

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO CARACTERÍSTICO DE ROCHAS VULCÂNICAS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL E SUA IMPLEMENTAÇÃO EM OBRAS RODOVIÁRIAS

*EVALUATION OF THE CHARACTERISTIC BEHAVIOR OF VOLCANIC ROCKS FROM SERRA
GERAL FORMATION AND ITS USE IN PAVEMENTS CONSTRUCTION*

**Ana Helena BACK¹, Haline Dugolin CECCATO¹, Rinaldo José Barbosa PINHEIRO¹,
Andrea Valli NUMMER², Amanda Vielmo SAGRILO¹**

¹Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS, Brasil. Avenida Roraima, 1000 - Camobi, Santa Maria – RS. E-mails: anahback@hotmail.com; haline.ceccato@gmail.com; amandavs94@gmail.com

²Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Geociências, Avenida Roraima, 1000 - Camobi, Santa Maria – RS, Brasil. E-mails: rinaldo@ufsm.br; a.nummer@gmail.com

Introdução
Contexto geológico da Formação Serra Geral
Procedimentos metodológicos
Área de estudo
Dados utilizados
Resultados e análises
Índices físicos
Desempenho mecânico
Alterabilidade
Forma das partículas
Considerações finais
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Conhecer a história geológica e o padrão comportamental litológico permite a identificação das potencialidades de uso do material rochoso, melhorando a investigação e otimizando resultados. Tendo em vista a representatividade das rochas do RS e sua importância no contexto geológico regional, este trabalho visa avaliar o padrão comportamental de rochas ígneas vulcânicas ácidas e básicas da província geomorfológica Planalto Meridional, oriundas da Formação Serra Geral, frente aos principais ensaios de caracterização, para previsão de desempenho e identificação de características que necessitam maior controle tecnológico. Compilou-se dados laboratoriais de Fiorentini (2002), Pinheiro (2009), Paiva (2017) e Back (2018) avaliando as seguintes propriedades/características: absorção, densidade, teor de sílica, desempenho mecânico, alterabilidade, índice de forma e lamelaridade. Os resultados sugerem que: ao comparar o desempenho mecânico das rochas vulcânicas mediante acidez, não se verifica distinção, evidenciando que o desempenho mecânico não está associado às características de acidez/densidade, mas sim à granulação mineral; a alterabilidade está mais associada ao grau de alteração de seus minerais do que características de porosidade; quanto menor a dimensão do agregado, maior deverá ser o controle tecnológico de forma e absorção; para rochas vulcânicas básicas, deve-se manter controle tecnológico de alterabilidade pela ocorrência de vidros vulcânicos e ações hidrotermais.

Palavras-chave: Rochas ígneas vulcânicas. Acidez. Controle tecnológico.

ABSTRACT - Knowing the geological history and the lithological behavior pattern allows the identification of rock material potential employment, optimizing the investigation phase and improving its results. In view of the representativeness of the rocks in the state of RS in addition to its importance in the regional geological context, this research aims to evaluate the pattern behavior of acidic and basic volcanic igneous rocks located in the Planalto Meridional geomorphological province from Serra Geral formation, regarding the main characterization tests, to predict the behavior performance and identify characteristics that require higher technological control. The data came from Fiorentini (2002), Pinheiro (2009), Paiva (2017) and Back (2018) evaluating the following properties/characteristics: absorption, density, silica content, mechanical performance, alterability, shape and lamellarity indexes. The results suggest that: when comparing the mechanical performance of volcanic rocks by means of acidity, there is no distinction, showing that the mechanical performance is not associated with the characteristics of acidity/density, but to the mineral granulation; alterability is more associated with the alteration degree of its minerals than its porosity characteristics; as smaller the dimension of the aggregate, higher the technological control of the shape and absorption characteristics must be; for basic volcanic rocks, a technological control of the alterability characteristics of the rock must be maintained by the occurrence of volcanic glasses and hydrothermal actions.

KEYWORDS: Volcanic igneous rocks. Acidity. Technological control.

INTRODUÇÃO

A utilização de materiais rochosos na engenharia civil é ampla e possui diversas aplicações, que podem ser divididas em dois grandes grupos, refletindo o grau de carga imposta à que o material estará submetido no decorrer de sua vida útil: as estruturas relati-

vamente estáticas (e.g., gabião, filtro) e as estruturas cíclicas (e.g., camadas de base e sub-base de pavimentos).

Dessa forma, o conhecimento do comportamento mecânico atrelado às propriedades físicas e químicas do material rochoso é

primordial para se avaliar a potencialidade de utilização do referido agregado mineral. Para tal, lança-se mão de metodologias específicas capazes de caracterizar geológico-geotecnicamente o material rochoso, as quais permitirão qualificar e quantificar os parâmetros de interesse.

Entretanto, a utilização de materiais rochosos por parte da engenharia rodoviária prioriza a caracterização rochosa mediante amostragens sistemáticas e ensaios pontuais, que são e sempre serão de extrema relevância, todavia, um conhecimento prévio da história geológica e do padrão comportamental litológico do material rochoso permite a identificação de suas potencialidades de uso, tornando-se um instrumento de otimização da fase de investigação e consequentemente, obtendo melhor qualidade nos resultados da investigação (Carregã & Balzan, 1998).

Segundo as informações contidas no Cadastro Nacional de Produtores de Brita com ano base de 2015, disponibilizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), das 142 usinas de britagem em funcionamento no estado do Rio Grande do Sul (RS), aproximadamente 130 desses afloramentos são lavras de rochas de origem vulcânica. Ou seja, mais de 90% das pedreiras do estado do RS são classificadas como

CONTEXTO GEOLÓGICO DA FORMAÇÃO SERRA GERAL

A Formação Serra Geral recobre a maior área de rochas ígneas continuamente expostas no Brasil (cerca de 40% do Rio Grande do Sul), ocupando uma extensão de aproximadamente 1.200.000 km², estabelecendo o denominado Planalto Meridional Brasileiro (Roisenberg, 1989). Aflora também nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, São Paulo, o que leva a definição da maior ocorrência de magmatismo basáltico de fissuras do mundo (Guimarães & Motta, 2016).

Grande parte da Formação Serra Geral caracteriza-se por uma sequência vulcânica predominantemente basáltica (97% em volume) em adição a diques de diabásios de aproximadamente 133 Ma de idade. Esse tipo de material rochoso apresenta coloração de cinza a preto, granulção fina a muito fina e detém estrutura hipocrystalinas, maciças ou vesiculares (Schneider et al., 1974).

Em menores proporções, a formação Serra Geral apresenta uma sequência de rochas ácidas que compõe o grupo dos riocitos-riolitos (3%

rochas ígneas extrusivas.

Tais afloramentos são passíveis de variações litológicas, estruturais, de mineralogia do preenchimento e de grau de alteração que tendem a imprimir mudanças comportamentais na qualidade da matéria prima rochosa e, por sua vez, no agregado britado, afetando significativamente o desempenho e qualidade dos pavimentais aos quais serão implementados (Al-Harhi, 2001; Pan et al., 2006; Masad et al., 2007).

