

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Haline Dugolin Ceccato

**AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO
DE AGREGADOS ORIUNDOS DE JAZIDAS DA REGIÃO SUDESTE DO RIO
GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Santa Maria, RS
2021

Haline Dugolin Ceccato

**AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO
DE AGREGADOS ORIUNDOS DE JAZIDAS DA REGIÃO SUDESTE DO RIO
GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof^o. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Coorientadora: Prof^a.Dr.^a Andrea Valli Nummer

Santa Maria, RS
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Ceccato, Haline Dugolin

Avaliação e caracterização do comportamento geomecânico de agregados oriundos de jazidas da região sudeste do Rio Grande do Sul e Santa Catarina / Haline Dugolin Ceccato.- 2021.

284 p.; 30 cm

Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Coorientadora: Andrea Valli Nummer

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2021

1. Agregados minerais 2. Propriedades tecnológicas de rochas 3. Ensaio de caracterização I. Pinheiro, Rinaldo José Barbosa II. Nummer, Andrea Valli III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor (a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728

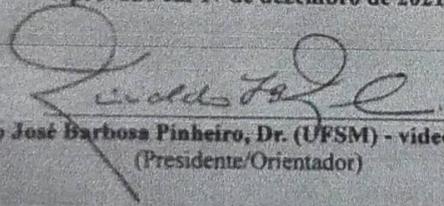
Declaro, HALINE DUGOLIN CECCATO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Haline Dugolin Ceccato

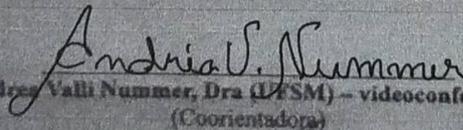
**AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO
GEOMECÂNICO DE AGREGADOS ORIUNDOS DE JAZIDAS DA REGIÃO
SUDESTE DO RIO GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA**

Dissertação apresentado ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, da
Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM), com requisito parcial para
obtenção do título de **Mestre em
Engenharia Civil.**

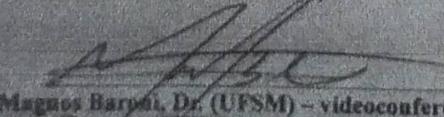
Aprovado em 17 de dezembro de 2021



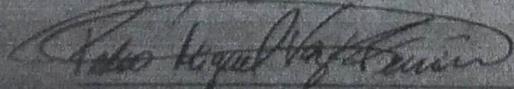
Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM) - videoconferência
(Presidente/Orientador)



Andrea Valli Nummer, Dra (UFSM) - videoconferência
(Coorientadora)



Magnos Baroni, Dr. (UFSM) - videoconferência



Pedro Miguel Vaz Ferreira, Dr. (UCL) - videoconferência

Santa Maria, RS
2021

AGREDECIMENTOS

Diante das incertezas da vida, agradeço a todos aqueles que cruzaram o meu caminho para chegar aqui. Entretanto, alguns nomes fazem-se necessários a ser mencionados, primeiramente gostaria de agradecer à minha família, minha base que sempre dão suporte quando necessário e sempre me apoiaram desde quando decidi vir morar em outro Estado, em especial, meus pais Maria José e Geraldo e meus irmãos Heloíse e Hugo. Não tenho palavras para expressar o quão sou grata por ter vocês sempre comigo e muitas vezes serem meu abrigo, mesmo que a km 's de distância.

Aos meus orientadores Professores Rinaldo José Barbosa Pinheiro e Andrea Valli Numer, agradeço pela ajuda em todas as coletas e pela confiança depositada em mim, deixo aqui meus sinceros agradecimentos a cada troca de informação, aprendizado e ajuda, principalmente na etapa final deste trabalho e por sempre me incentivaram direta ou indiretamente na pesquisa.

À banca examinadora, Professores Magnos Baroni e Pedro Ferreira agradeço por aceitarem o convite para avaliar este trabalho. Meus sinceros agradecimentos.

Aos laços de amizade construídos ao longo dos mais diversos períodos e fases até então vividos, principalmente durante o período do mestrado. A vida na pós graduação não é fácil, são muitos desafios e incertezas a serem vencidos diariamente e, a pandemia veio para dificultar ou até mesmo, testar nossos limites. Por isso, deixo aqui a minha imensa gratidão as amigas feitas no Grupo GEPPASV e GEOMA, por toda ajuda e troca de experiência: Bruno Chaves, Eduarda Fração, Angelo, Fernando Boeira, Luciéle Knerim, Paula Pascoal, Sílvio Schuster e Thaís Alquino. Em especial gostaria de agradecer as gurias do “*Team Rocks*”, Ana Helena e Amanda Sagrilo, pelo companheirismo e amizade criada nesses dois anos, por cada discussão e ajuda para entendermos os comportamentos das rochas. Assim como, a Patrícia Falcão, Régis Pinheiro e Diego Menegusso, pelas ajudas nas coletas, pelo carinho, incentivo, conselhos e companheiros em tantos finais de semana no laboratório. Aos bolsistas e/ou voluntários que antes da pandemia me ajudaram em alguma etapa do trabalho: Christopher Schneider e Mainara Callegaro.

Agradeço aos técnicos do LMCC, Alisson e João, pela disponibilidade em sempre ajudar e tirar dúvida dos ensaios. Ronaldo, técnico do Laboratório de Laminação do Departamento de Geociências, pela confecção das lâminas petrográficas. Ao Professor Luis Eduardo de Souza Robaina pela ajuda nas análises petrográficas. Ao Marcos Fritzen e Professora Laura Motta por realizarem o ensaio AIMS2 na COPPE.

As pedreiras Fragosos, Vogelsanger, Minersul, Conpasul e Eldorado por terem disponibilizado visitar e coletar agregados e rochas para o presente estudo.

Agradeço aos pesquisadores que dedicaram e compartilharam seus preciosos conhecimentos sobre essa fascinante área da geologia e geotecnia e me ajudaram direta e indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço ao PPGEG (UFSM) pela oportunidade em cursar uma pós graduação gratuita e de qualidade e a todos os docentes do programa e aos docentes do PPGCS e PPGEF, pelas aulas ministradas e as amizades criadas além da sala de aula.

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

RESUMO

AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE AGREGADOS ORIUNDOS DE JAZIDAS DA REGIÃO SUDESTE DO RIO GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA

AUTOR: Haline Dugolin Ceccato

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

COORIENTADOR: Prof. Dra. Andrea Valli Nummer

A avaliação e caracterização do agregado mineral é de extrema importância no cenário da pavimentação, tendo em vista que, mais de 80% do volume das misturas asfálticas é composta por esse tipo de material. Desta forma, sua aceitação nas obras está condicionada principalmente as suas características tecnológicas. Nos últimos anos, surgiram diversas pesquisas com este viés, porém, com pouca ou quase nenhuma informação sobre rochas ígneas plutônicas e metamórficas. Desta forma, este estudo tem por objetivo contribuir com a caracterização tecnológica de rochas de origem plutônicas e metamórficas, visando sua aplicação nas mais diversas obras civis, além de contribuir com o banco de dados nacional através do estudo de diferentes materiais rochosos provenientes de jazidas situadas nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Com este propósito foram executados uma gama de ensaios laboratoriais, dentre eles: análise petrográfica, índices físicos, resistência mecânica, morfologia dos agregados e adesividade ao ligante asfáltico. Com base nos resultados apresentados, a etapa de campo se mostrou fundamental para o conhecimento e compressão das características e comportamento dos diferentes agregados avaliados. Foram avaliadas britas de tamanho 12,5 mm (Pilha ¾”), 9,5 mm (Pilha 3/8”) e 4,75 mm (Pilha Pó) das seguintes rochas granulito máfico, granulito félsico, biotita gnaisse, sienogranito e monzogranito pórfiro. Os resultados mostraram que a granulação da rocha assim com a mineralogia apresenta correlação direta com a resistências mecânica dos materiais avaliados pelos ensaios de Abrasão Los Angeles, Treton e Esmagamento. Desta maneira agregados cuja origem advém de rochas de granulação grosseiras tendem a apresentarem maior perda de massa e, conseqüentemente, menor resistência à degradação. Entretanto, para o ensaio de Carga Pontual, a mineralogia e grau de alteração das amostras irregulares são fatores que influenciam no grau de resistência da rocha. Foram realizados ensaios de avaliação de forma, tanto por intermédio de ensaios laboratoriais, como, por processamento digital de imagem (PDI). Embora o ensaio de PDI seja mais funcional e busque por maior exatidão, os resultados mostraram que, ainda assim, deve ser utilizado com cautela, principalmente na avaliação de angularidade e textura da rocha. Da mesma forma, o ensaio convencional de angularidade do agregado fino (FAA), demonstra que o ensaio não é satisfatório para avaliação da angularidade do agregado fino para fins de pavimentação, sendo essa conclusão também suportada por outros autores. Além disso, as cinco jazidas estudadas mostram má adesividade ao ligante asfáltico convencional, o que inviabiliza seu uso nas misturas asfálticas, sendo necessário o uso de dope. Os resultados dos ensaios foram analisados a outros pré-existentes formulado um extenso banco de dados com jazidas do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Mato Grosso e Rio de Janeiro, como o objetivo de facilitar o acesso às características dos materiais britados oriundos de diferentes litologias. Por fim, foi desenvolvido um estudo estatístico visando aumentar a confiabilidade dos resultados

obtidos. **Palavras-chaves:** Agregados minerais; Propriedades Tecnológicas de Rochas; Ensaio de caracterização.

ABSTRACT

EVALUATION AND CHARACTERIZATION OF THE GEOMECHANICAL BEHAVIOR OF AGGREGATES FROM SOUTHEAST QUARRIES OF RIO GRANDE DO SUL AND SANTA CATARINA

AUTOR: Haline Dugolin Ceccato

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

COORIENTADOR: Prof. Dra. Andrea Valli Nummer

The evaluation and characterization of mineral aggregate is extremely important in the paving scenario, considering that more than 80% of the volume of asphalt mixtures is composed of this type of material. Thus, its acceptance in construction is mainly conditioned by its technological characteristics. In recent years, several studies have been performed with this purpose, however, with little or no information about plutonic and metamorphic rocks.

So, this study aims to contribute to the technological characterization of plutonic and metamorphic rocks, aiming its application in diverse civil construction purposes, in addition to add to the national database by means of the study of different rock materials from quarries located in the states of Santa Catarina and Rio Grande do Sul. For this purpose, a range of laboratory tests were performed, including: petrographic analysis, physical indices, mechanical strength, aggregate morphology and adhesion to the asphalt binder.

Based on the presented results, the field step proved to be essential for the knowledge and understanding of the characteristics and behaviour of the different aggregates. 12.5 mm, 9.5 mm and 4.75 mm diameter aggregate of mafic granulite, felsic granulite, biotite gneiss, syenogranite and monzogranite porphyry were investigated. The results showed that the rock granulation as well as the mineralogy presents a direct correlation with the mechanical strength of the material evaluated by the Los Angeles Abrasion, Treton and Crushing tests.

Thus, aggregates whose origin comes from coarse-grained rocks tend to show higher mass loss and, consequently, less degradation strength. However, for the Point Load test, the mineralogy and alteration degree of irregular samples are factors that influence the strength degree of the rock. Shape evaluation tests were carried out, both through laboratory procedures and through digital image processing (DIP). Although the DIP test is more functional and seeks greater accuracy, the results showed that, even so, it should be used with caution, especially in the evaluation of angularity and rock texture.

Likewise, the conventional fine aggregate angularity test (FAA) seems to be not satisfactory for assessing the angularity of fine aggregate for paving purposes, and this conclusion is also supported by other authors. In addition, the five studied deposits show poor adhesion to the conventional asphalt binder, which makes its use in asphalt mixtures unfeasible, requiring the use of dope. The results of the tests were analysed towards other pre-existing ones, creating an extensive database with deposits in Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Mato Grosso and Rio de Janeiro, in order to facilitate access to the characteristics of the crushed material. from different lithologies. Finally, a statistical study was developed to increase the reliability of the obtained results.

Keywords: Mineral aggregates, technological properties of rocks, characterization tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Contexto geológico da área de estudo.	28
Figura 2-2 - Ciclo das rochas.	29
Figura 2-3 - Principais características das rochas ígneas.	31
Figura 2-4 - Principais características das rochas metamórficas.	32
Figura 2-5 - Relação entre as propriedades mineralógica no desempenho físico – mecânico do agregado.	39
Figura 2-6 - Fluxograma dos fatores influenciadores na adesividade.	52
Figura 2-7- Resultado de adesividade de Brondani (2019).	54
Figura 3-1 - Esquema da metodologia adotada na presente pesquisa.	59
Figura 3-2 - Jazidas estudadas neste trabalho.	61
Figura 3-3 - Fluxograma utilizado para a descrição das rochas coletadas nas jazidas estudadas.	63
Figura 3-4 - Procedimento do ensaio de equivalente de areia.	64
Figura 3-5 - Procedimentos para obtenção dos índices físicos dos agregado graúdos.	65
Figura 3-6 - Procedimentos para obtenção dos índices físicos do agregado miúdo.	66
Figura 3-7 - Ilustrativo da massa específica solta.	67
Figura 3-8 - Equipamento utilizado para obtenção do índice de forma por intermédio do crivo redutor.	69
Figura 3-9 - Placa de lamelaridade do DAER.	70
Figura 3-10 - Equipamento calípter utilizado no respectivo estudo, na foto é apresentando um exemplo de medição de verificação do agregado plano.	70
Figura 3-11 - Amostragem do procedimento para obtenção da angularidade do agregado fino (AAF) para o método A, método B e método C.	72
Figura 3-12 - Graus de angularidade e esfericidade.	73
Figura 3-13 - Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto.	75
Figura 3-14 - Etapas do ensaio de Esmagamento.	79
Figura 3-15 - Etapas do ensaio “Perda ao Choque” pelo Treton.	80
Figura 3-16 - Etapas do ensaio de Abrasão Los Angeles.	80
Figura 3-17 - Especificações para o ensaio de carga puntiforme com amostra irregular.	81
Figura 3-18 - Rompimento da amostra após saturação por 72 horas e 1 mês.	82
Figura 3-19 - Critério utilizado na separação dos agregados para submissão do ensaio de sanidade.	83
Figura 3-20 - Esquema utilizado para a realização do ensaio de adesividade.	84
Figura 4-1 - Aspecto geral da pedreira Fragosos com os pontos mais importante observados: 1) Dobra de grande porte; 2) Granulito Félsico em contato com a rocha Granylito Máfico.	88
Figura 4-2 - Fluxograma da planta de britagem da Pedreira Fragoso.	91
Figura 4-3 - Aspecto geral da pedreira Vogelsanger com os pontos mais importantes observados.	93
Figura 4-4 - Bancada superior identificada pelo círculo laranja zona de alteração.	93
Figura 4-5 - Detalhe da rocha VOG – A) amostra de mão com ênfase na estrutura de bandeamento; B) amostra de mão, detalhe dos minerais micáceos.	94
Figura 4-6- Fluxograma da planta de britagem da Pedreira Vogelsanger.	96
Figura 4-7 - Alinhamento dos minerais indicando foliação magmática.	97
Figura 4-8 - Aspecto geral da pedreira Minersul com os pontos mais importante observados A) Frente de lavra com juntas de alívio que define as bancadas e no círculo amarelo, evidencia de rocha mais alterada. B) Bancada onde a rocha apresenta falhas e fraturas.	98
Figura 4-9 - Fraturas preenchidas por material de alteração da própria rocha.	101

Figura 4-10 - a) e b) grãos de feldspato porfirítico a megaporfirítico; c) textura antirapakivi.	102
Figura 4-11 – Amostras de mão coletadas na jazida CONP, sendo: A) grãos de feldspato e plagioclásio porfirítico a megaporfirítico B) megacristais de feldspato potássico alterados.	102
Figura 4-12 - Fluxograma da planta de britagem da Pedreira Compasul.	105
Figura 4-13 - Vista geral da jazida Eldorado evidenciando zona alterada (amarelo).	106
Figura 4-14 - Frente de lavra com presença de zonas de falha e fraturas, além de veios preenchidos por quartzo.	107
Figura 4-15 - Fluxograma da planta de britagem da Pedreira Eldorado.	110
Figura 4-16 - Curva granulométrica: A) Pedreira Fragosos (FRAG-M); B) Contato da Pedreira Fragosos (FRAG-F); C) Material da primeira britagem da pedreira Fragosos (FRAG-N); D) Pedreira Vogelsanger (VOG).	114
Figura 4-17 - Curva granulométrica: A) Pedreira Minersul (MIN) B) Pedreira Compasul (CONP); C) Pedreira Eldorado (ELD).	115
Figura 4-18 - Análise da granulometria das pilhas ¾”, ⅜” e Pó em relação a DM, DN e MF.	117
Figura 4-19 - Índices físicos das pilhas rachão, ¾”, ⅜” e Pó.	119
Figura 4-20 - Absorção e M.E.A do agregado separado por fração.	121
Figura 4-21 - Massa específica aparente solta em acordo com as pilhas.	121
Figura 4-22 - Avaliação da forma das partículas dos agregados pelo método: paquímetro digital, crivos redutores, de acordo com as pilhas ¾” e ⅜”.	123
Figura 4-23 - Índice de lamelaridade dos agregados.	124
Figura 4-24 - Resultados da lamelaridade através da Placa Calíper.	125
Figura 4-25 - Resultados da análise da angularidade do agregado finos para os três métodos: A, B e C.	126
Figura 4-26 - Resultados dos ensaios de avaliação visual de angularidade, esfericidade e textura superficial dos agregados finos.	128
Figura 4-27 - Imagem visual da pedreira FRAG-M (granulito máficos): A) retido #16; B) retido #30; C) retido #50 e, D) retido #100. (aumento 75x).	129
Figura 4-28 - Imagem visual da pedreira VOG (Biotita gnaisse): A) retido #16; B) retido #30; C) retido #50 e, D) retido #100. (aumento 75x).	130
Figura 4-29 - Imagem visual da pedreira CONP (Monzogranito pórfiro): A) retido #16; B) retido #30; C) retido #50 e, D) retido #100. (aumento 75x).	131
Figura 4-30 - Índices de vazios das amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto – método A.	132
Figura 4-31 - Índices de vazios das amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto – método C.	132
Figura 4-32 - Compacidade Relativa dos materiais.	133
Figura 4-33 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.	135
Figura 4-34 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.	136
Figura 4-35 - Gráfico tensão cisalhante versus tensão vertical.	138
Figura 4-36 - Resultados das tensões cisalhante, normal e ângulo de atrito.	139
Figura 4-37 - Avaliação do Índice de Forma através do Crivo Redutor para Pilha ¾” separado por fração.	141
Figura 4-38 - Avaliação do Índice de Lamelaridade – Superpave da Pilha ¾” separado por fração.	142
Figura 4-39 - Avaliação do Índice de Lamelaridade – Superpave da Pilha ⅜” separado por fração.	142
Figura 4-40 - Avaliação do Índice de Lamelaridade separado por fração, A) Pilha ¾”; B) Pilha ⅜”.	143

