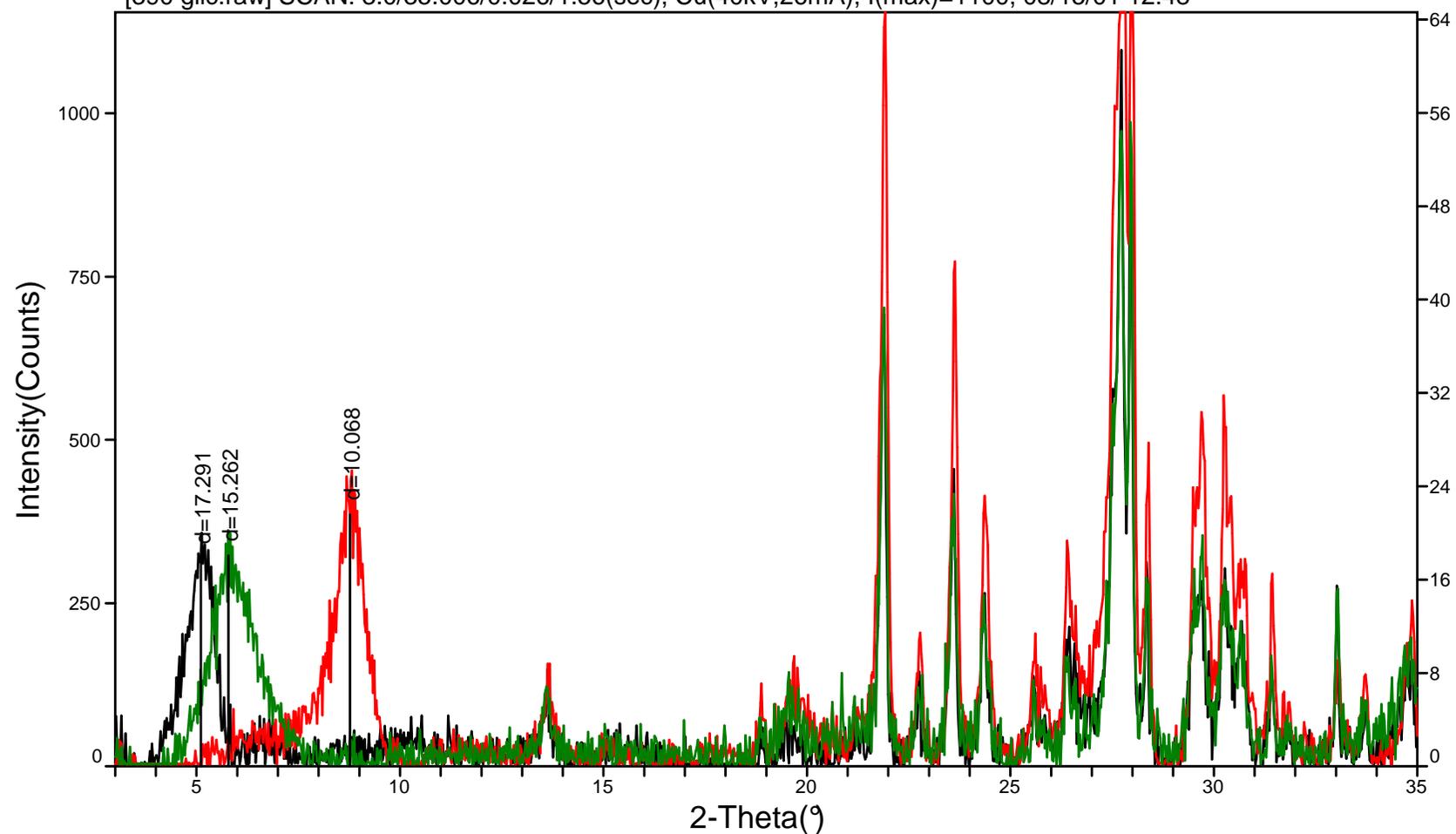
[CJ-009.RAW] SCAN: 2.0/28.0/0.02/2(sec), Cu(17056kV), I(max)=2870, 03/09/01 11:44

[GJ-009.RAW] SCAN: 2.0/28.0/0.02/3(sec), Cu(17056kV), I(max)=5216, 03/07/01 15:24



Difratograma da amostra n.º009.

[390.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=989, 06/21/01 12:11
[390 calcin.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=1787, 08/21/01 14:41
[390 glic.raw] SCAN: 3.0/35.006/0.026/1.56(sec), Cu(40kV,26mA), I(max)=1100, 08/15/01 12:48



Difratograma da amostra n.º390.