Tendo em vista a representatividade das rochas ao estado do RS em adição à sua importância no contexto geológico regional, o presente trabalho visa avaliar o padrão comportamental de rochas ígneas vulcânicas ácidas e básicas localizadas na província geomorfológica Planalto Meridional do estado do RS, frente aos principais ensaios de caracterização química e geomecânica, na tentativa de previsão de desempenho comportamental e identificação de características rochosas que necessitam de um controle tecnológico mais incisivo.

Ademais, o artigo visa sanar lacunas de compreensão ao elucidar as relações de mutualidade entre as propriedades de agregados pétreos e os compósitos que os contém, direcionando a análise para as rochas ígneas extrusivas da Formação Serra Geral.

do volume total de rochas) e são facilmente distinguíveis das rochas básicas, uma vez que apresentam coloração cinza claro, estruturas de fluxo e diaclasamento horizontal a sub-horizontal e uma maior resistência ao intemperismo se comparado às rochas básicas (Fiorentini, 2002).

Uma das classificações das rochas ígneas é através da composição química, baseando-se no teor de dióxido de silício (i.e., sílica), não somente sob a forma de quartzo, mas também combinado formando os silicatos. Assim, fala-se em rochas ácidas quando o teor de SiO₂ for superior a aproximadamente 60% e rochas básicas na proporção de 45% a 52% (Teixeira et al., 2009; Pomerol et. al, 2013; Wicander & Monroe, 2017).

Este panorama magmático complexo é registrado em sua totalidade no território do RS, onde mais da metade da área do estado, na região setentrional, é recoberta por uma pilha vulcânica de derrames basálticos sobrepostos ou intercalados com unidade ácidas, que constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná (Holz

& Ros, 2000).

Para Viero & Gonzatti, (2016), as variações comumente encontradas na qualidade geotécnica das rochas vulcânicas decorrem da estrutura interna dos derrames rochosos, que podem apresentar espessas camadas vesiculares, amigdalares e/ou autobrechação. Os minerais de alteração intemperica da rocha ou de preenchimento das amígdalas tendem a exibir significativa diversidade composicional, podendo conter argilas expansivas (e.g., esmectitas) que podem promover instabilidade e potencializar a alterabilidade do material rochoso.

A ocorrência de porções de rochas intempericamente fraturadas com elevado potencial de alterabilidade são materiais denominados “basaltos alterados”. Muito embora esse tipo de rocha

basáltica extremamente alterada não será abordado no presente trabalho, muitos estudos já foram produzidos acerca desse tema (Arnold, 1993; Maia et al.; 2002; Im et al., 2002), evidenciando e validando a qualidade do material e sua potencial utilização.

Nesse sentido, ressalta-se o caso das rochas basálticas que, em geral, se alteram mais facilmente que os granitos, principalmente em condições úmidas. Esta maior alterabilidade dos basaltos ocorre porque os minerais essenciais (plagioclásios e piroxênios) são menos estáveis quimicamente que os do granito (quartzo, ortoclásio e mica biotita) para as mesmas condições físico-químicas ambientais (Arnold, 1993).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Área de estudo

Na tentativa de se avaliar o padrão comportamental característico de rochas ígneas vulcânicas ácidas e básicas da formação Serra Geral, amplamente utilizadas como agregado britado nas obras rodoviárias do RS, realizou-se uma compilação de dados publicados na literatura, acerca do desempenho físico, químico e mecânico desse tipo rochoso, visando garantir heterogeneidade de materiais rochosos em adição a um elevado número amostral.

Os dados laboratoriais selecionados são oriundos de dissertações de mestrado de

Fiorentini (2002), Paiva (2017) e Back (2018), em adição à relatórios técnicos de desempenho de materiais rochosos oriundos de Pinheiro (2009). Vale ressaltar que, muito embora os autores supracitados apresentem em seus documentos uma gama de ensaios laboratoriais e diferentes tipos de rochas estudadas, para a composição deste referido trabalho, foram selecionadas apenas rochas ígneas extrusivas ácidas e básicas, sendo invalidadas as formações ígneas hipoabissais e plutônicas. A figura 1 apresenta o mapa de localização das pedreiras selecionadas e seu respectivo autor.

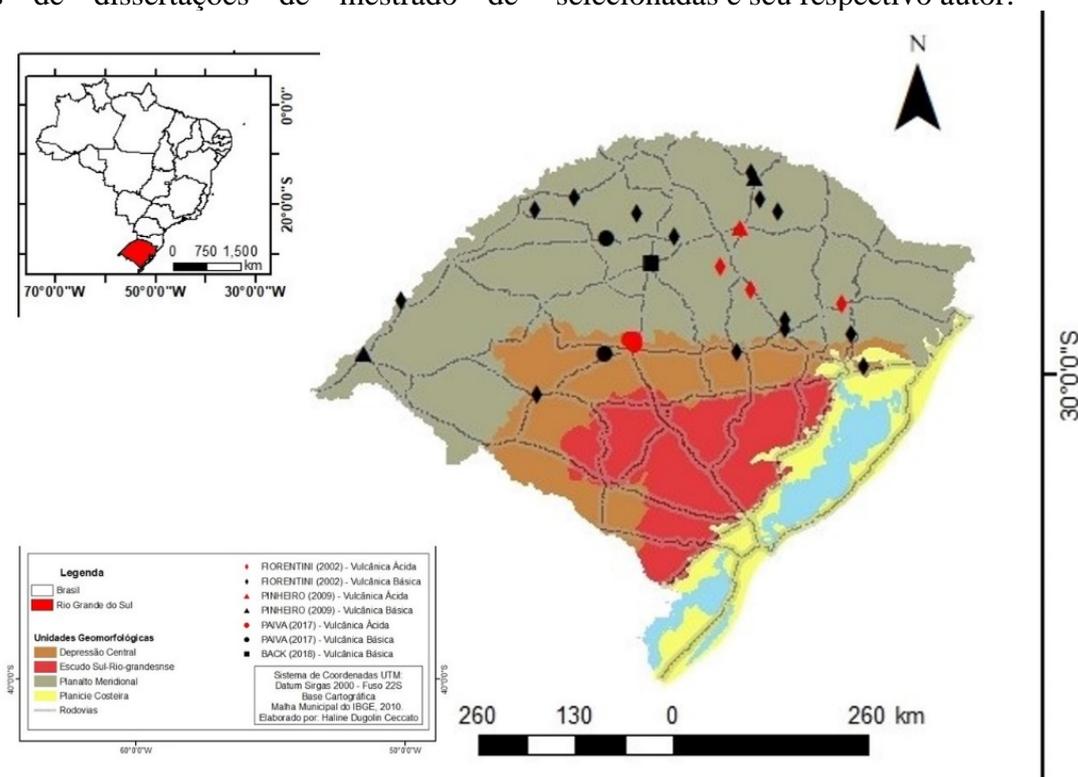


Figura 1 - Mapa de localização geográfica das jazidas estudadas.

Dados utilizados

Fiorentini (2002) avaliou a durabilidade, abrasividade e dureza das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. No total foram ensaiados 28 materiais rochosos oriundos de rochas ígneas vulcânicas, hipoabissais e intrusivas. Para o artigo, foram compilados os valores referentes a 19 rochas básicas (classificadas por Andesi-basalto e Basalto) e 6 rochas ácidas (classificadas como Dacito).