Figura 4-41 - Média da Forma 2D separado por pedreira.	147
Figura 4-42 - Média da Esfericidade separado por pedreira.	148
Figura 4-43 - Média da Angularidade separado por pedreira.	149
Figura 4-44- Média da Textura separado por pedreira.	150
Figura 4-45 - Comparação entre forma 2D média dos agregados por fração.....	151
Figura 4-46 - Comparação entre angularidade média dos agregados por fração.	152
Figura 4-47 - Comparação entre esfericidade média dos agregados por fração.....	153
Figura 4-48 - Comparação entre textura superficial média dos agregados por fração.	154
Figura 4-49 - Porcentagem de partículas achatado e alongado pelo AIMS.....	155
Figura 4-50 - Avaliação de agregados achatado e alongado para as relações 3:1 e 5:1.	155
Figura 4-51 – Resultado “Achatado ou Alongado” pelo AIMS.	156
Figura 4-52 – Exemplificação das divergências entre a média do AIMS (3) e recalculado (4).	157
Figura 4-53 – Exemplificação dos erros 1 e 2 encontrado na planilha do AIMS.....	157
Figura 4-54 - Análise estatística para angularidade do ensaio AIMS.....	159
Figura 4-55 - Análise estatística para textura superficial.	160
Figura 4-56 - Análise estatística para esfericidade do ensaio AIMS.	161
Figura 4-57 - Análise estatística para forma 2D do ensaio AIMS.	162
Figura 4-58 - Resultados dos ensaios de resistência.....	164
Figura 4-59 - Curva granulométrica após ensaio ALA.....	167
Figura 4-60 - Gráfico da regressão linear com o modelo matemático gerado pela regressão B.	171
Figura 4-61 - Ilustração do procedimento do ensaio de Esmagamento, A) antes do ensaio; B) resultado após a aplicação da carga e com espaços vazios entre os agregados, e, C) resultado após a aplicação da carga, com espaços vazios preenchidos por agregado fino.	173
Figura 4-62 - Curva granulométrica após ensaio de Esmagamento.	173
Figura 4-63 - Amostra submetida ao ensaio de Carga Pontual após 30 dias de saturação.	178
Figura 4-64 - Gráficos de Boxplot para o ensaio de carga pontual na condição a) seca ao ar e b) saturada.....	181
Figura 4-65 - Resultado do ensaio de sanidade pela norma DAER / RS – EL 104/01 e DNIT 89/94 classificados em agregados graúdos e miúdos.	186
Figura 4-66 - Resultado do ensaio de sanidade separado por fração para as normas DAER e DNER.	188
Figura 4-67 - Agregados pós ensaio de adesividade de acordo com ranking proposto por Brondani (2019), destacando no círculo em vermelho, os pontos mais críticos.	190
Figura 4-68 - Relação entre acidez das rochas, classificação da adesividade visual CAP 50/70 e textura superficial da amostra por intermédio do AIMS.	192
Figura 4-69 - Fluxograma com as principais relações obtidas na análise petrográfica em relação aos demais ensaios de caracterização.....	194
Figura 4-70 - Diagrama explicativo para avaliação da regressão.....	197
Figura 4-71 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs ESM (%) referente ao conjunto de rochas.....	199
Figura 4-72 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs ESM (%) separado por litologia.	200
Figura 4-73 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Treton (%) referente ao conjunto de rochas.	201
Figura 4-74 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Treton (%) separado por litologia.	201
Figura 4-75 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Is(50) Seco (MPa) referente ao conjunto de rochas.	203

Figura 4-76 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Is(50) Seco (MPa) separado por litologia.	203
Figura 4-77 - Gráfico de regressão linear entre ESM vs Treton referente ao conjunto de rochas.	204
Figura 4-78 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Treton separado por litologia.	205
Figura 4-79 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Is(50) Seco – (Mpa) referente as rochas.	206
Figura 4-80 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Is(50) Seco – (Mpa) separado por litologia.	206
Figura 4-81 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Is(50) Saturado – (Mpa) referente as rochas.	207
Figura 4-82 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Is(50) Saturado – (Mpa) referente as rochas.	208
Figura 4-83 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.	210
Figura 4-84 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.	211
Figura 4-85 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Absorção (%) separado por litologia.	212
Figura 4-86 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Absorção (%) referente as rochas.	212
Figura 4-87 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.	213
Figura 4-88 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Absorção (%) separado por litologia.	214
Figura 4-89 - Gráfico de regressão linear entre Treton (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.	215
Figura 4-90 - Gráfico de regressão linear entre Treton (%) vs Absorção (%) separado por litologia.	215
Figura 4-91 - Gráfico de regressão linear entre Is (50) Seco (Mpa) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.	216
Figura 4-92 - Gráfico de regressão linear Is (50) Seco (Mpa) vs Absorção (%) separado por litologia.	216
Figura 4-93 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Sanidade (%) referente ao conjunto de rochas.	218
Figura 4-94 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Sanidade (%) separado por litologia.	218
Figura 4-95 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Sanidade (%) referente ao conjunto de rochas.	219
Figura 4-96 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Sanidade (%) separado por litologia.	220
Figura 4-97 - Gráfico de regressão linear entre Treton (%) vs Sanidade (%) referente ao conjunto de rochas.	221
Figura 4-98 - Gráfico de regressão linear entre Treton (%) vs Sanidade (%) separado por litologia.	221
Figura 4-99 - Gráfico de regressão linear entre ALA, ESM e Treton (%) vs Granulometria (mm) ensaios mecânicos e granulação da rocha.	223
Figura 4-100 - Gráfico de regressão linear entre M.E.A (g/cm ³) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.	224

Figura 4-101 - Gráfico de regressão linear entre M.E.A (g/cm ³) vs Absorção (%) separado por litologia.....	225
Figura 4-102 - Gráfico de regressão linear entre M.E.A (g/cm ³) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.	226
Figura 4-103 - Gráfico de regressão linear entre M.E.A (g/cm ³) vs Absorção (%) separado por litologia.....	226
Figura 4-104 - Gráfico de regressão linear entre Sanidade (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.	227
Figura 4-105 - Gráfico de regressão linear entre Sanidade (%) vs Absorção (%) separado por litologia.....	228
Figura 4-106 - Gráfico de regressão linear entre Ângulo de atrito (°) vs FAA-A (%) referente ao conjunto de rochas.	229
Figura 4-107 - Gráfico de regressão linear entre FAA – A (%) vs Angularidade - AIMS referente ao conjunto de rochas.	230
Figura 4-108 - Gráfico de regressão linear entre Ângulo de atrito (°) vs Angularidade - AIMS referente ao conjunto de rochas.	231
Figura 4-109 - Gráfico de regressão multivariada referente ao conjunto de rochas.....	233
Figura 4-110 - Gráfico de regressão multivariada entre ALA (%) vs ESM (%) e Is(50) (Mpa) seca referente ao conjunto de rochas.	234
Figura 4-111 - Gráfico de regressão multivariada entre ALA (%) vs Absorção ³ / ₄ ” (%) e Absorção ³ / ₈ ” (%) referente ao conjunto de rochas.	236

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Pesquisa desenvolvidas no Brasil empregando a avaliação da forma por meio do AIMS.	44
Tabela 2-2 - Ranking de adesividade visual CAP 50/70.	53
Tabela 2-3- Comparativo entre normativas.	55
Tabela 3-1 - Localização, código das pedreiras estudadas.	60
Tabela 3-2 - Ensaios laboratoriais realizados em acordo com as especificações normativas. .	61
Tabela 3-3 - Separação da amostra para realização do ensaio de granulometria.....	64
Tabela 3-4 - Equações utilizadas para obtenção dos parâmetros físicos graúdo e miúdo.	66
Tabela 3-5 - Equações para obtenção do índice de forma.	69
Tabela 3-6 - Parâmetros estabelecidos para avaliação da angularidade do agregado fino de acordo com os Métodos A, B e C.	71
Tabela 3-7- Cálculo utilizado na obtenção da angularidade do agregado fino (AFF).....	71
Tabela 3-8 - Critério utilizado na avaliação visual do agregado miúdo.	73
Tabela 3-9 - Classificação da esfericidade/angularidade de acordo com a soma S ou P.	74
Tabela 3-10 - Formulas utilizadas para obtenção dos parâmetros de cisalhamento direto.....	75
Tabela 3-11 - Valor mínimo requerido por cada fração para o ensaio AIMS 2.	77
Tabela 3-12 - Equações utilizadas para caracterização AIMS.....	77
Tabela 3-13 - Valores limites estabelecidos para a classificação do resultado AIMS 2 através da metodologia Al-Rousan (2004) e Ibiapina et al (2018).	78
Tabela 3-14 - Equações utilizadas para obtenção dos parâmetros mecânicos.....	82
Tabela 3-15 - Variáveis dependentes e independentes utilizadas na análise de regressão linear simples.....	86
Tabela 3-16 - Variáveis dependentes e independentes utilizadas na análise de regressão multivariada.....	86
Tabela 4-1 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida FRAG-M (NBR 7389-1/2009). .	89
Tabela 4-2 - Descrição petrográfica da Amostra 2 da jazida FRAG-F (NBR 7389-1/2009). ..	90
Tabela 4-3 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida VOG (NBR 7389-1/2009).	95
Tabela 4-4 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida MIN (NBR 7389-1/2009).	99
Tabela 4-5 - Descrição petrográfica da Amostra 2 da jazida MIN (NBR 7389-1/2009).	100
Tabela 4-6 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida COMP (NBR 7389-1/2009).	103
Tabela 4-7 - Descrição petrográfica da Amostra 02 da jazida COMP (NBR 7389-1/2009). ..	104
Tabela 4-8 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida ELD (NBR 7389-1/2009).	108
Tabela 4-9 - Descrição petrográfica da Amostra 2 da jazida ELD (NBR 7389-1/2009).	109
Tabela 4-10 - Compilação da análise petrográfica.	112
Tabela 4-11 - Coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (CC). Sendo: Uni. (uniforme), Desu. (desuniforme); Desc. (descontínua); BG (bem graduado); MU (médio uniforme).	116
Tabela 4-12 - Parâmetros estatístico e classificação dos agregados para todas as jazidas.	146
Tabela 4-13 – Média do resultado AIMS e recalculado para o ensaio de angularidade.....	158
Tabela 4-14 - Média do resultado AIMS e recalculado para o ensaio de textura superficial. .	159
Tabela 4-15 - Média do resultado AIMS e recalculado para o ensaio de esfericidade.....	160
Tabela 4-16 - Média do resultado AIMS e recalculado para o ensaio de forma 2D.....	161
Tabela 4-17 – Resultados da análise estatística ANOVA	162
Tabela 4-18 - Limites estabelecidos pelos órgãos viários e ferroviário para os ensaios de resistência mecânica.	166
Tabela 4-19 - Resultados do ensaio de resistência – ALA e características das amostras.....	168
Tabela 4-20 - Matriz de correlações dos resultados do ensaio de resistência ALA.....	169

Tabela 4-21 - Estatística de Regressão ALA.....	170
Tabela 4-22 - Equação de regressão ALA.....	170
Tabela 4-23 - Estatística da regressão B.	171
Tabela 4-24 - Equação de regressão B.	171
Tabela 4-25 - Estatística da regressão C.	172
Tabela 4-26 - Equação de regressão C.	172
Tabela 4-27 - Resultados do ensaio de resistência – Esmagamento e características das amostras.	174
Tabela 4-28 - Matriz de correlações dos resultados do ensaio de resistência ALA.	175
Tabela 4-29 - Estatística da regressão A.	176
Tabela 4-30 - Equação de regressão A.	176
Tabela 4-31 - Estatística da regressão B.	176
Tabela 4-32 - Equação de regressão B.	176
Tabela 4-33 - Resultado da compreensão puntiforme calculado conforme normativa ISRM (1985).	178
Tabela 4-34 - Classificação para compressão puntiforme.....	179
Tabela 4-35 - Resultado do teste Shapiro – Wilk (S-W).....	180
Tabela 4-36 - Valores de <i>outliers</i> em comparação com os superiores e inferiores.	182
Tabela 4-37 - Resultado obtido com o teste <i>t de Student</i>	182
Tabela 4-38 - Resistência a compressão puntiforme conforme ISRM (1985) e após análise estatística dos dados.	183
Tabela 4-39 - Resultados obtidos para E.A (%) e valores estabelecidos nas especificações do DAER e DNIT.....	184
Tabela 4-40 - Valor mínimo exigido em percentagem de equivalente de areia para Superpave.	185
Tabela 4-41 - Limites estabelecidos pelos órgãos viários nos ensaios de sanidade.....	186
Tabela 4-42 - Resultados do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso.....	189
Tabela 4-43 - Classificação da adesividade numérico visual.....	190
Tabela 4-44 - Parâmetros de correlação.	196
Tabela 4-45 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	199
Tabela 4-46 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	200
Tabela 4-47 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	202
Tabela 4-48 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	204
Tabela 4-49 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	205
Tabela 4-50 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	207
Tabela 4-51 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	209
Tabela 4-52 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	210
Tabela 4-53 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	213
Tabela 4-54 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	214
Tabela 4-55 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	215
Tabela 4-56 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	217
Tabela 4-57 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	219
Tabela 4-58 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	220
Tabela 4-59 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	222
Tabela 4-60 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	224
Tabela 4-61 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	225
Tabela 4-62 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	227
Tabela 4-63 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	229
Tabela 4-64 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	230
Tabela 4-65 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.....	230

Tabela 4-66 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão multivariada.	232
Tabela 4-67 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão multivariada.	234
Tabela 4-68 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão multivariada.	235
Tabela 4-69 - Tabela resumo do modelo de regressão linear simples.	237
Tabela 4-70 - Tabela resumo do modelo de regressão múltipla.	237

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMS	Agregate Image Measurement System
AFF	Angularidade do Agregado Fino
ALA	Resistência Abrasão Los Angeles
ASTM	American Society of Testing and Materials
CONP	Conpasul
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CDF	Cinturão Dom Feliciano
DAER	Departamento Autônomo de Estrada de Rodagem - RS
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura - SC
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - RS
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELD	Eldorado
EM	Especificações de Material
ES	Especificações de Serviço
ESM	resistência ao Esmagamento
ESRG	Escudo Sul Riograndense
FAA	Fine Aggregate Angularity
FRAG	Britadores Fragosos
FRX	Fluorescência de Raio X
GEPPASV	Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária
GCL	Granito Capão do Leão
IE	Instruções de Ensaio
IF	índice de Forma
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológica
ISRM	International Society for Rock Mechanics
LMCC	Laboratório de Materiais e Construção Civil
ME	Método de Ensaio
MIN	Minersul
MG	Minas Gerais
NBR	Normas Técnica Brasileiras
PDI	Processamento Digital de Imagem
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RJ	Rio de Janeiro
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SP	São Paulo
TAV	Trem de Alta Velocidade
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
VOG	Vogelsanger

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVO GERAL	22
1.2.1	Objetivos específicos	22
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E LOCAL	24
2.1.1	Contextualização geológica da Região do Estado de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul	24
2.2	DIFERENTES TIPOS DE ROCHAS	28
2.2.1	Rochas ígneas	29
2.2.2	Rochas metamórficas.....	31
2.3	AGREGADOS PÉTREOS E APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL	33
2.3.1	Estudos de casos de agregados.....	34
2.3.2	Considerações finais	37
2.4	PROPRIEDADES DOS AGREGADOS	38
2.4.1	Análise petrográfica e mineralógica.....	38
2.4.2	Forma, angularidade e textura das partículas	41
2.4.3	Resistência mecânica	46
2.4.4	Durabilidade e Sanidade	48
2.4.5	Porosidade e absorção	49
2.4.6	Afinidade ao ligante asfáltico.....	50
2.4.7	Comparativo entre as especificações no âmbito da engenharia	55
2.4.8	Considerações finais	57
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	59
3.1	ETAPA DE CAMPO	59
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	61
3.2.1	Análise petrográfica.....	62
3.2.2	Análise granulométrica	63
3.2.3	Equivalente de Areia.....	64
3.2.4	Índices físicos e massa unitária.....	65
3.2.5	Forma, angularidade e textura das partículas	67
3.2.5.1	<i>Avaliação da forma.....</i>	68
3.2.5.2	<i>Avaliação da lamelaridade</i>	69
3.2.5.3	<i>Avaliação da angularidade dos agregados miúdos</i>	71
3.2.5.4	<i>Caracterização da forma dos agregados através do PDI</i>	76
3.2.6	Resistência mecânica	78
3.2.7	Durabilidade e sanidade.....	82
3.2.8	Afinidade ao ligante asfáltico.....	84
3.3	ANÁLISES DE CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS	84
3.3.1	Metodologia aplicada na análise de correlação linear simples	85
4	RESULTADOS E ANÁLISES	87
4.1	AVALIAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO E ANÁLISE PETROGRÁFICA	87
4.1.1	Pedreira Fragoso (FRAG).....	87
4.1.2	Pedreira Vogelsanger (VOG)	92
4.1.3	Pedreira Minersul (MIN)	96