Os dados utilizados de Pinheiro (2009) são oriundos de relatórios de dosagens de concreto asfáltico realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria. O relatório ostenta ensaios laboratoriais de 5 rochas vulcânicas básicas (classificadas como Basalto) e 1 rocha vulcânica ácida (sem classificação definida).

Paiva (2017) executou sua pesquisa através da caracterização e avaliação das propriedades geomecânicas de 6 rochas vulcânicas da porção central do estado do Rio Grande do Sul. Para a composição do presente trabalho foram selecionados 5 materiais rochosos, no qual, 3 rochas se caracterizaram por caráter ácido (classificadas como Riodacitos) e 2 rochas de caráter básico (classificadas por Andesi-basalto e Basalto).

De forma análoga, Back (2018) realizou um

estudo estatístico acerca da caracterização química de geomecânica de 7 materiais rochosos, englobando desde rochas ígneas vulcânicas, plutônicas e hipoabissais até diferentes classificações de rochas metamórficas. Para a composição do presente trabalho, utilizou-se apenas um material rochoso classificado como Basalto.

Ressalva-se que junto aos dados laboratoriais coletados das referências supracitadas, encontra-se anexados nos respectivos documentos lâminas petrográficas de todas as rochas ensaiadas (com exceção de Pinheiro, 2009) que não serão apresentadas no presente trabalho. Para melhor compreensão do desempenho laboratorial exibido sugere-se consulta na literatura original.

A tabela 1 apresenta as normativas utilizadas por cada autor, em adição aos ensaios laboratoriais selecionados para a composição do presente trabalho. Entende-se que em função das pesquisas possuírem objetivos distintos, elas não exibiram a caracterização completa dos materiais rochosos, inviabilizando uma análise mais contundente do comportamento característico das rochas vulcânicas. Entretanto, foram selecionados os ensaios laboratoriais que validam as principais propriedades geotécnicas que exercem influência no uso do agregado como material para pavimentação.

Tabela 1 - Normativa utilizada para a realização dos ensaios laboratoriais.

Ensaios Laboratoriais	Fiorentini (2002)	Pinheiro (2009)	Paiva (2017)	Back (2018)
Agregado Graúdo - determinação da absorção e massas específicas	NBR 9937/87*	NBR NM 53/09	NBR NM 53/09	DNER-ME 195/98
Teor de Sílica pelo ensaio de Fluorescência Raio-X (XRF)	ASTM D 4326/98	-	ASTM D 4326/13	ASTM D 4326/13
Agregado - determinação da abrasão Los Angeles	-	NBR NM 51/01	NBR NM 51/01	DNER-ME 35/98
Resistência à Carga Pontual (<i>Point Load Test</i>)	ISRM 1985	-	ISRM 1985	ISRM 1985
Agregado - durabilidade pelo emprego de soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio	DNER-ME 089/94	DNER-ME 089/94	DNER-ME 089/94	DNER-ME 089/94
Agregado Graúdo - determinação do índice de lamelaridade	-	-	DNER-ME 086/94	DNER-ME 086/94
Agregado - determinação do índice de forma (Crivos Redutores)	-	-	DAER/RS-EL 108/01	DAER/RS-EL 108/01

* apenas absorção da fração #3/4"

RESULTADOS E ANÁLISES

Índices físicos

Usualmente designados índices físicos, as propriedades de porosidade, absorção de água e densidade são consideradas pela literatura características variáveis ao nível de alteração do material e de seu estado fissural, dessa forma, são fatores determinantes para a resistência mecânica e durabilidade da rocha (Gomes, 2001).

Como pode ser observado na Figura 2, as rochas

ígneas vulcânicas são detentoras de densidades intermediárias a alta, em especial as vulcânicas básicas, que tendem a apresentar maior M.E.A. Tal comportamento reflete nas características de absorção do material, uma vez que agregados com menores densidades tendem a exibir maior ocorrência de interstícios (poros) na massa cristalina da rocha e/ou maior grau de intemperização e conseqüentemente, uma maior absorção de água.

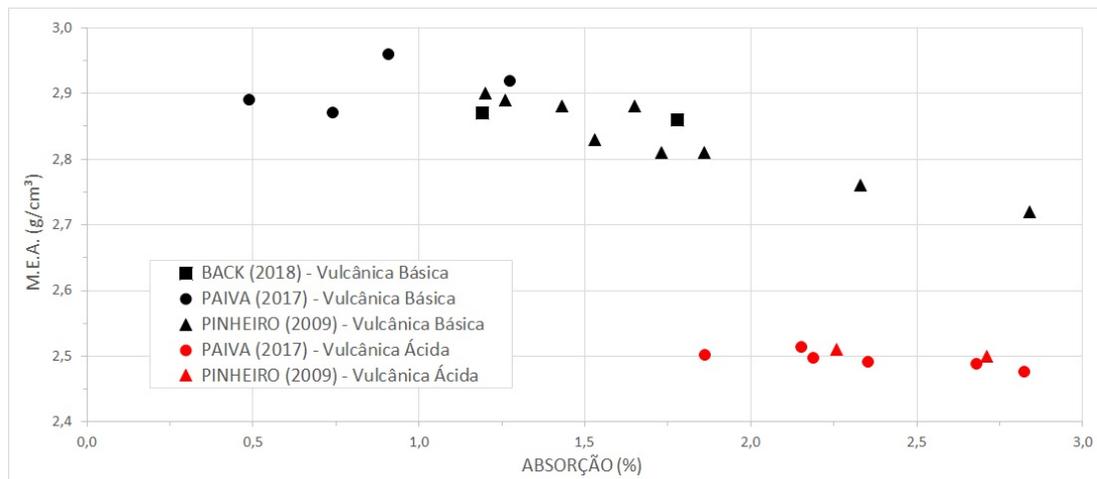


Figura 2 - Correlação entre M.E.A versus Absorção.

O mesmo fato foi comprovado por Lettier et al. (1949), que ao relacionar porosidade e absorção através da densidade aparente do agregado, verificou que quanto menor a densidade aparente dos agregados de mesma origem, maior a absorção de água. Ou seja, a porosidade para um mesmo grupo de rocha não está diretamente relacionada com a composição química, uma vez que podem variar conforme a profundidade do derrame, a idade geológica, grau de intemperismo, granulação dos minerais, etc.

Muito embora as ditas vulcânicas básicas detenham valores de absorção relativamente inferiores se comparado às ácidas, isto não inibe o fato que rochas vulcânicas de um modo geral tendem a exibir valores relativamente elevado de absorção se comparado à demais grupos rochosos, como por exemplo as rochas ígneas plutônicas, que no caso dos granitos tende a apresentar absorção na ordem de 0,7%.

O grau de intemperismo também está diretamente relacionado às características de absorção do material rochoso, em adição à presença de

vesículas, amígdalas e diaclases que influenciam diretamente na percolação da água. Contudo, para o emprego de agregados na pavimentação, não há valores normativos limites de absorção, todavia, recomenda-se utilizar materiais com absorção menor que 3%.

Em adição, deve-se ser cauteloso com adoção de rochas que detenham absorção superiores a 2%, uma vez que apresentam absorção em demasia e influenciam diretamente nos parâmetros de dosagem das misturas asfálticas, como por exemplo, o teor de ligante.

Com relação à distinção entre as rochas básicas e ácidas, define-se o teor de sílica na composição mineralógica como o fator determinante no caráter de acidez do material rochoso. Rochas definidas como ácidas são aquelas detentoras de altos teores de sílica e em virtude da fraca interação química com a grande maioria dos asfaltos, quando utilizadas como agregado em misturas asfálticas, recomenda-se adição de agentes melhoradores de adesividade. A Figura 3 apresenta o teor de sílica das rochas estudadas.

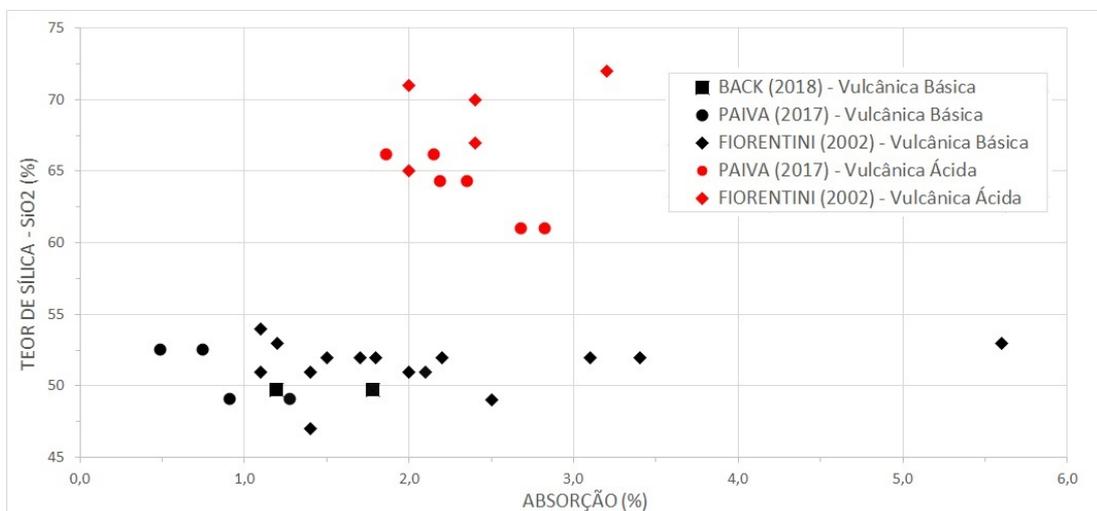


Figura 3 - Correlação entre Teor de Sílica versus Absorção.

A composição química também influencia de maneira indireta na absorção do material rochoso (Figura 3), corroborando com as informações apresentadas na Figura 2.

Muito embora as ditas vulcânicas ácidas usualmente ostentam maior absorção se comparado com as vulcânicas básicas (para uma mesma condição de alteração), mediante presença de alterabilidade, as vulcânicas básicas passam a exibir alto grau de absorção, essa, muitas vezes promovida pela alteração dos minerais constituintes, tais como olivinas e óxidos ferrosos.

Desempenho mecânico

O desempenho mecânico dos materiais frente

aos ensaios laboratoriais de desgaste provocado por cargas abrasivas, pelo atrito interno ou pela perda ao choque é dependente do tipo e quantidade dos constituintes minerais (especialmente do conteúdo de quartzo), da resistência das ligações existentes entre os grãos minerais, da compacidade das rochas, das orientações dos planos de fraqueza, dos aspectos texturas, etc. (Aktinson, 1993; Fiorentini, 2002).

Embora as rochas vulcânicas ácidas detenham maiores teores de sílica em sua composição na forma do mineral quartzo, apenas este fato isolado não garante um melhor desempenho mecânico por parte das ácidas em detrimento das básicas, como pode ser verificado na Figura 4. .

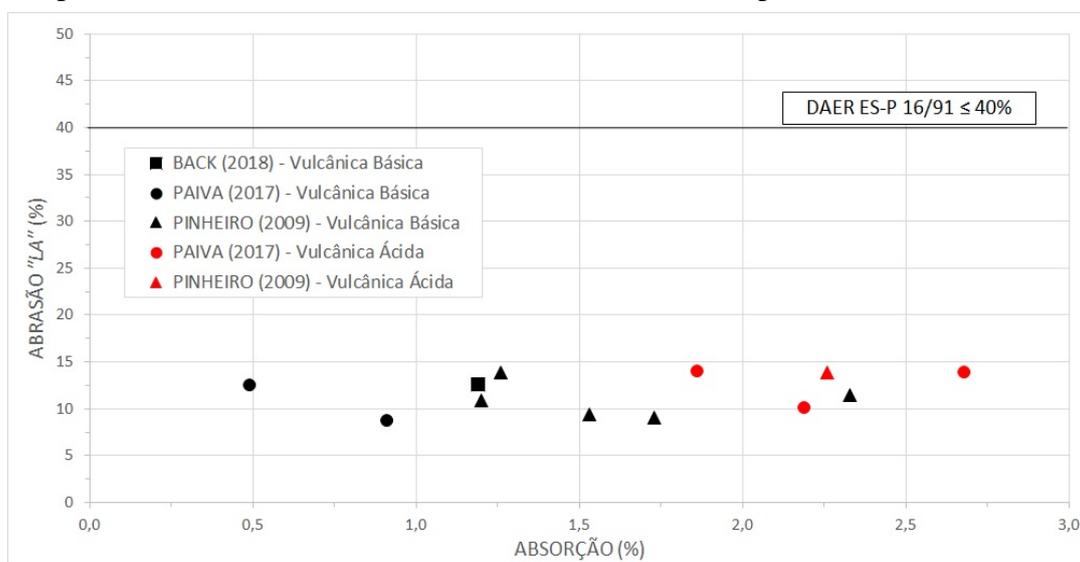


Figura 4 - Correlação entre Abrasão "LA" versus Absorção.

Para Kazi & Al-Mansour (1980) que avaliaram as características de abrasão e durabilidade de rochas ígneas vulcânicas e plutônicas, cuja composição variava de ácida a básica, identificaram que a degradação no ensaio de Abrasão LA aumentou linearmente com o aumento da absorção da rocha, entretanto, tal avaliação foi realizada em função da granulação dos minerais e não mediante classificação rochosa. Dessa forma, os autores concluem que rochas de granulação fina, quando comparadas com rochas de granulação grossa com a mesma porosidade, mostraram-se mais sólidas e mais resistentes ao desgaste.

A literatura indica que do ponto de vista mecânico, um pequeno aumento na fração de volume de vazios pode produzir efeitos mecânicos depreciáveis na rocha, tais como a redução da resistência e o aumento da deformabilidade, uma vez que o tamanho e a distribuição dos poros no agregado podem ser

considerado duas das principais propriedades da rocha (ISRM, 2007).

Entretanto, conforme a Figura 4 evidencia, a maior absorção característica das rochas ácidas, não tende a comprometer o desempenho mecânico das mesmas, que apresentam tendência de desempenho muito similar às vulcânicas básicas, desempenho esse, extremamente satisfatório e muito abaixo dos valores máximos exigidos pelas normas rodoviárias.

Vale ressaltar que as rochas exibidas na Figura 4 oscilaram entre granulação fina a muito fina, que para Kazi & Al-Mansour (1980) se torna um fator imprescindível na avaliação do desempenho mecânico das rochas vulcânicas.