4.1.4	Pedreira Compasul (CONP)	101
4.1.5	Pedreira Eldorado (ELD)	106
4.1.6	Síntese das análises	110
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	113
4.2.1	Análise granulométrica	113
4.2.2	Índices físicos e massa unitária	118
4.2.2.1	<i>Síntese das análises</i>	122
4.2.3	Avaliação da forma do agregado através dos ensaios convencionais	122
4.2.3.1	<i>Avaliação da forma dos agregados</i>	123
4.2.3.2	<i>Avaliação da forma dos agregados separados peneira a peneira</i>	141
4.2.3.3	<i>Síntese das análises</i>	143
4.2.4	Avaliação da forma do agregado através do PDI	144
4.2.4.1	<i>Avaliação da forma do agregado</i>	145
4.2.4.2	<i>Avaliação e caracterização da forma do agregado por meio do PDI separado por pilha e por fração</i>	151
4.2.4.3	<i>Avaliação das partículas achatadas e alongadas através do PDI</i>	154
4.2.4.4	<i>Análise Crítica do AIMS</i>	156
4.2.4.5	<i>Síntese das análises</i>	163
4.2.5	Resistência mecânica	164
4.2.5.1	<i>Análise de resistência à degradação</i>	164
4.2.5.1.1	<i>Avaliação da degradação</i>	166
4.2.5.1.2	<i>Síntese das análises</i>	177
4.2.6	Compressão Puntiforme (Uniaxial)	177
4.2.6.1	<i>Análise estatística: Compressão Puntiforme (uniaxial)</i>	180
4.2.6.2	<i>Síntese da Análise</i>	183
4.2.7	Equivalente de Areia	184
4.2.8	Durabilidade e sanidade	185
4.2.8.1	<i>Avaliação da sanidade por pilha</i>	187
4.2.8.2	<i>Síntese das análises</i>	188
4.2.9	Adesividade	189
4.2.9.1	<i>Síntese das análises</i>	193
4.2.10	Diagrama resumo	193
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	195
4.3.1	Análise de correlação	196
4.3.2	Análise de regressão	197
4.3.3	Análise de regressão linear simples	198
4.3.3.1	<i>Características mecânicas</i>	198
4.3.3.1.1	<i>Abrasão Los Angeles</i>	198
4.3.3.1.2	<i>Esmagamento</i>	203
4.3.3.1.3	<i>Síntese das análises</i>	208
4.3.3.2	<i>Características mecânicas versus índices físicos</i>	208
4.3.3.2.1	<i>Abrasão Los Angeles</i>	209
4.3.3.2.2	<i>Esmagamento</i>	212
4.3.3.2.3	<i>Treton</i>	214
4.3.3.2.4	<i>Is(50) seco</i>	215
4.3.3.3	<i>Características mecânicas versus durabilidade</i>	217
4.3.3.3.1	<i>Abrasão Los Angeles</i>	217
4.3.3.3.2	<i>Esmagamento</i>	219
4.3.3.3.3	<i>Treton</i>	220
4.3.3.4	<i>Características mecânica versus análise petrográfica</i>	221

4.3.3.5	<i>Índices Físicos</i>	223
4.3.3.5.1	M.E.A versus Absorção	224
4.3.3.5.2	Índices Físicos versus durabilidade	226
4.3.3.6	<i>Angularidade do Agregado Miúdo</i>	228
4.3.4	Análise de regressão múltipla	231
4.3.4.1	<i>Características mecânicas</i>	232
4.3.4.1.1	Abrasão Los Angeles versus Esmagamento e Treton	232
4.3.4.1.2	Abrasão Los Angeles versus Esmagamento e Is(50)Seco	233
4.3.4.1.3	Abrasão Los Angeles versus Absorção (¾”) e Absorção (⅜”).....	235
4.3.5	Síntese das análises	236
5	CONCLUSÃO	238
6	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	241
7.	REFERÊNCIAS	242

1 INTRODUÇÃO

O agregado mineral é o componente largamente utilizado nas mais diversas áreas da engenharia civil, sendo o material predominante nos concretos Portland, revestimento asfáltico, lastro ferroviário e enrocamentos (CAVALCANTI e PARAHYBA, 2012). Desta forma, os agregados compõem cerca de 80-90% do volume das misturas asfálticas (PAZOS, 2015), sua aceitação em obras está condicionada principalmente às suas características tecnológicas. Os agregados usados em construção rodoviária são largamente obtidos de depósitos de rochas naturais (ROBERTS et al., 1996), no entanto, a escolha do material rochoso se dá de acordo com a sua disponibilidade *versus* a distância de transporte entre a pedreira e o local da obra.

O uso de materiais rochosos na engenharia civil é amplo e conforme sua aplicação, há certos níveis de rigores e propriedades necessários que são estabelecidos em projetos, logo, são necessárias metodologias específicas capazes de caracterizar geológico-geotecnicamente o material rochoso, as quais permitirão qualificar e quantificar os parâmetros de interesse (BACK, 2018). Assim, a seleção de agregados com propriedades satisfatórias para uso possibilita ganhos significativos no desempenho do projeto, como por exemplo, na ferrovia, reduzindo desgastes e falhas dos elementos constituintes da via (trilhos, dormentes, fixadores, lastro e sublastro), por sua vez, na pavimentação, reflete na estabilidade e resistência à estrutura de pavimentos (BARRA et al., 2010).

Nos últimos anos têm crescido o número de estudos sobre as propriedades dos agregados que afetam no desempenho e qualidade dos pavimentos asfálticos (PARKER, 1998; LEE; WHITE; WEST, 1999; MAHMOUD; ORTIZ, 2014; MASAD et al., 2007; PAN et al., 2006; PAN; TUTUMLUER; CARPENTER, 2006; WHITE; HADDOCK; RISMANTOJO, 2006), principalmente aqueles relacionando o desempenho e as propriedades dos pavimentos com as características morfológicas das partículas (AHO et al., 2001; BESSA et al., 2009; ALVES, 2014; ARASAN et al., 2011; BOLER; QIAN; TUTUMLUEN, 2014; CASTILLO et al., 2018; CHEN; HSIEH; LIAO, 2013; KUANG et al., 2019; MASAD et al., 2007). Segundo Rousan (2004) os parâmetros morfológicos influenciam na interação interpartícula e a interação desta com o material estabilizante (betume, cimento) relacionando-se diretamente à performance dos pavimentos. O que justificaria estudos desta natureza.

Além disso, há uma alta relação entre a resistência dos agregados e suas propriedades petrográficas, dentre elas, textura, mineralogia, deformação, alteração e padrão de microfissuramento (REMÉDIO, 2017). Desta forma, a caracterização petrográfica e a

morfologia dos agregados são parâmetros fundamentais no controle da qualidade e auxiliam para uma melhor compreensão das relações entre a geologia e as propriedades tecnológicas das pedras britada de diferentes litotipos, uma vez que, a origem da rocha associada aos parâmetros de britagem, influenciam na variação das propriedades de forma dos agregados (BÉRUBÉ, 2001; BOUQUETY et al., 2007, DIOGENES, 2018).

Em vista da relevância do assunto, e a necessidade de obter dados referentes à caracterização do material rochoso utilizado como agregado em algumas obras de rodovias do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, faz-se necessário um estudo na tentativa de compreender as relações entre morfologia do agregado, resistência à degradação e petrografia das rochas. Dentro deste contexto, a presente pesquisa procurou estudar o comportamento mecânico das rochas em função de suas características geológicas e, assim, estabelecer correlações entre sua formação (gênese) e as características geotécnicas e físico-mecânicas do maciço rochoso, a partir de investigações de campo complementadas com ensaios de laboratórios.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) participa da Rede Temática de Asfalto desenvolvido pela Petrobras, cujo objetivo consiste no desenvolvimento de um método de dimensionamento de pavimentos asfálticos através do emprego de materiais levando em consideração as condições ambientais nacionais. Sendo assim, a presente pesquisa busca dar continuidade a um projeto que vem sendo desenvolvido desde 2017, sendo Paiva (2017) a pioneira, seguida por Back (2018), de modo a gerar um banco de dados nacional por meio do estudo de diferentes agregados rochosos provenientes de diversas litologias encontrados no território Rio Grandense e Catarinense (extrapolação desta pesquisa), de modo a associar suas origens geológicas (gênese) às suas características físicas e geomecânicas, bem como do levantamento de parâmetros e correlações existentes entre elas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Estudar e entender as propriedades gerais das rochas são preceitos básicos advindos da geologia. Por sua vez, a engenharia civil, utiliza o material rochoso com o propósito de aplicação nas mais diversas obras civis. Salienta-se ainda que, essas duas áreas se correlacionam para o entendimento entre as propriedades de agregados pétreos e os compósitos que os contém.

No entanto, as lacunas existentes na compressão entre as características das rochas e propriedades tecnológicas dos agregados nas obras de engenharia, foi o que embasou a presente pesquisa. Embora alguns estudos já foram desenvolvidos com essa temática, ainda existem

brechas a serem preenchidas, principalmente tratando-se de rochas ígneas plutônicas (ainda pouco utilizadas no Rio Grande do Sul).

Desta forma, faz-se necessário um estudo com o propósito de compreender as relações entre a morfologia dos agregados, resistência à degradação e petrografia de rochas de litotipos diferentes dos avaliados por Paiva (2017) e Back (2018), que são amplamente utilizados nas regiões sudestes do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Portanto, a presente pesquisa surgiu com o propósito em dar continuidade aos estudos já desenvolvidos pelo Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV), assim como, acrescentar um viés mais estatístico com a finalidade em buscar modelos matemáticos que permitam obter correlação com um certo nível de confiabilidade entre os ensaios.

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem o objetivo geral analisar as relações entre propriedades físicas, mecânicas, químicas, mineralógicas e texturais das rochas plutônicas e metamórficas provenientes de jazidas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, visando caracterização tecnológicas do desempenho dos agregados em obras de engenharia.

1.2.1 Objetivos específicos

- Investigar as relações entre as propriedades tecnológicas de rochas ígneas plutônicas e metamórficas e suas utilizações como agregados para pavimentação e lastro ferroviário;
- Analisar a resistência das partículas à quebra, à Abrasão Los Angeles e a tenacidade, buscando relacioná-la às suas propriedades petrográficas e morfológicas;
- Estabelecer correlações entre as propriedades dos materiais pétreos que compõem as jazidas investigadas, demonstrando a qualidade mecânica e reatividade em ligantes;
- Elaborar diagrama resumindo e relacionando os resultados a fim de auxiliar a seleção de agregados minerais com base nas características da rocha de origem;
- Elaborar um banco de dados com os resultados já obtidos no GEEPASV e presente na literatura; e,
- Realizar uma análise estatística com um banco elaborado a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, nas pesquisas anteriores, bem como na literatura científica brasileira, com o propósito de criar um modelo matemático que permita prever o comportamento e desempenho de agregados, frente suas diferentes gênese e estruturas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No intuito de atingir os objetivos propostos mencionados para esta dissertação, no capítulo 2 foram discutidos os principais assuntos que dão suporte ao tema central para a presente pesquisa. Procurou-se revisar a bibliografia internacional e nacional a respeito da caracterização dos agregados com fins de aplicação na área de engenharia civil.

O capítulo 3 foi dedicado exclusivamente à apresentação detalhada das técnicas utilizadas desde a etapa de campo até os ensaios experimentais de execução em laboratórios. No capítulo 4 estão apresentados e discutidos os resultados obtidos através de etapa campo, e ensaios laboratoriais, em adição, é apresentada uma análise estatística com os resultados obtidos na presente pesquisa, do grupo de pesquisa do GEPPASV e na literatura. Finalmente, no capítulo 5 são explanadas as conclusões desta dissertação de mestrado e no capítulo 6, são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para uma melhor compreensão dos assuntos a serem abordados na revisão, este capítulo foi fragmentando em subtítulos: i) geologia regional das áreas onde estão inseridas as pedreiras; ii) conceito dos diferentes tipos de rochas; iii) aplicação do material pétreo na engenharia civil; iv) propriedades dos agregados para fins de pavimentos asfáltico; e, vi) conceitos da análise estatística.

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E LOCAL

Neste capítulo, apresenta-se uma descrição sucinta do contexto geológico presente nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com foco na área das pedreiras estudadas. O que permitirá posteriormente correlacionar esses dados com os resultados obtidos da caracterização geológica-geotécnica e dos ensaios tecnológicos e mecânicas das rochas

2.1.1 Contextualização geológica da Região do Estado de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul

O Brasil encontra-se no centro da placa tectônica Sul-americana e possui um dos mais completos registros da evolução geológica da Terra, com mais de 3 bilhões de anos, do período Arqueano Inferior (CPRM, 2003). A porção Sul do país é formada por duas províncias: Província do Paraná e Província Mantiqueira.

Os Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul são compostos predominantemente pela Formação da Província do Paraná e em menor porção pela Província Mantiqueira. As áreas de estudo do presente trabalho estão localizadas geologicamente na borda da região Sul, onde se encontra a Província Mantiqueira.

Esta Província resulta da colisão de placas tectônicas que gerou dobras, cordilheiras e fossas. Estende-se por aproximadamente 3.000 km ao longo da costa atlântica, iniciando em Montevidéu, no Uruguai, até o sul do Estado da Bahia (CPRM, 2003).

Embora mais da metade do Estado do Rio Grande do Sul, como também de Santa Catarina, seja recoberto por derrames basálticos, cabe salientar as porções de ocorrência das rochas graníticas. No Sul do Brasil, o magmatismo neoproterozóico pós colisional (Bitencourt & Nardi, 1993, 2000) perfaz o maior volume de rochas granitóides, expostas em uma faixa de direção NE que estende de Santa Catarina ao Uruguai, associada à tectônica transpressiva do

final do Ciclo Brasileiro, designada a Batólito Pelotas, no Escudo Sul Riograndense (ESRG), e Batólito Florianópolis, no Escudo Catarinense.

O ESRG possui aproximadamente 65.000 km² de área e encontra-se na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul. Nesta província geológica, Chemale Jr (2000) comenta que afloram rochas do embasamento cristalino Neoarqueanas e da evolução Vulcano-sedimentar, com idades Ordovicianas. Estudos realizados por Hartmann, Chemale Jr e Philipp (2007) dividiram o ESRG em quatro unidades geotectônicas: Batólito Pelotas, Terreno São Gabriel, Terreno Taquerebó (representa o Cráton Rio de La Plata no Brasil) e o Terreno Tijucas.

De acordo com Fragoso César et al (1986), o Batólito Pelotas, foco do presente estudo, foi denominado, como um complexo plutônico, multi-intrusivo, resultante de longa evolução, que enquadram as rochas do Granito Capão do Leão, situado na porção sudeste do domínio leste do Cinturão Dom Feliciano. O Batólito Pelotas, está situado na porção leste do Escudo Sul-Riograndense com extensão de 400 km de comprimento e 80 km a 120 km de largura (PHILIPP et al., 2002), com continuidade para norte, em Santa Catarina, e para sul, no Uruguai. Em adição, o Batólito resulta de um complexo plutônico composto de várias suítes, cujo magmatismo teve duração de cerca de 70 Ma (entre 630 e 570 Ma) (PHILIPP et al, 2002). Esse mesmo autor, porém, em outro estudo, descreveu seis suítes graníticas no presente batólito, sendo elas: Complexo Pinheiro Machado, Viamão, Encruzilhada do Sul, Cordilheira, Suíte Piquiri, Suíte Intrusivas Erval e Dom Feliciano (PHILIPP et al., 2007). Ressalta-se que, estes dois últimos, remetem a localização das jazidas estudadas na presente pesquisa, dentro do Rio Grande do Sul.

Ao sul do Batólito Pelotas de forma alongada e com direção NE-SW, afloram as rochas graníticas pertencentes a Suíte Intrusiva Erval (SIE) (PHILIPP, 1998). De acordo com Philipp e Machado (2001) as rochas desta suíte são homogêneas, textural e composicionalmente, com predomínio de monzogranitos e sienogranitos subordinados. Nas porções que esta rocha não foi afetada pela deformação, as estruturas magmáticas estão preservadas, com alinhamento de cristais euédricos de feldspato imerso numa textura equigranular-hipidiomórfica. São granitos de cor cinza claro, com plagioclásio prismático acinzentado, feldspato potássico subédrico branco a rosado, quartzo amebóide e biotita em lamelas euédricas intersticiais. Entretanto, a SIE é intensamente afetada por zonas de cisalhamento de alto ângulo, dúcteis e rúptil-ductil, destacando as Zonas de Cisalhamento Erval, Ayrosa Galvão e Arroio Grande (MACHADO et al., 1995).