O estado de alteração intempérica também influi diretamente nas condições geomecânicas das rochas. Maia et al. (2002) ao estudar enrocamentos de rochas basálticas, detectou que os processos de alteração causam uma redução na

resistência superficial das partículas (perda de aderência das fissuras), apresentando influência direta na deformabilidade (aumenta o nível de fraturamento das partículas) e na resistência mecânica do enrocamento como meio granular.

A Figura 5 engloba uma nova avaliação acerca

de um segundo ensaio de desempenho mecânico, o ensaio de Resistência a Carga Pontual. O referido ensaio é um parâmetro de entrada para diversas aplicações, tais como em classificações geomecânicas e na estimativa da resistência à compressão uniaxial.

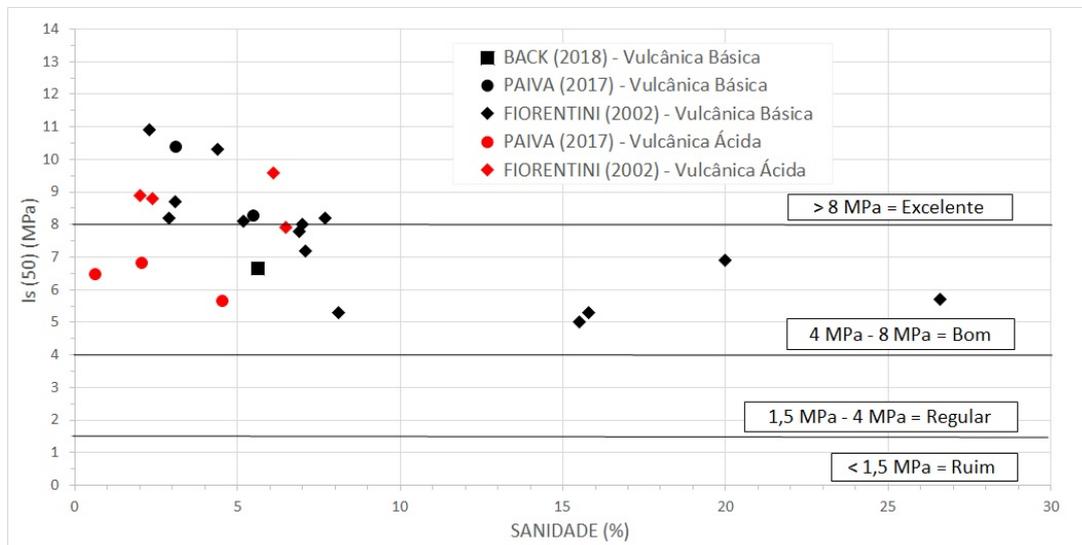


Figura 5 - Correlação entre Compressão Puntiforme versus Sanidade.

Devido a impossibilidade de obter corpos de prova regulares para realização de ensaios de compressão uniaxial, Fiorentini (2002), Paiva (2017) e Back (2018) executaram o ensaio em corpos de prova irregulares na forma de fragmentos de rocha, como permite a norma ISRM 1985.

Conforme classificação de desempenho mecânico de Lienhart (1998), identifica-se na Figura 5 que as rochas ígneas vulcânicas tendem a apresentar desempenhos mecânicos de bom a excelente, não havendo distinção para a condição de acidez, corroborando com a análise da Figura 4, que sugere que o desempenho mecânico das rochas vulcânicas não está atrelado à condição de acidez, mas sim de granulação dos minerais.

De forma análoga, identifica-se que o caráter intempérico da rocha não exerceu influência dominante no desempenho mecânico para as rochas estudadas, uma vez que as amostras detentoras de sanidade maior que 15% ainda apresentaram bom desempenho no ensaio pontual para a condição seca, evidenciando que muito embora a rocha apresente tendência de sofrer alteração intempérica, a sua estrutura interna exibe um bom esqueleto mineral capaz de resistir aos esforços mecânicos.

Vale ressaltar que mediante análise das lâminas petrográficas anexas à dissertação de Fiorentini (2002), conclui-se que as rochas

básicas estudadas pelo autor apresentam, na grande maioria, ocorrência de vidros recristalizados e de alterabilidade na rocha e, em alguns casos, presença de olivinas, amígdalas e/ou vesículas. Ou seja, ainda que essas características agregam ao material maior potencial de alteração, não significa que a rocha terá desempenho mecânico insatisfatório ou que apresentará alteração em demasia no ensaio de sanidade.

Alterabilidade

Diversos fatores estão relacionados ao processo de intemperismo das rochas, esses fatores podem estar associados à litologia da rocha matriz (i.e., granulometria, textura, ocorrência de fissuras e fraturas, fatores morfológicos), ao clima, ao relevo ou a biologia. A combinação desses fatores promove diferentes produtos do intemperismo e, por consequência, diferenças de desempenho no tocante das características tecnológicas das rochas.

A maior ou menor alterabilidade das rochas depende da estabilidade química dos minerais constituintes, rochas básicas e ultrabásicas tendem a se alterar quando expostas às condições atmosféricas pois seus minerais ricos em ferro e magnésio são mais suscetíveis à hidrólise (Oliveira & Brito, 1998).

Outro aspecto associado e que auxilia na alteração das rochas é a sua permeabilidade. Conforme Roisenberg (1974): “a alterabilidade

apresenta relação direta com a permeabilidade da rocha. Rochas muito compactas, são pouco susceptíveis à alteração”. Ou seja, a nível microfissural, a presença de macro e microfissuras no derrame rochoso permitem a ocorrência de reações químicas entre a rocha e a água percolada, podendo modificar as características de porosidade e permeabilidade do material (Frazão, 1993; Marrano, 1997).

Nesse sentido ressalta-se que, em geral, rochas basálticas se alteram mais facilmente que rochas graníticas, principalmente sob condições úmidas. Essa maior alterabilidade dos basaltos ocorre porque os minerais essenciais (plagioclásios e piroxênios) são menos estáveis quimicamente que os do granito (quartzo, ortoclásio e mica biotita) para as mesmas condições físico-

químicas ambientais (Arnold, 1993).

Em adição, a presença de argilominerais expansivos característicos em basaltos também são condicionantes à alteração rochosa. O grupo da esmectita é o mais expansivo, seguido pela clorita, que, geralmente, apresenta expansividade praticamente nula, sendo usualmente encontrada como material de preenchimento de vesículas e/ou fissuras (Frazão & Goulart, 1976).

A Figura 6 apresenta a correlação entre os parâmetros de sanidade e absorção. Conforme supracitado, as rochas que excederam o valor permitido de alterabilidade (> 10%) de fato são classificadas como rochas vulcânicas básicas. Todavia, uma maior porosidade por parte da rocha vulcânica não necessariamente acarreta em altos valores de alterabilidade. .