Ao norte do Batólito, a Suíte Granítica Dom Feliciano é descrita como a suíte mais jovem do Cinturão Dom Feliciano (PHILIPP et al., 2002). Essa Suíte é constituída por maciços leucograníticos com textura equigranular e cores rosadas, castanhos e cinza claros (PHILIPP, 1998, PHILIPP 2002). Ressalta-se ainda que, esta suíte apresenta grande homogeneidade composicional, estrutural e petrográfica. Com composição muito restrita, dominada por termos sienograníticos, com álcalis-feldspato granitos subordinados. Os minerais essenciais são o ortoclásio e/ou microclínio subédrico e quartzo amebóide, com biotita subédrica (1 a 4%) intersticial. Os minerais acessórios são allanita, zircão, titanita, apatita e minerais opacos, por vezes também fluorita, molibdenita e galena.

Face a esse assunto, PHILIPP (1998) complementa que os corpos apresentam aspectos alongados e concordante com as zonas de cisalhamento, entretanto, registram presença incipientes de estruturas tectônicas dúcteis, com a ocorrência de pequenas faixas discretas de protomilonitos, restrita aos limites de alguns corpos.

Na região sudeste do Cinturão Dom Feliciano (CDF), afloram rochas do Granito Capão do Leão (GCL). O CDF representa uma faixa móvel, desenvolvida no Ciclo Orogênico Brasileiro-Panafricano, durante o Neoproterozoico, e é resultado do amalgamento do paleocontinente Gondwana Ocidental (Brito Neves et al., 1999, 2014; Heilbron et al., 2004; Fernandes et al., 1995; Hartmann et al., 2007), correspondente a um complexo de rochas graníticas, no qual numerosos plútons se alojaram em distintos processos evolutivos (FERNANDES et al., 1995; CHEMALE JR., 2000; HARTMMANN et al., 2007). O Granito Capão do Leão, aflora na forma de dois corpos, nomeado por corpo norte e corpo sul. Sua assembleia mineral é essencialmente constituída de quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio.

Embora em sua composição prevaleça os sienogranitos, é possível constatar variações faciológicas gerando porções monzograníticas ao longo do corpo (Philipp et al., 2002). Por vezes, apresenta, foliação magmática dado pelo alinhamento de cristais de feldspato potássicos e enclaves máficos arredondados com dimensões de 2 a 15 cm. Como acessórios apresenta os mesmos minerais da Suíte Dom Feliciano, porém, com acréscimo de granada, sendo este o motivo do GCL ter sido destacado do restante da suíte.

Por sua vez, as pedreiras localizadas no Estado de Santa Catarina, são localizadas no Complexo Granulítico de Santa Catarina, designada como “[...] unidade geotectônica constituída por rochas metamórficas de alto grau, das fácies anfíbolitos em especial granulito, com idades raiométricas arqueanas [...]” (HARTMANN, 1979).

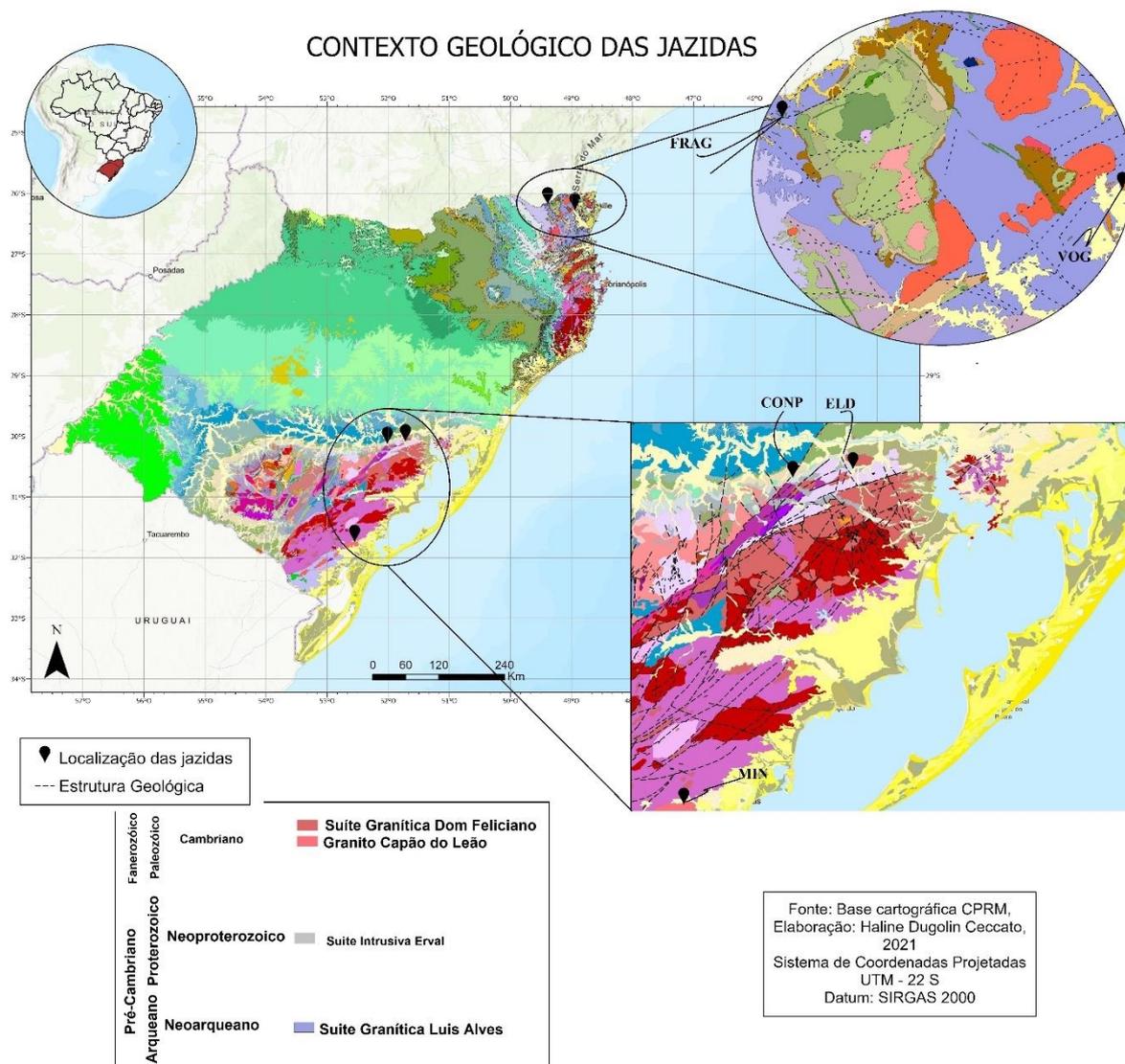
O Complexo Granulítico de Santa Catarina caracteriza-se por não ter sido afetado internamente pelos efeitos termo-tectônicos das orogêneses neoproterozóias durante o Ciclo Brasileiro, embora tenha sofrido a intrusão de granitos alcalinos peralcalinos da Suíte Serra do Mar, no neoproterozóico (HARTMANN et al., 1979). Por conseguinte, o respectivo Complexo é constituído predominantemente por uma vasta associação de rochas gnáissicas de origem orto e parametamórfica, onde predominam os ortognaisses.

No estado de Santa Catarina, o Complexo Granulítico de Santa Catarina, abrange quase toda a Folha Joinville. Este complexo foi subdividido em diversas unidades, cabe destacar os Gnaisses granulíticos Arqueanos-Paleoproterozóicos, mais especificamente, Gnaisses Granulíticos Luis Alves (A4PP21a), pertencentes ao respectivo estudo.

Geralmente, a rocha desta região apresenta coloração cinza-esverdeada, porém, com variações de preto a cinza claro, marcada por estrutura foliada e textura granulítica (SCHEIBE, 1986). Esta unidade resultou em litologias diversificadas, com predominância de gnaisses enderbíticos, charnoenderbíticos e trondhjemíticos com enclaves máficos ultramáficos de granulítico dioríticonoritos, metapiroxenitos e metahornblenditos. Também estão inclusos os gnaisses granulíticos básicos, gnaisses anfibolíticos, anfibolitos e lentes de gnaisses kinzigíticos, calcissilicatados e quartzitos.

Na Figura 2-1, estão localizadas, em escala regional, as pedreiras estudadas nesta pesquisa, de acordo com o contexto geológico ao qual elas estão inseridas.

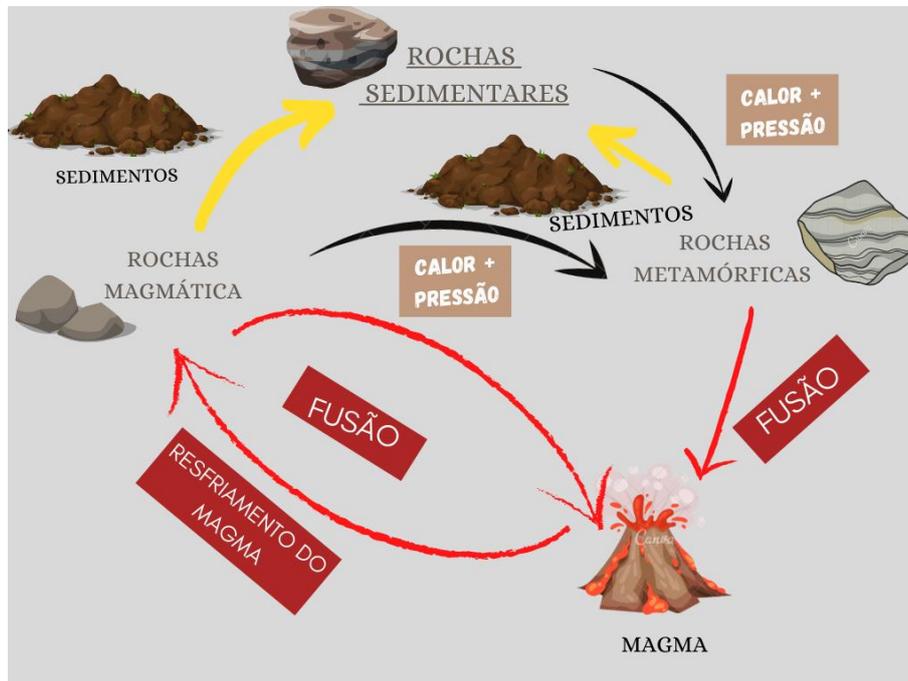
Figura 2-1 - Contexto geológico da área de estudo.



2.2 DIFERENTES TIPOS DE ROCHAS

De acordo com definição proposta por Oliveira e Brito (1998) rocha é: “Um corpo sólido natural, resultante de um processo geológico determinado, formado por agregados de um ou mais minerais, arranjados segundo as condições de temperatura e pressão durante sua formação”. As rochas são classificadas em três grandes grupos de acordo com sua gênese: ígneas, sedimentares e metamórficas. A Figura 2-2 sintetiza de modo figurativo a formação das rochas, por intermédio do “ciclo das rochas”.

Figura 2-2 - Ciclo das rochas.



Quase todas as rochas podem ser extraídas e utilizadas como agregados na engenharia civil, porém, algumas litologias são mais requeridas por conta da geologia regional e de sua disponibilidade. O presente trabalho focou nas rochas ígneas e metamórficas, mais comuns, para a produção de agregados.

2.2.1 Rochas ígneas

As rochas ígneas ou magmáticas, são formadas pela consolidação, em decorrência do resfriamento de material rochoso fundido a altíssima temperatura, conhecido como magma. Esse magma, em determinadas circunstâncias, ascende na superfície, passando a ser chamado de lava. À medida que o magma resfria por decorrência termodinâmicas, os cristais de minerais começam a se formar até serem completamente formados originando as rochas ígneas.

Destacam-se dois tipos de rochas ígneas: plutônicas ou intrusivas e vulcânicas ou extrusivas. Quando a solidificação do magma (lava), ocorre na superfície da crosta, leva à formação das rochas vulcânicas ou extrusivas. Por outro lado, se a consolidação do magma ocorre no interior da crosta, origina as rochas ígneas plutônicas ou intrusivas. Além destas, existem as rochas formadas em profundidades intermediárias da crosta, denominadas hipoabissais.

Durante o extravasamento explosivo, ou não, a lava, se consolida relativamente rápido, em virtude das diferenças de temperaturas existentes entre as regiões de origem e a superfície, resultando em rochas de granulação não visível a olho nu (afanítica), que pode ser constituída de vidro (amorfo) ou de microcristais, advindos da cristalização rápida dos minerais, ou até de uma granulação visível (fanerítica), porém, muito fina.

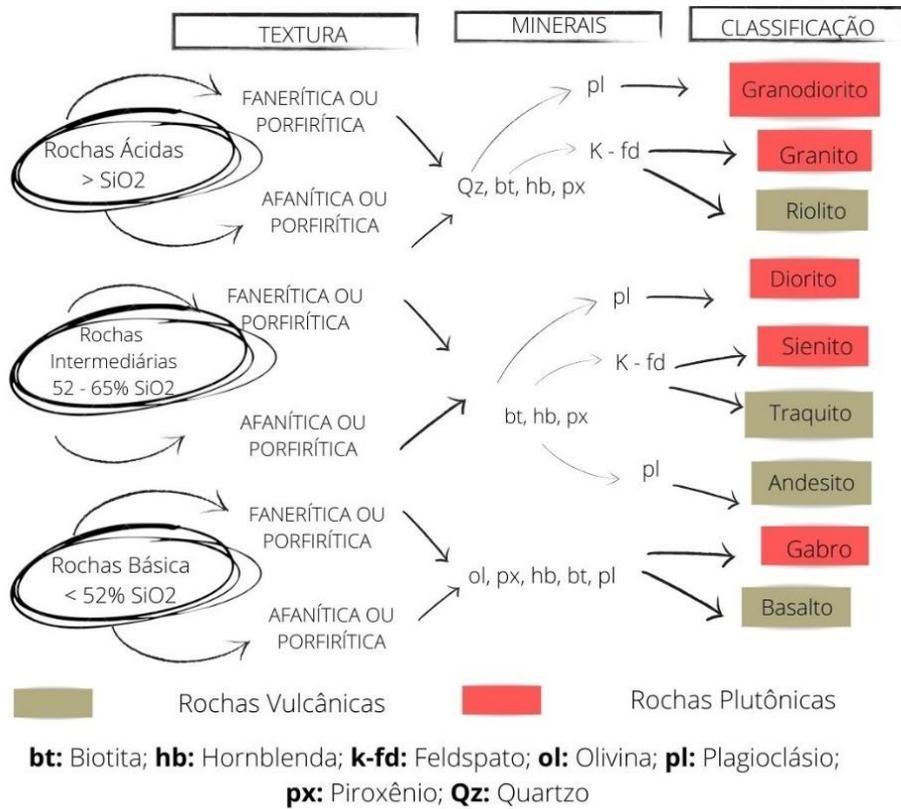
Por outro lado, as rochas ígneas intrusivas são formadas em profundidades, no interior da crosta terrestre, onde os processos de resfriamento e solidificação do magma, são lentos, proporcionando tempo suficiente para o crescimento dos cristais e, portanto, resultando em um material cristalino geralmente de granulação grossa e bem definidas. Ressalta-se que, as rochas de granulação muito grossa, são designadas como plutônicas, enquanto as de granulação médias ou intermediárias, em decorrência da cristalização mais rápida, recebem o nome de hipoabissais.

A acidez de uma rocha magmática é dependente da abundância de sílica. Em rochas que apresentam teor de sílica acima de 65%, o quartzo aparece em forma de mineral, e recebem denominação de “rocha ácida”. Em rochas com teor abaixo de 45%, os silicatos são feldspatóides, neste caso, trata-se de uma rocha não “saturada”, e passam a ser classificadas como “ultrabásicas”. Entre esse intervalo, tem-se as rochas intermediárias (65 a 52%) e básicas (52 a 45%).

As rochas ígneas, no geral, tendem a apresentar os melhores comportamentos geomecânicos. Rochas intrusivas, como o granito, e extrusivas, como o basalto, apresentam alta resistência mecânica, devido à forte coesão dos minerais constituintes. Em adição, as elevadas quantidades de quartzo nem sempre ocasionam uma alta resistência mecânica à rocha. Em contrapartida, aumentam a abrasividade e, conseqüentemente, apresentam maior desgaste dos equipamentos como os britadores, na geração dos agregados.

Em resumo, as rochas apresentam propriedades petrográfica que permitem caracterizá-las. Dessa maneira, o esquema apresentado na Figura 2-3, demonstra de forma simples as diferenças que podem ser utilizadas para a caracterização e descrição das rochas ígneas.

Figura 2-3 - Principais características das rochas ígneas.



2.2.2 Rochas metamórficas

O metamorfismo refere-se à mudança mineralógica e estrutura sofrida pelas rochas no estado sólido, sem, entretanto, alterar o “quimismo” (e.i., composição química global) dos materiais. Em síntese, as rochas metamórficas são formadas em altas temperaturas e pressões no interior da Terra que atuam em qualquer tipo de rocha, inclusive outras rochas metamórficas, com ou sem a presença de fluidos. Por conseguinte, embora o metamorfismo e a deformação ocorram de forma conjunta, trata-se de processos distintos.

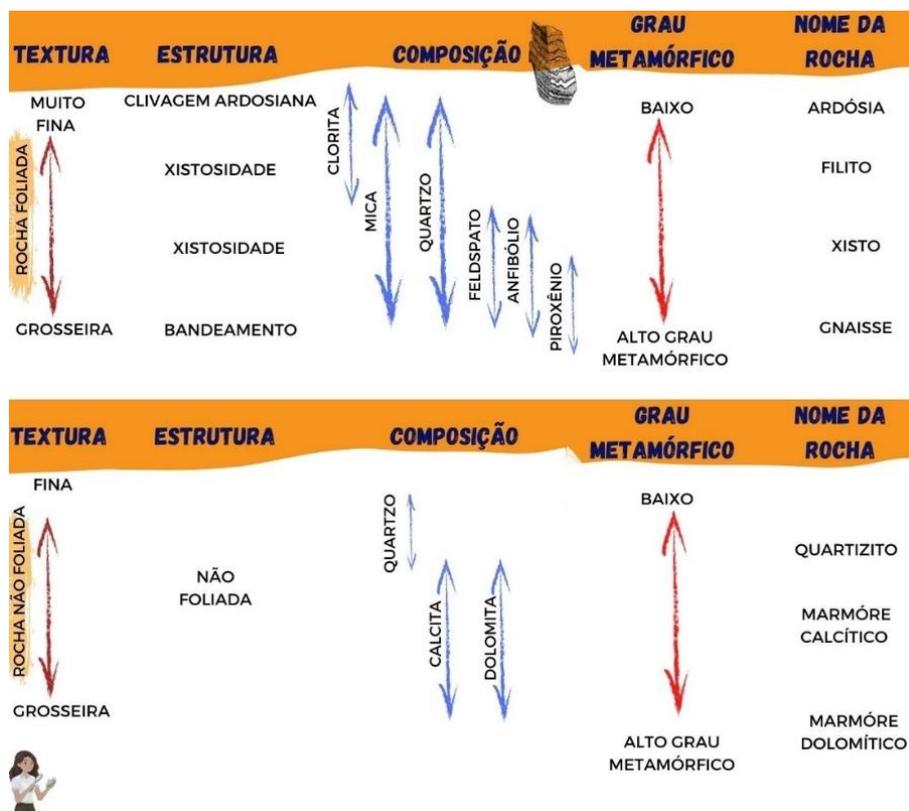
Desta maneira, rochas metamórficas são resultado da alteração na mineralogia, textura ou composição química de qualquer tipo de rocha em resposta à ação de altas pressões e temperaturas no interior da Terra. As temperaturas devem ser altas o suficiente para modificarem as rochas por cristalização e por reações químicas, porém, mais baixas que o seu ponto de fusão. Por conseguinte, quanto mais elevado o grau metamórfico, maior o tamanho dos cristais.

Por outro lado, a pressão, pode ser do tipo confinante ou dirigida. A primeira apresenta vetores de tensão iguais em todas as direções, no segundo caso, a tensão dirigida, é responsável pela forma e orientação dos novos cristais metamórficos, que, se originam à medida que os minerais recristalizam sob a influência de calor e tensão (PRESS et al., 2006).

Conseqüentemente, o metamorfismo regional gera extensas faixas de rochas deste tipo, onde altas pressões e temperaturas associam-se à amplas colisões de placas. Os gnaisses, por exemplo, resultado dessa interação, são rochas comumente usadas, principalmente em regiões litorâneas do país, em decorrência da formação geológica pelas grandes faixas de dobramentos regionais. Tratam de rochas de textura grossa e seu bandamento resulta da segregação de quartzo e feldspato, de coloração clara, e anfibólios, piroxênios, biotitas e outros minerais máficos de coloração escura. O estiramento dos minerais, em decorrência do processo de formação, associado a textura de média a grossa, interferem no desempenho mecânico.

Assim como as rochas ígneas, as rochas metamórficas apresentam propriedades petrográficas que permitem caracterizá-las. O esquema apresentado na Figura 2-4, resume de forma simples as diferenças que podem ser utilizadas para a caracterização desse tipo de litologia.

Figura 2-4 - Principais características das rochas metamórficas.



2.3 AGREGADOS PÉTREOS E APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL

Agregados são fragmentos de rochas que apresentam dimensões e propriedades que permitem utilização em quase todas as obras de engenharia civil (FRAZÃO & PARAGUASSÚ, 1998; FARIA & PALMEIRA, 2007). Desta forma, as propriedades dos agregados usados tanto em misturas asfálticas, como na área ferroviária, requerem material pétreo que apresente propriedades para o desempenho dessas obras. Sendo assim, a seguir serão abordados critérios a serem analisados quanto às essas obras de engenharias.

Os agregados compõem cerca de 80-90% do volume das misturas asfálticas (PAZOS, 2015), desta forma, sua aceitação em obras está condicionada principalmente por suas características tecnológicas. Independentemente da origem, método de processamento ou mineralogia, espera-se que o agregado empregado para tal finalidade, seja resistente (duro e durável) e que apresente um esqueleto mineral que suporte às aplicações de cargas repetidas pois a estrutura granular formada pelos agregados é uma das principais responsáveis pela resistência ao cisalhamento de um concreto asfáltico (GOUVEIA, 2002).

Portanto, as propriedades que influenciam nesta questão são a granulometria, a forma, a textura e a resistência ao polimento (REZAEI; MASAD, CHOWDHURY, 2011). Por conseguinte, Frazão (2002) ressalta que, diferentes tipos de rochas podem ser utilizados como agregados em aplicação de estradas, desde que se enquadrem dentro das características físicas e geológicas solicitadas. De acordo com Frazão e Paraguassu (1998) as principais características desejadas para fins rodoviários são:

- Baixo grau de alteração ou alterabilidade;
- Elevado grau de empacotamento:
 - Forma dos fragmentos a mais equidimensional possível;
 - Alta adesividade
- Elevado grau de resistência e dureza:
 - Alta resistência à Abrasão Los Angeles e compressão;
 - Alta tenacidade.

Do mesmo modo, na aplicação em obras ferroviárias, os agregados devem suportar a carga vinda dos dormentes, em decorrência das ações verticais e horizontais da passagem dos trens e das variações térmicas. Desta forma, devem transmitir essas solicitações ao leito, de modo a dissipar as tensões resultante no meio drenante para evitar o acúmulo de água na sua superfície.

Nesse sentido, Frazão (1987, 2007) e Frazão & Paraguassú (1998) indicam os requisitos desejáveis que o material pétreo deve apresentar, para fins ferroviários, conforme elencados a seguir:

- Alta tenacidade, para resistir ao impacto dos instrumentos de compactação do lastro;
- Alta resistência ao desgaste, para evitar a moagem em decorrência à passagem dos veículos e à movimentação horizontal dos trilhos;
- Alta resistência à compressão, para resistir aos esforços verticais provocados pelo peso dos veículos e distribuí-los eficientemente sobre o leito da estrada;
- Alta resistência à alteração, para suportar as ações intempélica, impedir a formação de finos (que também podem se formar por ações mecânicas) e evitar a redução do índice de vazios necessários a uma boa drenagem; e,
- Forma adequada das partículas após britagem, para propiciar tanto um bom imbricamento dos grãos como garantir uma adequada resistência mecânica.

Face a esse panorama, a seguir será apresentada uma breve revisão acerca de trabalhos encontrados na literatura, cujo foco constituiu na caracterização físico-mecânica dos agregados frente às obras de engenharia a ser empregada.

2.3.1 Estudos de casos de agregados

A rocha britada, ou seja, agregado, normalmente compreende entre 75 e 85% em volume do cimento Portland e mistura asfáltica e, portanto, não é de surpreender a necessidade de avaliação e caracterização deste material, para determinar sua adequação para qualquer obra de engenharia (AL-HARTHI, 2001). Agregado que apresenta baixa resistência à degradação pode causar problemas e não atingir desempenho adequado a solicitação imposta.

Trabalho desenvolvido na década de 80, pelo Instituto de Pesquisas Tecnológica (IPT), na caracterização de 90 jazidas de litologias diferentes situadas no Estado de São Paulo, serviu como base, para os estudos desenvolvidos por Frascá e Frazão (2002) com propósito de estipular valores máximo e mínimos para os ensaios de caracterização em função do tipo de rocha.

Com base nos resultados obtidos na caracterização de rochas vulcânicas ácidas associadas aos derrames basálticos de Santa Catarina, Santos (1990), sugeriu modificações nos valores máximo e mínimo nas especificações dos ensaios de Abrasão Los Angeles e degradação Washington com vista para aplicação em obras rodoviárias. Da mesma forma, o trabalho

desenvolvido em 1998, pela Engenharia, Consultoria e Economia S.A (ECL) para o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), com a caracterização de rochas presentes na região sudeste do Brasil, permitiu propor novos limites máximos aos ensaios de Abrasão Los Angeles de 65%, Esmagamento e Treton de 60%.

A investigação e caracterização de agregados muitas vezes consiste em verificar a eficácia da norma com os resultados apresentados *versus* o seu uso na prática. De certo modo, esse foi o objetivo da dissertação desenvolvida por Gouveia (2002) e Rodrigues (2019), com o propósito em avaliar o ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) presente na metodologia Superpave. Ambos os trabalhos tiveram o propósito de verificar se o ensaio FAA seria capaz de classificar os agregados finos, identificando os melhores agregados quanto a angularidade para aplicação em misturas asfálticas. Gouveia (2002) trabalhou com rochas do Estado de São Paulo e Rodrigues (2019) com agregados do Rio Grande do Sul. Além do ensaio de caracterização pelo FAA, ensaio de cisalhamento direto e análise visual, Gouveia (2002) realizou ensaio Marshall com os melhores resultados obtidos pelo FAA e Rodrigues (2019), avaliou a forma através do uso do PDI com a aplicação do AIMS2. Ao final do trabalho, as duas autoras mostraram que de fato o ensaio FAA por si só, não é capaz de classificar adequadamente os agregados finos e, conseqüentemente, não pode ser utilizado como critério para identificar agregados que proporcionam misturas asfálticas com melhor desempenho.

Outros trabalhos, tiveram como viés caracterizar e avaliar os agregados para uso em obras rodoviárias. Neste sentido, destaca-se os estudos desenvolvidos por Fiorentini (2002), Paiva (2017) e Back (2018) que caracterizam rochas ígneas vulcânicas, plutônicas e metamórficas, situadas no Rio Grande do Sul. Guimarães, Motta e Antonello (2010) caracterizaram calcários dolomitizados e metamorfizados do oeste do Paraná, concluindo tratar-se de rochas favoráveis na utilização em pavimentos, com baixa porosidade, estrutura maciça, alta resistência e durabilidade satisfatória. Meurer (2015), avaliou 4 diferentes jazidas situadas próxima a Joinville e, de acordo com a autora, todas as jazidas apresentaram resultados dentro dos parâmetros físicos das respectivas normativas, no entanto, para a aplicação desses materiais pétreos na mistura asfáltica, é necessária a utilização de *dope*, conforme comprovado pelo ensaio de adesividade. Curtis (2019), avaliou o maciço rochoso de uma pedreira situada no Estado de São Paulo, este trabalho reforça a importância da caracterização dos agregados extraídos da jazida, pois devido aos processos de diferenciação magmática dos corpos intrusivos da Formação Serra Geral, o maciço rochoso estudado é constituído por rochas de diferentes tipologias da intrusão de Limeira. O objetivo de Curtis (2019) consistiu na avaliação dos materiais pétreos desta Intrusão, visando aplicação como agregados em obras de

engenharia, especialmente para composição de concretos hidráulicos de cimento Portland e concretos asfálticos para pavimentação.

Por sua vez, Ribeiro (2006) em sua tese desenvolveu um estudo com 25 jazidas localizadas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), com viés em aplicação para concreto estrutural. O autor realizou ensaios de caracterização física e resistência mecânica, com agregados de origem plutônica e metamórfica. De posse dos resultados, o autor concluiu que, grande parte dos agregados graúdos produzidos na RMRJ não atende a todos os requisitos previstos nas normas ABNT, o que, conseqüentemente, podem ser limitantes quanto a resistência do concreto.

Sabendo da importância que o agregado desempenha na estrutura da camada de lastro ferroviário, Diógenes e Branco (2015), Pires et al (2017) e Remédio (2017) avaliaram e caracterizam os agregados para fins de aplicação neste tipo de obra. Diógenes e Branco (2015) buscaram em seus estudos avaliar as propriedades de forma, angularidade e textura do mesmo com o auxílio do Processamento Digital de Imagens (PDI), de modo a compreender como esses fatores interferem no funcionamento e, por consequência, no desempenho da estrutura do lastro. Pires et al (2017), avaliou a evolução da degradação do lastro através de ensaios de caracterização (granulometria, forma, entre outros). Os autores mostraram diferentes modos de degradação e uma adequada representação qualitativa na evolução que os agregados podem vir a sofrer quando expostos a tal obra. Por fim, Remédio (2017), avaliou nove tipos de rochas cristalinas (micro-gabro, gnaisse e variedades de granitos) como o objetivo de caracteriza esses tipos de agregados para uso em Trem de Alta Velocidade (TAV), sendo que, apenas as rochas monzogranito e sienogranito apresentaram desempenho insatisfatório, inviabilizando ou restringindo o seu uso para tais finalidades.

A litologia da rocha é um dos fatores que influenciam na resistência do agregado mineral, que por consequência, interfere no bom desempenho mecânico, nesse sentido, destaca-se dois trabalhos o de Alves (2014) e de Trotta (2020). Alves (2014) em sua dissertação de mestrado, avaliou a resistência à degradação mecânica de agregados de diferentes jazidas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro em função das características geológicas, assim como, utilizou o PDI, por intermédio do equipamento “*Aggregate Imaging System*” (AIMS) para quantificar a mudança morfológica do agregado antes e após o ensaio mecânico. O autor concluiu em seu estudo que, a perda de rugosidade apresentada nos resultados morfológicos do AIMS, é dependente da origem da rocha devido à suscetibilidade à quebra sofrida pelo impacto e não ao polimento stricto sensu. Por sua vez, Trotta (2020) teve o propósito de quantificar a

degradação mecânica e avaliar a morfologia de agregados graúdos da região sudeste do Brasil, por intermédio dos ensaios de resistência mecânica (Esmagamento, Treton, Abrasão Los Angeles e Micro-Deval) e aplicação do PDI (AIMS2). Com base nos resultados apresentado, o autor destaca a necessidade em conhecer as particularidades geológicas de agregados para a avaliação adequada de seu comportamento com vista ao projeto de engenharia, de forma que, a avaliação de pedreiras geologicamente heterogêneas pode maximizar a operação de britagem e minimizar as mudanças quanto a qualidade das partículas, o que resulta, uma maior variedade de agregados de um mesmo local.

Em síntese, rochas ígneas de granulação fina (i.e. vulcânica) quando comparadas com rochas de granulação grossa (i.e. plutônicas) tendem apresentar comportamento mecânico superior, sendo considerados mais resistentes ao desgaste (KAZI e AL-MANSOUR, 1980). O ensaio Abrasão Los Angeles é um dos ensaios mais empregados na avaliação e caracterização da resistência do material, neste aspecto, desde a década de 80, estudos têm sido desenvolvidos com propósito de investigar a possibilidade de prever a perda por ALA por intermédio de outros ensaios de resistência mecânica, por exemplo, compressão uniaxial, Esmagamento e Treton (BALLIVY e DAYRE, 1984; CARGILL e SHAKOOR, 1990; Al-Harthi, 2001; KAHRAMAN e FENER, 2007; DEMIRDAG e YAVUZ, 2009; PALASSI e DANESH, 2015; UGUR).

2.3.2 Considerações finais

Nesse capítulo foram apresentados de forma resumida alguns trabalhos discutidos na literatura abordando a avaliação e caracterização do agregado. Em alguns estudos, a avaliação tecnológica do material foi necessária como medida de investigação considerando as especificações da obra. De certo modo, tais especificações são necessárias devido as diversas solicitações a que o agregado é exposto nas diversas obras civis, buscando desta forma, sempre atender a qualidade desejável.

No entanto, esse tipo de estudo deveria sempre vir acompanhado da caracterização da rocha na frente de lavra, pois, a geologia não é homogênea, ela pode diferir ao longo do maciço rochoso, em decorrência de um dique ou até mesmo, presença de um material mais alterado, conforme debatido nos trabalhos realizados por Curtis (2019) e Trotta (2020).

Portanto, a análise e caracterização do agregado, faz-se necessária como medida de controle tecnológico da jazida sobre o material explorado.

2.4 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

Os agregados representam na maioria das obras de engenharia, a maior porcentagem do volume total, o que acarreta grande influência no desenvolvimento da solicitação imposta. Por exemplo, nas misturas asfálticas, os agregados influenciam diretamente no desempenho final do pavimento.

Diante disso, é imprescindível o estudo da caracterização dos agregados antes dos mesmos serem utilizados em obras de pavimentação (AHLRICH, 1996; BERNUCCI et al 2010). Portanto, alguns ensaios são indispensáveis (DNIT 031/2006 – ES; Bernucci et al 2010), como: caracterização granulométrica, resistência a abrasão, índice de forma das partículas, adesividade ao ligante asfáltico, durabilidade, massa específica e absorção, além da caracterização quanto à natureza, tamanho e distribuição dos grãos, que estão atrelados ao seu desempenho como agregado. Nos tópicos subsequentes, são apresentados e discutidos alguns ensaios que buscam avaliar a qualidade dos agregados considerando seu uso em diferentes obras civis.