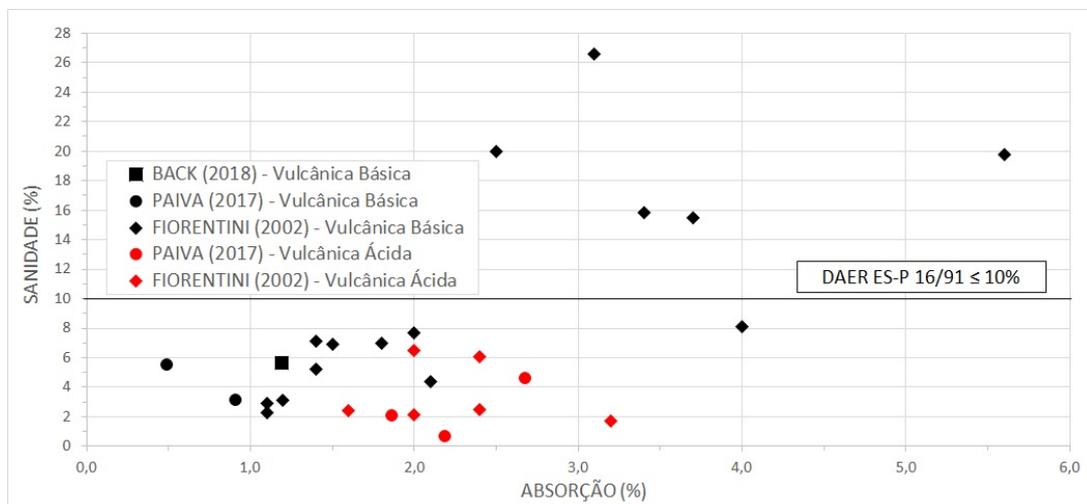


Figura 6 - Correlação entre Sanidade versus Absorção.

Muito embora seja observado em rochas vulcânicas a ocorrência de fraturas e microfissuras provocadas por esforços de tração durante o processo de resfriamento da lava que agregam ao material uma maior absorção, não necessariamente esse material irá apresentar elevada alterabilidade, verificando que a alterabilidade da rocha está mais associada ao grau de alteração de seus constituintes, e não necessariamente atrelado às características de porosidade.

Mediante análise das lâminas petrográficas, verificou-se que a grande maioria das rochas básicas de Fiorentini (2002) exibiram ocorrência de vidro vulcânico recristalizado em sua composição mineralógica (na ordem de 5 a 25%) e em alguns casos, ocorrência de olivinas (baixas porcentagens). Todavia, tais características não comprometeram o desempenho da rocha, uma vez que os materiais apresentaram absorção inferior a 3% e sanidade inferior a 10%.

Para evidenciar a complexidade e indivi-

dualidade das vulcânicas básicas toma-se como exemplo duas rochas basálticas de Fiorentini (2002), Amostra 483 e Amostra 485. Amostra 483 foi classificada como uma rocha pouco alterada, estrutura maciça com rara ocorrência de vesículas e amígdalas (preenchidas por minerais de cor branca a verde, provavelmente zeólitas e argilominerais do tipo celadonitas), com traços de olivina e 30% de vidro recristalizado e, dessa forma, apresentou desempenho de 3,4% na absorção e 15,8% de sanidade. Em contrapartida, a Amostra 485 foi classificada como pouco alterada a alterada, estrutura vesicular a amidaloide (preenchidas parcial ou totalmente por minerais de cor branca e zeólitas), com traços de olivina, 25% de vidro recristalizado e 15% de amígdalas, apresentando absorção de 2,2% e sanidade de 4,9%.

No primeiro momento, acredita-se que a Amostra 485 exibirá maiores valores de absorção (em detrimento da estrutura vesicular e amígdala-

loide e presença de zeólita) e alterabilidade (uma vez que há presença de olivinas e vidro recristalizado), todavia, a amostra apresentou comportamento abaixo dos valores normalizados. Fato que não ocorreu com a Amostra 483.

Isto posto, conclui-se que muito embora a forma de ocorrência dos produtos de alteração seja imprescindível para a previsão da alterabilidade da rocha, sendo a análise petrográfica uma ferramenta fundamental no estudo da durabilidade, também é necessário a realização de ensaios de alterabilidade, tendo em vista a dificuldade de obtenção de um padrão comportamental intempérico das rochas vulcânicas básicas.

Forma das partículas

Os agregados graúdos e miúdos detêm papel fundamental na estabilidade e na capacidade de suporte de carga dos pavimentos flexíveis, dessa forma, a etapa de caracterização das propriedades de forma, como lamelaridade, angularidade, esfericidade e índice de forma se tornam imprescindível para correta aplicação do material rochoso. Tais características influenciam diretamente na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, visto que o aumento da angularidade proporciona maior imbricamento

na mistura. (Masad et al., 2000; Mahmoud 2005; Bessa et al, 2015).

A metodologia Superpave classifica as propriedades dos agregados em duas categorias: propriedades de consenso e propriedades de origem. As características atreladas à angularidade do agregado graúdo e miúdo, planicidade/achatamento, índice de forma são classificadas como propriedades de consenso, enquanto que as propriedades de resistência à abrasão, sanidade e materiais deletérios são definidas como propriedades de origem, uma vez que são dependentes das propriedades de origem da rocha (Motta et al., 1996).

Visando a avaliação das características de forma dos agregados graúdos de rochas vulcânicas ácidas e básicas do RS, compilou-se na Figura 7 a correlação entre o índice de forma de agregados oriundos da Brita 1 (referente a pilha 3/4”) e Brita 0 (referente a pilha 3/8”) com os dados de absorção referentes às pilhas acima citadas. Para a correta compreensão, ressalta-se que os marcadores que possuem a mesma coloração, são referentes à mesma pedreira, sendo apenas agregados ensaiados com diferentes dimensões (marcador em círculo para Brita 1 e marcador em quadrado para Brita 0).

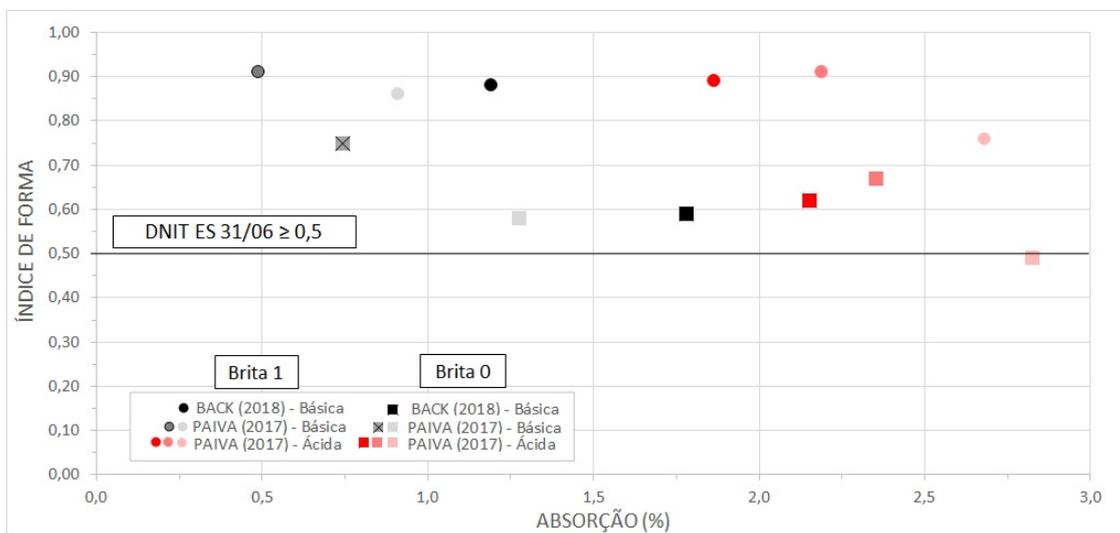


Figura 7 - Correlação entre Crivos Redutores versus Absorção.