2.4.1 Análise petrográfica e mineralógica

Por intermédio da análise petrográfica, é possível avaliar algumas propriedades da rocha que podem comprometer ou influenciar o seu comportamento físico-mecânico e sua durabilidade. Frazão (2012) separa essas propriedades em cinco tópicos, sendo eles: composição mineralógica (minerais essenciais, acessórios e secundários, bem como suas qualidades); textura (forma e arranjo microscópico dos minerais); estrutura (arranjo macroscópico); estado de alteração dos minerais (sãos ou alterados e, quando alterados, deve-se atentar ao tipo de alteração) e, grau e tipo de microfissuração (intercristalina ou intracristalina, abertas ou preenchidas).

Diversos autores apontaram a existência de correlação entre as características petrográfica e o uso da rocha nas obras de engenharia. Face a esse panorama, a seguir será apresentada uma breve revisão acerca de alguns estudos abordando essa temática.

Frazão (2002;2007) aponta três características nas quais a análise petrográficas pode auxiliar. A primeira refere-se ao estado de alteração, que contribui diretamente na durabilidade e nas características físicas e mecânicas das rochas. A segunda, refere-se as reações em detrimento da presença de minerais deletérios, que podem resultar reações com os álcalis do cimento Portland. Por fim, o uso de agregados na pavimentação, em virtude da interação da

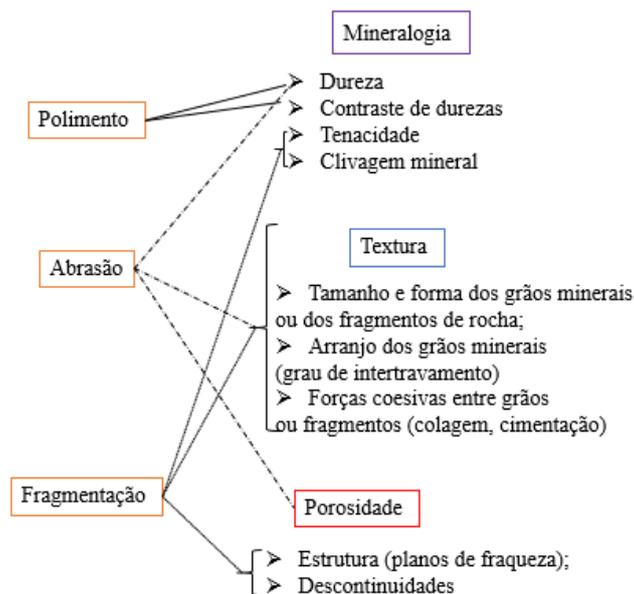
rocha com os ligantes asfálticos, que provoca uma reação físico-química, dependendo da mineralogia.

Por conseguinte, a aplicação das rochas para obras ferroviárias requer material de alta qualidade. Watters et al (1987) concluíram, através da análise petrográfica que, rochas que apresentam alta concentração de micas e sulfetos, alta porosidade, assim como, planos de fraquezas (i.e., foliação, juntas e planos de estratificação), são materiais inviáveis na utilização para esses fins, em decorrência da baixa qualidade.

A alteração mineral também é um fator importante a ser avaliado. Barros (1991) constatou que os agentes naturais químicos e físicos são responsáveis pela transformação dos minerais e redes cristalinas. Por conseguinte, a alteração mineralógica pode ocasionar a formação de neominerais, que interfere na porosidade da rocha e, conseqüentemente, ocasiona a diminuição da resistência mecânica.

Do ponto de vista da influência das propriedades físicas dos minerais, Berubé (2001) avaliou a relação entre o desempenho de agregados utilizados em concretos e suas características mineralógicas e petrográficas (Figura 2-5).

Figura 2-5 - Relação entre as propriedades mineralógica no desempenho físico – mecânico do agregado.



Fonte: adaptado de Berubé (2001).

A autora, enfatiza que a análise petrográfica, apesar de tratar-se de uma análise qualitativa, continua sendo bastante valiosa na determinação da qualidade dos agregados. De

acordo com a Figura 2-5 apresentada por Berubé (2001), os fenômenos de Abrasão Los Angeles podem ser relacionados diretamente à textura, bem como, porosidade e dureza dos minerais. Por outro lado, a fragmentação é afetada pelas estruturas, tais como as descontinuidades minerais e das rochas.

Atualmente, observa-se diversos estudos abordando a influência mineralógica e textura das rochas, nas propriedades tecnológicas relacionadas quanto a sua resistência (TUĞRUL, ZARIF, 1999, ÅKESSON, U., LINDQVIST, et al., 2001, COGGAN, STEAD, et al., 2013, KEIKHA, KEYKHA, 2013). Miskosky et al., (2004) discutem os principais fatores que influenciam nas propriedades mecânicas das rochas graníticas. A quantidade de quartzo, feldspato e mica, tem grande destaque, bem como a frequência de microfaturas. O aumento da quantidade de feldspato diminui a resistência ao impacto. Por sua vez, a proporção de micas em rochas maciças tem papel secundário quando comparado aos teores de quartzo e feldspatos.

Da mesma forma, Keikha e Keikha (2013) compararam análise petrográfica (tamanho do grão, composição mineralógica), com os valores de compressão uniaxial, ressaltando que a composição mineralógica é uma das propriedades que controlam a resistência da rocha. Minerais “fortes” (quartzo, ortoclásio e granada) e minerais fracos (plagioclásio, biotita e muscovita) podem apresentar efeitos opostos sobre os parâmetros de resistência das rochas. Minerais de quartzo e plagioclásio apresentaram impacto significativo sobre a resistência à compressão uniaxial das rochas graníticas estudadas; desta maneira, os autores concluíram que:

- A resistência da rocha aumenta à medida que o tamanho de grão diminui;
- Rochas compostas de quartzo e conteúdo de ortoclásio detém maior resistência à medida que esses compostos aumentam. Por outro lado, a abundância de plagioclásio interfere na diminuição; e
- As rochas graníticas estudadas apresentaram alta correlações entres as resistências: compressão uniaxial, carga pontual e resistência à tração.

Anastasio et al (2017) usaram parâmetros petrográficos na tentativa de estabelecer relações preliminares entre a performance de misturas asfálticas e as características geológicas intrínsecas dos materiais. Buscando compreender a influência do britador na morfologia dos agregados, propriedade de forma, angularidade e textura superficial, Diógenes et al (2017), utilizaram processamento digital de imagens (PDI). No entanto, os autores salientam que a textura superficial está condicionada a mineralogia bem como, o tamanho das partículas, ao invés dos processos de britagem, conforme comprovado através da análise petrográfica.

2.4.2 Forma, angularidade e textura das partículas

Os agregados apresentam propriedades que influenciam nas misturas asfálticas, bem como nas demais aplicações dentro da engenharia civil. Dentre essas propriedades, vale destacar forma, angularidade e textura superficial (MASSAD et al., 2001; SUKHWANI et al., 2006; KIM e SOUZA, 2009; BESSA et al., 2009, 2011). A forma remete às três dimensões da partícula. Conforme classificação proposta por Frazão (2002) pode ser: cúbica (ou esférica), lamelar (ou achatada ou discóide), alongada (ou prismática) e alongada-lamelar.

Além disso, a forma do agregado está relacionada às dimensões da angularidade, que descreve os ângulos existentes ao longo da superfície das partículas (MASAD, 2005, SOUZA, 2009). Nesse sentido, partículas não arredondadas podem ser classificadas como partículas com alta angularidades e partículas arredondadas, baixa angularidade. A textura está associada às irregularidades superficiais (MASAD, 2005), porém, apresentada numa escala pequena demais para afetar a forma geral do agregado (AL ROUSAN, 2004).

Pesquisadores avaliaram o desempenho e as propriedades dos pavimentos associado as características morfológicas dos agregados (MASAD et al., 2007, ARASAN et al., 2011; BESSA et al., 2015; ALVES, 2014; CASTILLO et al., 2018; KUANG et al., 2019). Nesse sentido, as características da forma afetam, na trabalhabilidade, ângulo de atrito e energia de compactação necessária para atingir a densidade desejada da mistura asfáltica (BERNUCCI et al., 2010).

As partículas podem ser avaliadas e embasadas em três parâmetros morfológicos independentes: forma, circularidade e textura superficial (BARRETR, 1980). A associação dessas três propriedades influencia na interação interpartículas, bem como, no material estabilizador (i.e., ligante, cimento) relacionando-se diretamente à performance dos pavimentos (ROUSAN, 2004).

Na mistura asfáltica, partículas alongadas e lamelares são indesejadas, tendo em vista que, resultam na queda do desempenho de pavimentos asfálticos, devido a tendência em se quebrar durante os processos de produção e compactação (KANDHAL e PARKER, 1998, FURLAN et al., 2004). Do mesmo modo, quanto mais arredondado e liso (textura) o agregado for, menor é o intertravamento entre as partículas e, conseqüentemente, menor será a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica (KIM ET AL., 1992; GOUVEIA, 2006, BESSA, 2012). Em contraste, agregados com formas cúbicas, cantos angulares e texturas superficial rugosa, evitam o surgimento de planos preferenciais de fraquezas (FURLAN et al., 2004; BERNUCCI et al., 2006), neste sentido, aumentando a resistência das misturas no acúmulo de

deformações permanentes (KANDHAL e PARKER, 1998; GOUVEIA e FERNANDES, 2006; WHITE et al., 2006).

Diversas normativas tanto brasileiras quanto estrangeiras permitem avaliar a forma, qualitativamente e quantitativamente através de medidas diretas do agregado. As normas DNER-ME 086 (DNER, 1994), ASTM D 4791 (ASTM, 2010) e NBR 7809 (ABNT, 2006) caracterizam a forma do agregado graúdo. Já as normas ASTM D 5821 (ASTM, 2013) e ASTM C 1252 (ASTM, 2017), assim como, DNIT 415/2019 – ME, avaliam a angularidade do agregado graúdo e miúdo, respectivamente.

De acordo com a metodologia Superpave, através da normativa ASTM C 1252 e, recentemente normatizada pelo DNIT 415/2019 – ME, é possível determinar de modo indireto a angularidade, esfericidade e textura da superfície de agregados miúdos. Contudo, pesquisadores têm sugerido que o ensaio não quantifica exclusivamente o efeito da angularidade (WHITE et al., 2006), mas sim, uma combinação entre angularidade, textura e forma do agregado. Nesse sentido, os trabalhos desenvolvidos por Fernandes et al (2000), Gouveia e Fernandes (2002), Gouveia (2002, 2006) e Rodrigues (2019), tratam sobre a respectiva normativa.

De acordo com estudos desenvolvidos por Fernandes et al (2000), Gouveia e Fernandes (2002) e Gouveia (2002, 2006), os valores elevados da angularidade do agregado fino (FAA), serão encontrados quanto maior a angularidade e rugosidade das partículas, pois durante o ensaio, as partículas caem sem sofrer acomodação por compactação, suas arestas e cantos agudos fazem com que fiquem mais distantes umas das outras, aumentando o volume de vazios. Por outro lado, partículas menos angulares (com cantos arredondados) e com textura superficial lisa, acomodam-se com mais facilidade, diminuindo o volume de vazios existentes entre partículas, acarretando valores menores de FAA.

No entanto, esses autores notaram que o ensaio FAA não é capaz de separar os efeitos de angularidade e forma das partículas. Salientam que, as partículas cúbicas, as mais desejáveis para fins da pavimentação, com angularidade e textura adequada, podem apresentar valores inferiores em comparação as partículas com forma lamelares.

Nesse sentido, os autores correlacionaram o resultado obtido no ensaio de FAA com o cisalhamento direto, tendo como hipótese que agregado com altos valores de FAA deveriam apresentar partículas angulosas e/ou textura superficial rugosa, pois geraria maior intertravamento entre as partículas e conseqüentemente maior resistência ao cisalhamento.

Ressalta-se ainda que, o ângulo de atrito para este tipo de material, quando submetido ao cisalhamento, é influenciado pelo deslizamento e pelo rolamento entre grãos, pois os grãos podem vir a deslizar uns sobre os outros, gerando o atrito, bem como, rolar uns sobre os outros, influenciando também no atrito entre as partículas. Estes dois fatores estarão entrelaçados pela forma e rugosidade superficial das partículas.

Seguindo as premissas apresentadas pelos trabalhos de Fernandes (2000), Gouveia e Fernandes (2002), Gouveia (2002; 2006) e Rodrigues (2019), com base nos materiais estudados por cada autor, concluíram que os elevados resultados do ensaio de FAA não apresentaram, necessariamente, maior resistência ao cisalhamento, como também, não resultam em maior ângulo de atrito interno. Portanto, os resultados desse ensaio não são congruentes com a realidade.

De posse das limitações e diante da incerteza na medição da morfologia dos agregados através dos ensaios laboratoriais, diversos autores têm debatido sobre suas desvantagens (BESSA, 2012; GREER, 2017) e vêm utilizando a caracterização das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagem (PDI).

Atualmente, vários sistemas digitais de imagem estão disponíveis para avaliar a morfologia dos agregados de forma objetiva, precisa e direta. Alguns desses métodos são baseadas na Transformada de *Hough* (Wilson e Klotz, 1996); morfologia fractal para avaliar a angularidade do agregado miúdo (Masad et al., 2000); decomposição *Wavelet* em escala de cinza da textura superficial através de imagens binárias para caracterização da forma do agregado (Chandan et al., 2004); análise de *Fourier* para obter a angularidade das partículas (Bowman et al., 2001); o *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)* (Fletcher et al., 2002), que analisa a forma e angularidade de agregados graúdos e miúdos; e utilização de esqueletização multiescala com o uso de scanner para obtenção de imagens (Gouveia, et al., 2015).

Embora nenhum desses métodos tenha sido recomendado como procedimento de teste padrão, diversos pesquisadores investiram na avaliação proposta pelo AIMS, quanto ao desempenho e confiabilidade dessas técnicas na caracterização morfológica do agregado (MOHMOUD et al., 2010, 2011; BESSA, 2012; ALVES, 2014; BESSA et al., 2015; DIÓGENES, 2018; IBIAPINA, 2018; IBIAPINA et al., 2020). No Brasil, o PDI vêm sendo bastante utilizado através do equipamento AIMS2. Contudo, apenas algumas universidades possuem o equipamento.

O AIMS é um sistema automatizado que avalia quantitativamente a morfologia dos agregados a partir de análises de imagens 2D ou 3D (Al Rousan, 2004; Al Rousan et al., 2005;

Taylor et al., 2006; Masad et al., 2007). Para as partículas miúdas, consideradas menores que 4.75 mm, são avaliadas a forma e a angularidade. Já para os agregados graúdos, são avaliadas a esfericidade, angularidade e textura superficial. Portanto, é possível obter parâmetros importantes para caracterização de agregados como resistência ao polimento e degradação (MAHMOUD e MASAD, 2007; BESSA, CASTELO BRANCO e SOARES, 2011; BESSA et al., 2014).

Atualmente, é utilizada a metodologia de classificação das propriedades para o AIMS2 desenvolvida por Al Rousan (2004) e Mahmoud et al (2010). Porém, Ibiapina et al., (2018) constataram que muitos agregados estavam sendo caracterizados em classes que não correspondiam ao seu real desempenho quando utilizados em pavimentos asfálticos brasileiros. Sabendo da grande importância ao avaliar agregados minerais por métodos diretos e eficientes, esses autores propuseram uma nova metodologia de classificação, com base na avaliação de 20 agregados de diferentes tipos de rochas oriundos de localizações especializadas em oito estados brasileiros, conforme será apresentada adiante, no item 3.2.5.4 da metodologia.

Desta maneira, o AIMS2 vêm sendo apontado pela comunidade de pesquisa em pavimentação asfáltica, como uma boa alternativa para a caracterização de propriedades morfológicas, tanto de agregados finos quanto de agregados graúdos. Na Tabela 2-1 são apresentados alguns estudos realizados no Brasil, que empregaram o uso do AIMS2, com destaque para as pesquisas realizadas pelo grupo GEPASV.

Tabela 2-1 - Pesquisa desenvolvidas no Brasil empregando a avaliação da forma por meio do AIMS.

Autor	Título
Bessa (2012)	Caracterização de agregados, de esqueleto mineral e de misturas asfálticas
Onofre (2012)	Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos
Oliveira (2013)	Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo
Alves (2014)	Avaliação da resistência à degradação mecânica de agregados
Araujo (2014)	Avaliação da textura de misturas asfálticas a partir do uso do processamento digital de imagens
Boeira (2014)*	Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales
Costa (2015)	Caracterização de areias de britagem de pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e avaliação da sua aplicação no concreto

Diógenes (2015)	Caracterização das propriedades de forma de agregados para fins de comparação entre diferentes processos de britagem
Continuação	
Pazos (2015)	Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânica de misturas asfálticas
Pazos et al., (2015)	Avaliação dos efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas
Rossato (2015)	Avaliação do fenômeno de fadigas e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas
Araujo (2016)	Avaliação da textura de misturas asfálticas para uso em revestimentos aeroportuários
Bastos (2016)	Considerações sobre a deformação permanentes de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico
Cavalcanti (2016)	Avaliação da degradação de propriedades de forma de agregados
Diógenes (2016)	Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário
Ibiapina (2016)	Avaliação da relação entre propriedades de forma dos agregados, parâmetros do esqueleto mineral e o comportamento mecânico de misturas asfálticas
Leandro (2016)	Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação
Lima (2016)	Estudo da deformação permanentes de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos
Ibiapina et al., (2017)	Avaliação da relação entre angularidade de agregados e parâmetros do esqueleto mineral de misturas asfálticas
Paiva (2017)*	Caracterização e avaliação das propriedades geomecânicas para uso em pavimentação de agregados de rochas vulcânicas da porção central do Rio Grande do Sul
Back (2018)*	Avaliação das propriedades químicas e geomecânicas de agregados oriundos de jazidas de rochas de diferentes litologias do Estado do RS
Cruz (2018)	Influência das propriedades morfológicas e dos métodos de seleção granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas
Diógenes (2018)	Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem
Faccin (2018)*	Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente
Lago (2018)	Avaliação geológico-geotécnica de agregados de rocha granulítica para uso em pavimentação asfáltica
Possebon (2018)*	Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil
Brondani (2019)*	Estudo do efeito deletério da água em misturas asfálticas a quente produzidas no Rio Grande do Sul
Rodrigues (2019)*	Avaliação da angularidade de agregados miúdos de diferentes litologias para uso em pavimentação
Cavalcanti et al., (2020)	Avaliação da degradação de propriedades de forma de agregados
Pires (2020)*	Estudo da deformação permanente de concretos asfálticos aplicados em campo

Trotta (2020)	Quantificação da degradação mecânica e avaliação da heterogeneidade de agregados por processamento digital de imagem (PDI)
----------------------	--

*Trabalhos desenvolvidos por pesquisadores do grupo GEPPASV.