O índice de forma se define pelo ensaio dos Crivos Redutores, que apresenta a análise de forma da pilha como um todo, englobando os valores de forma no intervalo de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, maior será a cubicidade apresentada pela fração ensaiada, e quanto mais próximo de 0, mais plana/alongada serão as partículas, definindo-se por 0,5 o valor mínimo exigido por normativa.

De maneira geral, as partículas oriundas da

Brita 1 exibiram alta cubicidade, apresentando valores na ordem de 0,9 (com exceção de um material). Todavia, mediante redução nas dimensões das partículas, houve redução expressiva na cubicidade para todas as pedreiras ensaiadas.

De forma similar, quando ocorre a diminuição na dimensão das partículas, há relativo aumento na absorção por parte do agregado, fato justificado pela maior área superficial em relação ao volume que as partículas com menores dimensões

ostentam, corroborando as análises apresentadas por Kazi & Al-Mansour (1980).

Muito embora as características de forma sejam validadas como propriedades de consenso, e dessa forma, seu desempenho possa ser ajustado e controlado através do método de britagem e tipo de britador, demais fatores influenciam diretamente no produto final da britagem, como as disjunções verticais e horizontais, diaclases, vesículas, amígdalas, que tendem a influenciar negativamente na forma da partícula, gerando agregados alongadas e lamelares típicos de rochas vulcânicas em virtude do fluxo horizontal que a lava gera após o derrame vulcânico.

Tendo conhecimento sobre o fato, o Departamento Rodoviário Rio-grandense denominado DAER/RS, detém vigência acerca do controle de lamelaridade das rochas, em função da alta ocorrência de lamelaridade nas rochas do estado, fixando em 40% o limite máximo de partículas

lamelares passíveis de compor uma mistura.

A utilização de altas porcentagens de agregados lamelares em obras rodoviárias é indesejável, uma vez que a partícula tende a quebrar mediante compactação com rolos compressores e mediante ação do tráfego, alterando a granulometria do material rochoso e produzindo misturas com maior teor de finos (Masad et al., 2002).

A Figura 8 apresenta os resultados referente ao ensaio de lamelaridade em frações #19mm e #9,5mm. Conforme esperado, verifica-se a tendência de lamelaridade nas partículas ensaiadas, mais especificamente as frações com dimensão de 9,5mm, que chegam a exceder o limite vigente das normativas estadual de 40%, indicando uma alta tendência à lamelaridade.

Assim, conclui-se que quanto menor a partícula, maior a tendência à lamelaridade, em detrimento do fluxo horizontal que a lava gera após o derrame vulcânico, fato este que não possui distinção entre as básicas e ácidas.

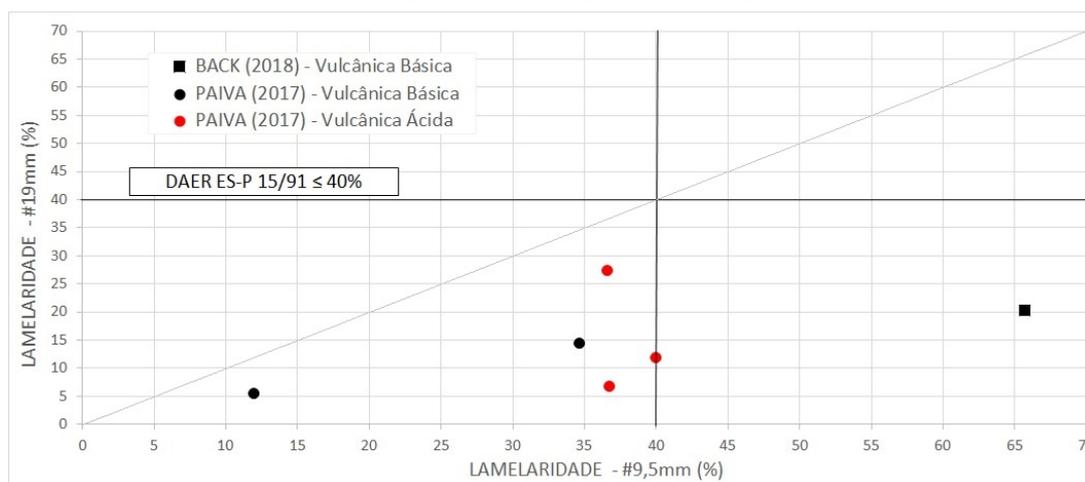


Figura 8 - Correlação entre Lamelaridade #19mm versus Lamelaridade #9,5mm.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo conhecimento da diversidade de tipos litológicos existentes na Formação Serra Geral localizada no estado do Rio Grande do Sul, não se teve a pretensão de inferir que o presente trabalho englobou a completa heterogeneidade dos materiais, entretanto, acredita-se que a compilação dos dados da literatura abrangeu parte significativa dos mesmos, apresentando um número amostral capaz de sintetizar as principais características e propriedades, exibindo um padrão comportamental dos materiais rochosos vulcânicos oriundos dessa formação.

Isto posto, conclui-se que:

a) O desempenho mecânico das rochas ígneas vulcânicas não está associado às características de acidez (teor de sílica/

porcentagem de quartzo) e porosidade/densidade, mas sim à granulação dos minerais constituintes, conforme validado por Kazi & Al-Mansour (1980);

b) Se comparado os desempenhos das rochas vulcânicas mediante caráter de acidez, a distinção entre ambos os materiais em âmbito comportamental se torna evidente apenas no teor de sílica e na densidade/absorção. Para os ensaios de sanidade, desempenho mecânico e índice de forma, não houve distinção no desempenho das rochas em função da acidez;

c) De maneira geral, quanto menor a dimensão do agregado, maior deverá ser o controle tecnológico das características de forma e de absorção, independente do caráter de

acidez;

d) Quando da adoção de rochas vulcânicas básicas, deve-se manter um rígido controle tecnológico das características de alterabilidade da rocha em detrimento da ocorrência de vidros vulcânicos e ações hidrotermais;

e) Agregados detentores de alta sanidade (>10%) muito provavelmente apresentarão absorção em demasia (>3%), entretanto, ao inverter a relação, a premissa não se torna verdadeira. Ou seja, mesmo que a rocha apresente absorção em demasia (>3%) não significa que a rocha irá apresentar alta sanidade, muito embora altos valores de absorção sejam

indicativos de alteração intempérica. Esse fato evidencia que a alterabilidade da rocha está mais associada ao grau de alteração de seus minerais constituintes e não necessariamente atrelado às características de porosidade.

Tais padrões comportamentais não invalidam a necessidade de realização de controles tecnológicos mediante ensaios laboratoriais, uma vez que o desempenho da rocha está diretamente associado às características individuais de cada derrame, como por exemplo: concentração de amígdalas, intensidade de alteração, mineralogia de preenchimento e alteração, ocorrência de vidro vulcânico, etc.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- AKTINSON, R.H. Hardness test for rock characterization. In: HUDSON, J.A. (Ed) *Comprehensive rock engineering: principles, practice and projects*. Oxford, Pergamon, 5v., il. v3: Rock testing and site characterization. cap.5. p.105-117, 1993.
- AL-HARTHI, A. A. A field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 60, p. 193–200, 2001.
- 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) -Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água - NBR NM 53, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles” - NBR NM 51: 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo - NBR 9937. Rio de Janeiro, 1988, 6 p.
- ASTM D4326-13, Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash By X-Ray Fluorescence, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM D4326-98, Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash By X-Ray Fluorescence, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.
- BACK, A.H. Avaliação Das Propriedades Químicas e Geomecânicas De Agregados Oriundos de Jazidas de Rochas de Diferentes Litologias do Estado do RS. Santa Maria, 2018, 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.
- BESSA, I. S., BRANCO, V. T. F. C., SOARES, J. B., et al. "Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 7, p. 04014212, jul. 2015.
- CARREGÁ, D.L.; BALZAN, G. Propriedades dos Maciços Rochosos e Algumas Aplicações na Engenharia Civil. *Design and Construction in Mining, Petroleum and Civil Engineering*, pag 81-87, 1998.
- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. Agregados - Determinação do índice de lamelalidade. DAER-EL 108/01. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001, 4 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Agregado Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo. DNER-ME 195/98. Rio de Janeiro, 1998, 6 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Agregado Graúdo – Ensaio de abrasão "Los Angeles". DNER-ME 35/98. Rio de Janeiro, 1998, 6 p.
- 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, 6 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Agregados - Determinação do Índice de Forma. DNER-ME 86/94. Rio de Janeiro, 1994, 5 p.
- FIORENTINI, J.A. Avaliação da Durabilidade, Abrasividade e Dureza das Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral. Porto Alegre, 2002, 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.
- FRAZÃO, E. B. Metodologia para Avaliação da Alterabilidade de Rochas a Partir de Estudo Experimental em Amostras de Basalto da UHE de Três Irmãos. São Carlos, 1993. 178 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FRAZÃO, E.B.; GOULART, E.P. Aspectos de Expansibilidade de Argilominerais – Algumas Implicações em Obras Civis. 1º Congresso Brasileiro De Geologia De Engenharia, v. 2, Rio de Janeiro, p. 351-365, 1976.
- GOMES, R.L. Características Tecnológicas e Alterabilidade dos compartimentos Entablamento e Colunata de Derrames Basálticos da Porção Setentrional da Bacia do Paraná. São Carlos, 2001, 385 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GUIMARÃES, A.C .R. & MOTTA, L. M. G. Mechanical behavior of basaltic rocks from Serra Geral Formation used as road material in Santa Catarina State, Brazil. *Soils and Rocks*. v. 39, n. 2, p. 203-210. 2016.
- HOLZ, M.; ROS, L.F. Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Centro de Investigação do Gondwana /UFRGS. 444 p., 2000.
- M, C. B., KOH, S. M. CHANG, H. O, TAKAGI, T. The geochemical behavior of altered igneous rocks in the Tertiary Gampo Basin, Kyongsang Province, South Korea. *Geochemical Journal*, v. 36, p 391-407, 2002.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested method for determining point load strength (revised

- version). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. v. 22, p. 51-60, 1985.
- ULUSAY, R. & HUDSON J.A. (Editores). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. 1974-2006. 628 p., 2007.
- KAZI, A.; AI-MANSOUR, Z.R. Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregates. Engineering Geology, v. 15, p. 195-203, 1980.
- LETTIER, J. A.; FINK, D. F.; WILSON, N. B.; FARLEY, F. F. Mechanism of absorption of bituminous materials by aggregate. Association of Asphalt Pavement Technologists, v. 18, p. 278-300, 1949.
- LIENHART, D. A. Rock engineering rating system for assessing the suitability of armourstone sources. In: LATHAM, J.P. (Editor). Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation. London: Geological Society, Engineering Geology Special Publications, v.13, p. 91-106, 1998.
- MAHMOUD, E., "Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage", Dissertação de M.Sc., College Station/ Texas A&M University, TX, EUA, 2005.
- MAIA, P.C.A.; SAYÃO, A.S.F.J.; NUNES, A.L.L.S.; ANTUNES, F.S. Alterability of Basaltic Rock - Physical and Petrographic Characterization. Soils and Rocks, v. 25, n. 3, p 207-220, 2002.
- MARRANO, A. Caracterização tecnológica das rochas basálticas da Usina Hidroelétrica Canoas I, Rio Parapanema, SP/PR. São Carlos, 1997, 240 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MASAD, E., BUTTON, E J. W. Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture. Computed Aided Civil and Infrastructure Engineering, v. 14, n. 4, p. 273-280, 2000.
- MASAD, E., JANDHYALA, V. K., DASGUPTA, N., SOMADEVAN, N., SHASHIDHAR, N. Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes Using X-Ray Computed Tomography. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 14, n. 2, p 122-129, 2002.
- MASAD, E.; LUCE, A.; MAHMOUD, E.; et al. "Relationship of Aggregate Microtexture to Asphalt Pavement Skid Resistance Using Image Analysis of Aggregate Shape", Journal of Testing and Evaluation, v. 35, n. 6, p. 101080, 2007.
- MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M., CONSTANTINO, R. S. Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 1996.
- OLIVEIRA, A. M. & BRITO, S. N. Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 586 p., 1998.
- PAIVA, P. S. Caracterização e Avaliação das Propriedades Geomecânicas Para uso em Pavimentação de Agregados de Rochas Vulcânicas da Porção Central do Rio Grande do Sul. Santa Maria, 2017, 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.
- PAN, T.; ASCE, M.; TUTUMLUER, E., *et al.* "Effect of Coarse Aggregate Morphology on Permanent Deformation Behavior of Hot Mix Asphalt", Journal of Transportation Engineering, v. 132, n. 7, p. 580-589, 2006.
- PINHEIRO, R.J.B. Relatórios de dosagens de concreto asfáltico realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Certificados Número: 44144, 45126. 2009.
- POMEROL, C., LAGABRIELLE, Y., RENARD, M., GUILLOT, S. Princípios de Geologia: técnicas, modelos e teorias. Porto Alegre: Bookman. 14 ed., 1052 p., 2013.
- ROISENBERG, A. Argilo-minerais em rochas basálticas frescas: mineralogia dos estádios primários de intemperismo de rochas basálticas. Porto Alegre, 1974, 275 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ROISENBERG, A. Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da província meridional da bacia do Paraná. Porto Alegre, 1989. 285 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SCHNEIDER, R.L., MÜHLMANN, H., TOMMASI, E., MEDEIROS, R.A., DAEMON, R.F., NOGUEIRA, A.A. Stratigraphic review of the Paraná Basin. In: Proc. 28 International Congress of Geology, Porto Alegre, v. 1, p. 41-65, 1974.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. 2ª edição. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.
- VIERO, A.P.; GONZATTI, C. Aproveitamento de Rocha Vulcânica Alterada em Minas de Produção de Brita. Implicações Financeiras e Ambientais. Revista Bimestral do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul, julho/agosto, 2016.
- WICANDER, R. & MONROE, J. S. Geologia. São Paulo: Cengage Learning. 2ª ed., 464 p., 2017.

*Submetido em 16 de maio de 2021
Aceito para publicação em 5 de novembro de 2021*