2.4.3 Resistência mecânica

Na pavimentação, o agregado está sujeito às forças abrasivas de cargas pesadas por intermédio da roda que pode gerar a quebra e, por conseguinte, alterar a graduação. Ressalta-se que, com graduação alterada, o pavimento, neste caso, não terá as mesmas características de projeto. Diante dessas observações, Rangaraju e Eldlinski (2008) apontam que a baixa resistência do agregado pode resultar posteriormente na falha precoce do pavimento através da consolidação, rachadura, polimento, entre outros problemas. Do mesmo modo, no lastro ferroviário, antes mesmo das tensões impostas pelos dormentes na via férrea, muitos agregados são fragmentados durante o processo de socaria.

A avaliação da resistência à degradação mecânica das partículas como indicativo da qualidade dos agregados é normatizada através de ensaios empíricos destrutivos das amostras. A resistência corresponde às mudanças nas características originais, geralmente medida com base na granulometria.

O ensaio de Abrasão Los Angeles (ALA) é o método mais utilizado para medir a resistência do agregado à abrasão, sob a ação de esforços mecânicos. A Abrasão Los Angeles refere-se a perda da angularidade dos agregados, por conseguinte, a quebra está atrelada com fratura e perda de massa (MAHMOUD, 2005.). Porém, estudos discutem a respeito deste ensaio, admitindo tratar-se de um ensaio extremamente severo às partículas e, por conseguinte, subavalia materiais de muitas pedreiras (BERNUCCI, MOTTA, et al., 2006, ALVES, 2014).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) formaliza alternativamente diversos ensaios mecânicos para a determinação da resistência dos agregados, podendo citar: Esmagamento e Treton. O ensaio de Esmagamento apresenta a resistência do agregado sob uma carga de compressão pré estabelecida aplicada gradualmente. Dos ensaios Treton resulta a resistência do agregado quando imposto ao choque ou impacto. Neste último caso, os resultados desses testes estão associados a tenacidade do agregado frente a resistência abrasiva. Conforme recomendado por Fookes et al (1988), para avaliar o agregado quanto a resistência e durabilidade é necessária a realização combinada dos três testes, ALA, Esmagamento e Treton.

A textura da rocha e a granulometria das partículas de agregado, é um fator importante na avaliação do comportamento do agregado em relação ao desgaste e durabilidade. Kazi e Al-

Mansour (1980) realizaram um estudo envolvendo rochas de origem vulcânica e plutônica e concluíram que o tamanho do grão mineral é um fator geológico significativo como controlador na avaliação da resistência à abrasão. Portanto, os resultados dos ensaios de Abrasão Los Angeles podem variar em acordo com a granulação dos constituintes do agregado, entre fina ($<0,006$ mm), média ou graúda (>2 mm) (KAZI e AL – MANSUR, 1980). Em adição, quanto maior a granulação dos agregados e absorção dos mesmos, maior será a perda neste tipo de ensaio. Da mesma forma, nos estudos de Marques (2001) foram constatados que os parâmetros de resistência, como Abrasão Los Angeles e dureza, dependem diretamente das propriedades da rocha de origem. Partindo desta análise, a avaliação petrográfica torna-se um fator importante e de fácil correlação. Como averiguado por Moavenzadeh e Goetz (1963), o limite entre os grãos, cimentação e porcentagem de vazios de um agregado influencia na resistência à degradação.

Alves (2014) estudou diferentes litologias (biotita gnaisse, granito, traquito e sienito) em relação a caracterização mecânica. Os traquitos e sienitos, apresentam granulação fina, constituídos por minerais de baixa resistência (biotita) e, resultaram um bom desempenho nos ensaios de Abrasão Los Angeles, impacto Treton e Esmagamento. Por sua vez, gnaisses e granitos, tenderam um alto valor de perda de massa, ou seja, baixa resistência mecânica. No primeiro caso, a mineralogia influencia devido principalmente à cloritização dos feldspatos e biotitas, elevada percentagem de muscovita, assim como, microfraturas dos minerais. Já no segundo caso, a mineralogia também apresenta certa importância, principalmente pela biotita que alterou em alguns casos para muscovita ou clorita, assim como, a granulação grossa dessa rocha.

Por sua vez, dentre os ensaios utilizados na determinação da resistência de rochas intacta, destaca-se, o ensaio de compressão triaxial, o de compressão uniaxial, tração uniaxial e o de carga pontual. Nem sempre é possível obter amostras com as dimensões adequadas à realização dos ensaios de carga pontual, neste caso, é possível obter a resistência da rocha por meio de amostras irregulares.

As obras de engenharia de enrocamento são constituídas por fragmentos rochosos de forma irregulares que, de acordo com Atraghji (1972), sofrem essencialmente rotura por tração. Portanto, o ensaio de carga pontual se aproxima do modo como os fragmentos são solicitados. No entanto, o respectivo ensaio, diferente dos demais, fornece, resultados mais dispersos em relação a amostras regulares, portanto, faz-se necessária, a realização do ensaio com maior número de amostras, de modo a determinar-se um valor médio confiável.

No ensaio de carga pontual, uma força é aplicada a um fragmento rochoso sob duas ponteiros cônicas (BROCH e FRANKLIN, 1972; ISRM, 1985; GUIFU e HONG, 1986). A aplicação de uma carga concentrada pelas ponteiros induz na amostra uma força de tração normal à carga aplicada que, eventualmente, provoca a rotura segundo um ou mais planos com a mesma orientação da carga (BROCH e FRANKLIN, 1972). Geralmente, os ensaios são realizados com amostras na condição seca ao ar, no entanto, Broch (1974) verificou que o aumento do teor em água nas amostras provocava diminuição na resistência à carga pontual, portanto, a normativa ISRM (1985), permite realizar o ensaio após a saturação das amostras por 72 horas.

2.4.4 Durabilidade e Sanidade

O ensaio de sanidade permite avaliar a resistência dos agregados graúdos e miúdos à desintegração física por meio de solução de sulfato de sódio. O processo permite caracterizar o agregado quantitativa (determinação de perda de peso) e qualitativamente (observação visual) por alteração sofrida quando submetido a ciclos alternados de imersões numa solução saturada de sulfato de sódio e a secagens em estufa.

O presente ensaio simula a atuação do intemperismo físico sobre o agregado, devido ao efeito que a solução tanto de sulfato de sódio quanto de magnésio pode gerar, acarretando fraturas ou até mesmo quebra do material pétreo, devido a cristalização dos sais nos poros e microfissuras do agregado.

Ressalta-se que, ao impor o agregado a tal situação, simulam-se ciclos de gelo e degelo. No entanto, este tipo de ensaio acaba não sendo o mais adequado para avaliar a relação de durabilidade da rocha, pois a cristalização do sal solúvel nos poros das rochas não remete às condições ambientais encontradas no Brasil (AZAMBUJA 1996 apud NÚÑEZ (1997), FIORENTINI (2002).

Em adição, no respectivo ensaio, certas características rochosas como: microfraturamento, grau de compacidade e porosidade, podem acarretar influência no desempenho do material. Cabe salientar que, a perda no ensaio de durabilidade permite avaliar de maneira indireta a porosidade permeável do agregado e sua resistência quanto às tensões originadas pela cristalização do sal. Desta maneira, o ensaio não avalia exatamente a alterabilidade do material quando exposto a tais condições, ou seja, a alteração relacionada com o tempo, mas sim, trata-se da qualidade apresentada pela rocha após a finalização do ensaio.

2.4.5 Porosidade e absorção

As propriedades físicas, também conhecidas como índices físicos, tais como: massa específica, porosidade e absorção de água apresentam grande interdependência (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007). Por intermédio das normas DNER-ME 081/98, ABNT NBR NM 30:2000 e ASTM C 128, é possível obter parâmetros de massa específica e conseqüentemente, absorção e porosidade.

A fim de esclarecimento a respeito das diferentes nomenclaturas existentes para o termo massa específica, Cerrati e Reis (2011) resumem que, a massa específica real desconsidera qualquer poro da superfície, portanto, sendo obtida através da relação entre a massa seca e o volume real. Por conseguinte, a massa específica aparente considera a presença dos vazios (poros), obtida, por meio da relação da massa seca pelo volume aparente. Por fim, a massa específica efetiva, refere-se à relação entre a massa seca de uma amostra e o volume efetivo do agregado.

Segundo Vallejo (2004) o peso específico e a porosidade, interferem nas propriedades mecânicas das rochas, sendo consideradas as propriedades mais importantes. A diminuição da densidade, o aumento da porosidade e da capacidade de absorção d'água inferem no avanço do processo de alteração da rocha (FRAZÃO, 1993). Tal autor aborda que a massa aparente de uma rocha diminui à medida que a alteração aumenta, e o contrário ocorre com a porosidade e absorção d'água. Por conseguinte, Mehta e Monteiro (2008) complementam que o peso específico, absorção de água, resistência, dureza, elasticidade e sanidade são características dependentes da porosidade.

Ressalta se que o aumento de volumes vazios pode produzir efeitos mecânicos apreciáveis na rocha, tais como a redução da resistência e o aumento da deformabilidade (ISRM, 2007). Estudos realizados por Macedo, Brasileiro e Ferreira (1988) já haviam concluído que quanto menor a absorção menor é o desgaste por Abrasão Los Angeles.

Por sua vez, a absorção é um fator que está atrelado com o tamanho e granulação dos agregados. Nos estudos realizados por Kazi e Al – Mansur (1980), estes autores concluíram, ao estudar agregados com diferentes tamanhos que os altos valores de absorção são obtidos com o decréscimo do tamanho.

A absorção de água pelo agregado está intimamente ligada à sua porosidade. Além disso, a porosidade é uma propriedade que pode estar relacionada com a origem da formação rochosa (por exemplo em arenitos não cimentados ou em rochas cristalinas muito fraturadas). Neste contexto, um agregado poroso pode absorver muita água e, conseqüentemente, também poderá

absorver muito ligante asfáltico. Infere-se que, a taxa de absorção de asfalto é afetada pela porosidade da partícula, tamanho de seus poros, forma e frequência (GOUVEIA, 2006). Portanto, agregado poroso irá consumir parte do ligante necessário para dar coesão à mistura asfáltica (BERNUCCI et al., 2010).

2.4.6 Afinidade ao ligante asfáltico

Tratando-se de pavimento asfáltico, a verificação da adesividade ligante/agregado é de suma importância para prever o comportamento da mistura em relação à resistência, à desagregação e ao descolamento das misturas asfálticas (BOEIRA, 2014).

Certos tipos de minerais apresentam maior interação ligante/agregado em comparação com outros. Isto ocorre em consequência do grau de adesividade ser altamente dependente da composição mineralógica, pois é quem determina as propriedades de carga dos agregados quando coberto pelo betume (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007).

Gouveia (2002) explica que a interação existente entre a natureza das cargas elétricas presente na superfície dos agregados afetam negativamente em contato com a água. Agregados básicos, por apresentar maior facilidade na molhagem pelo cimento asfáltico em relação a água, é nomeado por hidrofóbico. Isso ocorre porque os agregados apresentam cargas positivas na presença de água e, ao entrar em contato com outro material, também positivo, repelem.

Por outro lado, agregados que possuem na sua composição certa acidez, como o granito e quartzito, apresentam maior facilidade em ser molhado pela água em comparação ao betume. Neste caso, quando o material é exposto em presença de água, a película do filme asfalto podem separar-se, pois as cargas superficiais das partículas de agregados tornam-se negativamente carregadas na presença da água, neste caso, os agregados são chamados de hidrófilos.

Corroborando, Read, Whiteoak (2003) e Bernucci et al (2010), apontam que agregados que apresentam teores elevados de silício, como quartzo, ou seja, as rochas ácidas, carregados negativamente na presença de água, resultam em falhas na adesividade com o ligante asfáltico, quando comparado com as rochas mais básicas. Bernucci et al (2010), complementam que, rochas ricas em cálcio, magnésio, alumínio e ferro, conduzem cargas positivas na presença de água; apresentando boa adesividade ao ligante asfáltico.

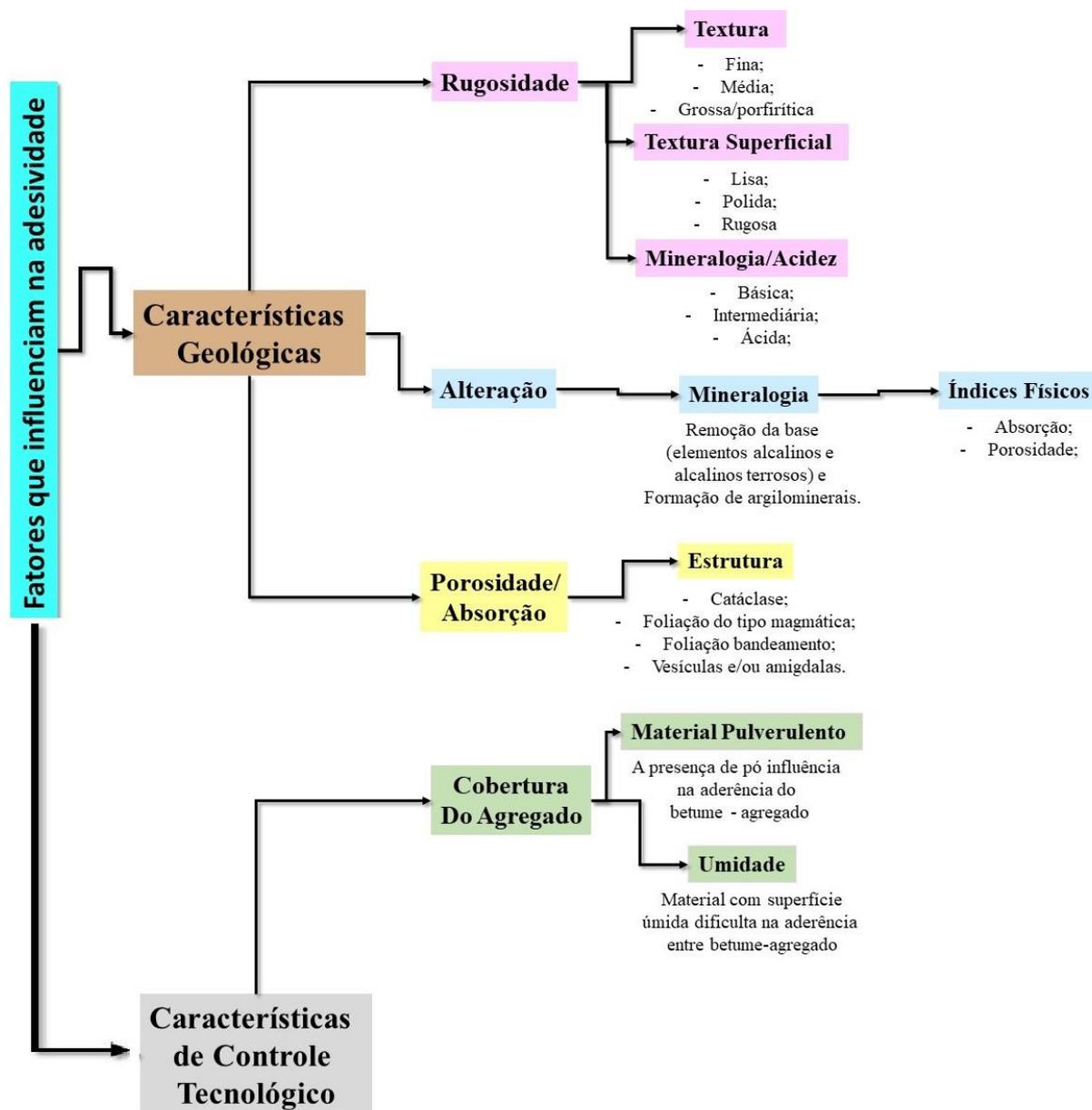
Através do ensaio de Fluorescência de Raio X (FRX), Brondani (2019) verificou que amostras com maior adesividade apresentaram um alto conteúdo de ferro (Fe) e uma relação entre Fe/Si maior que 1, Amostras com teores elevados de cálcio (Ca), com uma relação Ca/K

acima de 5, também indicaram melhor adesividade, pois conforme observação realizada pela autora, esses elementos são encontrados em rochas básicas.

Por intermédio dos estudos de Lee (1969), compreendeu-se que a absorção do ligante apresenta grande correlação com a porosidade do material, bem como, do tamanho dos poros, assim como, a absorção (KIM et al., 1992, KENNEDY et al.,1983). Neste caso, a espessura da película do asfalto diminui em decorrência da absorção do betume pelo agregado, desfavorecendo o comportamento da mistura asfáltica, tornando vulnerável ao intemperismo, às tensões e em especial à ação da água. Moura et al (2001) e Brondani (2019), nomeiam alguns fatores que influenciam na propriedade da adesividade entre ligante asfáltico e agregado, sendo elas: propriedades físicas, como absorção, alterabilidade e a textura do agregado.

Para uma melhor compreensão desses fatores, na Figura 2-6 é apresentado em forma de fluxograma aspectos relevantes no estudo da adesividade.

Figura 2-6 - Fluxograma dos fatores influenciadores na adesividade.



Ressalta-se ainda a influência do material pulverulento na boa aderência do betume ao agregado. Esse tipo característica interfere na adesão, dificultando que o betume englobe os fragmentos de rocha. Além disso, superfícies que apresentam alterações mineralógicas, quando de natureza intempérica, leva à remoção de bases (elemento alcalinos e alcalinos terrosos) tornando ácida a superfície do agregado mesmo que este seja de caráter básico. (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007).

Atualmente, o critério de avaliação da adesividade é regido pela normativa DNER ME 078/94. Em suma, o agregado é mensurado ao final do ensaio, de modo visual e definido como

satisfatório ou insatisfatório, de acordo com a maior ou menor resistência ao deslocamento da película de ligante asfáltico que se forma em torno dos agregados. Vale ressaltar que esse ensaio é bastante criticado por ser muito subjetivo, tratar-se de uma análise visual e depender do operador do ensaio (avaliador) (BESSA, 2012).

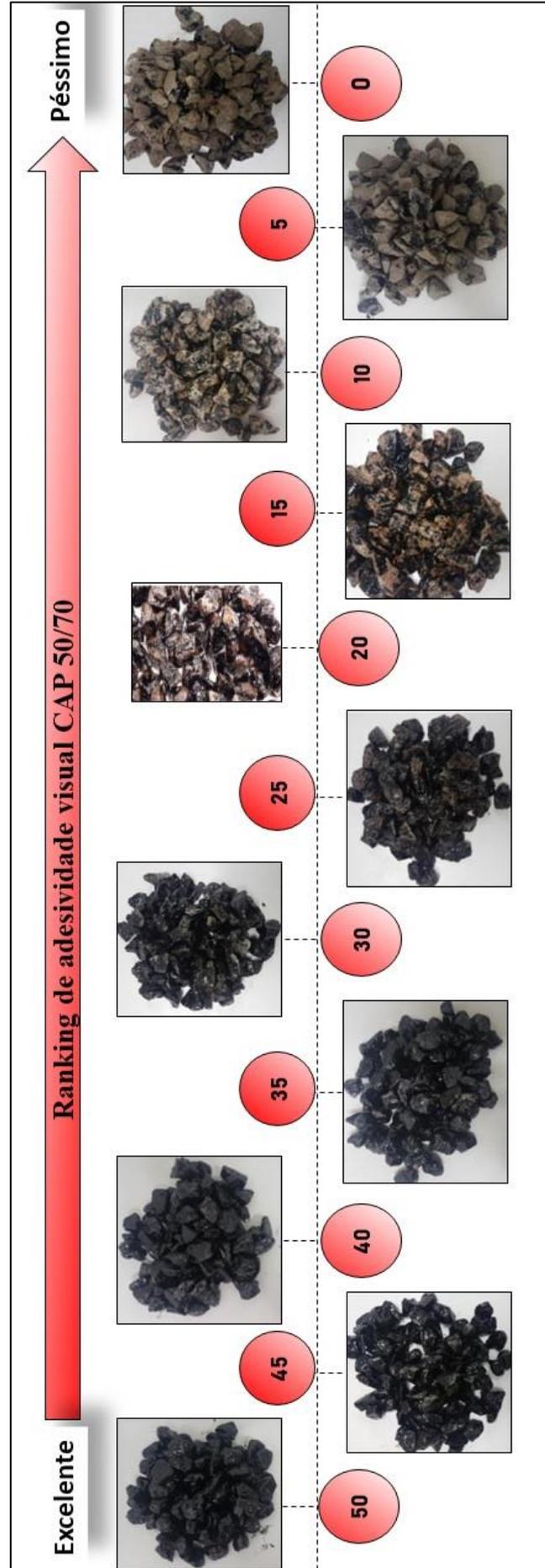
Em vista do procedimento proposto pela norma, Brondani (2019) após classificar as 15 pedreiras estudadas, em satisfatória e não satisfatória, procurou de forma visual padronizar, com base em seus resultados. Com isso, a autora propôs um “Ranking de adesividade visual CAP 50/70” (Tabela 2-2), sendo esse exemplificado através da Figura 2-7.

Tabela 2-2 - Ranking de adesividade visual CAP 50/70.

Adesividade visual CAP 50/70	índice
Excelente	50
Muito boa	45
Muito boa	40
Boa	35
Boa	30
Boa	30
Boa	25
Ruim	20
Ruim	15
Muito ruim	10
Péssimo	5
Péssimo	0

Fonte: Modificado de Brondani (2019)

Figura 2-7- Resultado de adesividade de Brondani (2019).



Para complementar os estudos de adesividade, Brondani (2019) realizou uma análise comparativa com os seguintes ensaios: descrição de lâmina petrográfica, FRX, AIMS e adesividade. Desta forma, concluiu que a adesividade está diretamente relacionada ao tipo litológico da rocha. Sendo assim, a interação agregado/betume, sofre influência da composição mineralógica, pois interfere diretamente na ligação entre betume e agregado por meio das forças de atração eletrostáticas.

2.4.7 Comparativo entre as especificações no âmbito da engenharia

Diante das características de avaliação necessárias para a aplicabilidade do agregado discutido nos itens apresentados anteriormente, faz-se necessário avaliar os critérios impostos pelas normas em vigor, em decorrência dos limites estabelecidos nos ensaios. Os procedimentos bem como execução dos ensaios e análise, são, em geral, normatizados pelas normas brasileiras ABNT e DNIT.

Em decorrência da pesquisa avaliar agregados de diferentes estados, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, buscou-se apresentar um comparativo em relação as mais diversas normas vigentes, DAER - RS (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – RS), DEINFRA-SC (Departamento Estadual de Infraestrutura) e DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte), de acordo com o seu uso na pavimentação o que encontra-se resumido na Tabela 2-3.

Tabela 2-3- Comparativo entre normativas.

Ensaio	Agregados para Pavimentação		
	RS	SC	DNIT
Abrasão Los Angeles	Trat. Sup. Simples (DAER – ES – P 14/11): $\leq 30\%$	-	Trat. Sup. Simples (DNIT ES 146/2012): $\leq 40\%$
	-	Base estab. Gran. (DEINFRA – SC – ES – P – 11/16): $\leq 50\%$	Base estab. Gran. (DNIT ES 141/2010): $\leq 55\%$
	-	-	Pav. Flexíveis: (DNIT ES 31/06): $\leq 50\%$
	Trat. Sup. Duplo (DAER ES- P 15/11): $\leq 30\%$	-	Trat. Sup. Duplo (DNIT ES 147/2012): $\leq 40\%$
	-	-	Pav. Rígido: (DNIT EM 37/97): $\leq 50\%$
	Pav. Microrrev. a frio (DAER – ES – P 19/91): $\leq 40\%$	Pav. Microrrev. a frio (DEINFRA – SC – ES – P – 07/16): $\leq 40\%$	Pav. Pré-mist. a frio (DNER – ES 317/97): $\leq 40\%$

Continuação

	Macad. Seco (DAER – ES – P 07/91): ≤ 50%	Macad. Seco (DEINFRA – SC – ES – P – 03/15): ≤ 45%	Macad. Hid. (DNIT ES 152/10): ≤ 50%
Esmagamento	-	-	Pav. Rígido: (DNIT EM 37/97): sujeito a desgaste superficial: ≤ 65% demais concretos: ≤ 55%
Índice de forma	Trat. Sup. Simples (DAER – ES – P 14/11): ne	Trat. Sup. Simples	Trat. Sup. Simples (DNIT ES 146/2012): ≥ 0,5
	-	Base estab. Gran. (DEINFRA – SC – ES – P – 11/16): ≤ 0,5	Base estab. Gran. (DNIT ES 141/2010): ne
	Pav. Flexíveis (DAER ES-P 15/91): ne	-	Pav. Flexíveis: (DNIT ES 31/06): ≥ 0,5
	Trat. Sup. Duplo (DAER ES- P 15/11): ne	-	Trat. Sup. Duplo (DNIT ES 147/2012): ≥ 12%
	Pav. Rígido: Pav. Microrrev. a frio (DAER – ES – P 19/91):	Pav. Microrrev. a frio (DEINFRA – SC – ES – P – 07/16): ≤ 0,5	Pav. Pré-mist. a frio (DNER – ES 317/97): ≥ 0,5
Macad. Seco (DAER – ES – P 07/91): ne	Macad. Seco (DEINFRA – SC – ES – P – 03/15):ne	Macad. Hid. (DNIT ES 152/10): ne	
Partícula Lamelar	Trat. Sup. Simples (DAER – ES – P 14/11): ≤ 25%	Trat. Sup. Simples	Trat. Sup. Simples (DNIT ES 146/2012): ne
	Base estab. Gran.	Base estab. Gran. (DEINFRA – SC – ES – P – 11/16): ≤ 20%	Base estab. Gran. (DNIT ES 141/2010): ne
	-	Pav. Flexíveis	Pav. Flexíveis: (DNIT ES 31/06): ne
	Trat. Sup. Duplo (DAER ES- P 15/11): 25%	Trat. Sup. Duplo	Trat. Sup. Duplo (DNIT ES 147/2012): ne
	Pav. Microrrev. a frio (DAER – ES – P 19/91): 40%	Pav. Microrrev. a frio (DEINFRA – SC – ES – P – 07/16): ≤ 20%	Pav. Pré-mist. a frio (DNER – ES 317/97): ne
	Macad. Seco (DAER – ES – P 07/91): ne	Macad. Seco (DEINFRA – SC – ES – P – 03/15): deverão ser removidos os fragmentos alongados, lamelares ou de tamanho excessivo	Macad. Hid. (DNIT ES 152/10): livres de excesso de partículas lamelares
Torrões de Argila	-	-	Pav. Rígido: (DNIT EM 37/97): Conc. Apar.: ≤ 1% c/ desgaste superf.: ≤ 2% Demais: ≤ 3%
Equivalente de Areia	Trat. Sup. Simples (DAER – ES – P 14/11): ne	-	Trat. Sup. Simples (DNIT ES 146/2012): ne
	-	Base estab. Gran. (DEINFRA – SC – ES – P – 11/16): ≥ 50%	Base estab. Gran. (DNIT ES 141/2010): ≥ 30%
	-	-	Pav. Flexíveis: (DNIT ES 31/06): ≥ 55%
	Trat. Sup. Duplo (DAER ES- P 15/11): ne	-	Trat. Sup. Duplo (DNIT ES 147/2012): ne

Continuação

	-	-	Pav. Rígido: (DNIT EM 37/97): ne
	Pav. Microrrev. a frio (DAER – ES – P 19/91): ne	Pav. Microrrev. a frio (DEINFRA – SC – ES – P – 07/16): ne	Pav. Pré-mist. a frio (DNER – ES 317/97): $\geq 55\%$
	Macad. Seco (DAER – ES – P 07/91): $\geq 50\%$	Macad. Seco (DEINFRA – SC – ES – P – 03/15): ne	Macad. Hid. (DNIT ES 152/10): $\geq 55\%$
Sanidade com sulfato de sódio e magnésio	Trat. Sup. Simples (DAER – ES – P 14/11): $\leq 10\%$	ne	Trat. Sup. Simples (DNIT ES 146/2012): $\geq 12\%$
	-	Base estab. Gran: (DEINFRA – SC – ES – P – 11/16): Agregado graúdos: $\leq 12\%$ e 15% agregados miúdos	Base estab. Gran. (DNIT ES 141/2010): ne
	-	ne	Pav. Flexíveis: (DNIT ES 31/06): $\leq 12\%$
	Trat. Sup. Duplo (DAER ES- P 15/11): 10%	ne	Trat. Sup. Duplo (DNIT ES 147/2012): $\leq 12\%$
	ne	ne	Pav. Rígido: (DNIT EM 37/97): ne
	Pav. Microrrev. a frio (DAER – ES – P 19/91): 10%	Pav. Microrrev. a frio (DEINFRA – SC – ES – P – 07/16): ≤ 12	Pav. Pré-mist. a frio (DNER – ES 317/97): $\leq 12\%$
	Macad. Seco (DAER – ES – P 07/91): 12%	Macad. Seco (DEINFRA – SC – ES – P – 03/15): $\geq 12\%$	Macad. Hid. (DNIT ES 152/10): 20% - sulfato de sódio e 30% - sulfato de magnésio

Com base na Tabela 2-3, nota-se que, embora cada estado tenha suas próprias normas, os limites estabelecidos em alguns ensaios são semelhantes e, outros se diferem. Portanto, é importante antes de avaliar e caracterizar a rocha saber o local que o material foi coletado, assim como, onde será empregado, pois dependendo o resultado pode interferir futuramente na obra empregada.

2.4.8 Considerações finais

As características dos minerais que compõem as rochas, exercem influência no comportamento tecnológico do agregado. Dentre essas características, cabe destacar a forma, o hábito, clivagem, fratura, dureza, entre outros. No entanto, alguns desses parâmetros só podem ser analisados por intermédio da lâmina petrográfica. Neste sentido, o hábito e a forma cristalina são reflexos do contato entre os minerais, que exercem influência no desempenho mecânico do material. Por sua vez, clivagem corresponde a tendência dos minerais de romperem-se, segundo planos paralelos. Já a fratura, representa os planos de rompimento que não coincidem com os planos de clivagem. Por fim, a dureza, refere-se à resistência que o mineral apresenta de ser riscados.

Nesse sentido, as características presentes no agregado mineral, decorrentes da formação geológica (estrutura da rocha), são parâmetros que estão intimamente, associados às propriedades de forma, que, juntamente com os índices físicos, interferem no bom desempenho mecânico do material. A massa específica do agregado está relacionada a composição mineralógica, no entanto, através deste parâmetro é possível inferir sobre a condição do material, ou seja, grau de alteração, pois subentende-se que, quanto menor a densidade do material (para um mesmo tipo de rocha), maior a sua absorção de água. Por conseguinte, menor será a resistência quando submetido aos ensaios de avaliação mecânica.

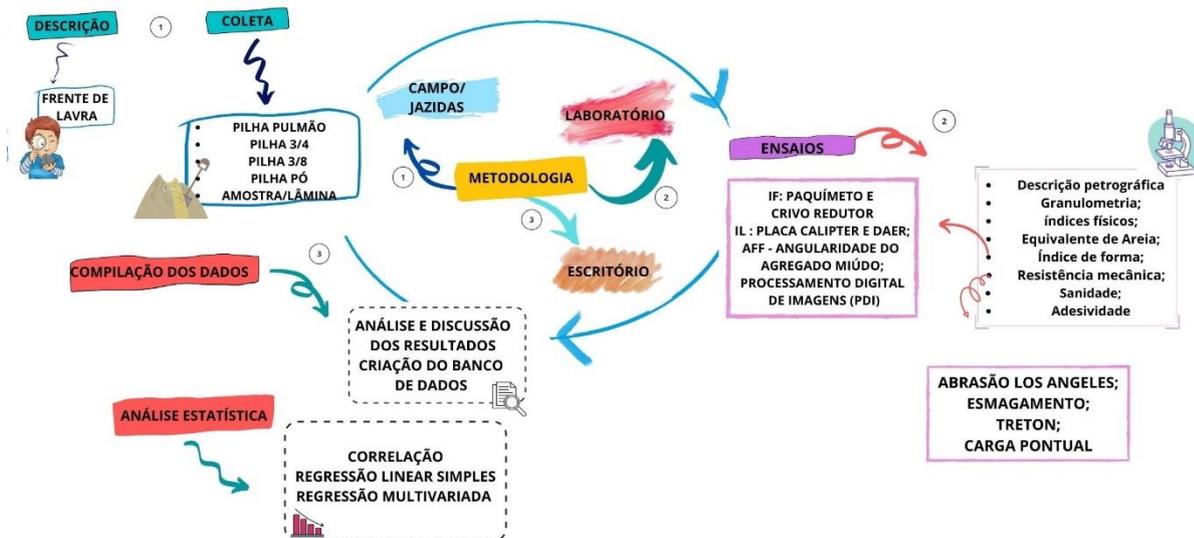
A estrutura e textura da rocha portanto, são características que também influenciam na qualidade do agregado. Rochas de granulação fina, apresentam melhor desempenho mecânico quando comparado as de granulação média a grossa. Esses parâmetros, associados às formas do agregado mineral, permitem compor esqueleto mineral, para as misturas asfálticas, que objetivam obter melhor desempenho mecânico. Neste caso, busca-se por agregados cuja propriedade apresente maior cubicidade, angularidade e textura superficial rugosa, com o propósito em criar maior intertravamento das partículas, e consequente, melhor desempenho quanto as solicitações impostas.

Por fim, os índices físicos e a presença de certos minerais são propriedades que influenciam na boa adesividade do agregado. O descolamento da película de ligante asfáltico junto ao material pétreo é vista imprópria para o material de infraestrutura por inutilizar a coesão. Esse efeito ocorre porque a água separa essas duas parcelas, material pétreo e asfalto, chamado de material hidrófilo. No entanto, quando o material pétreo apresenta boa adesividade em presença de água, ele passa a ser nomeado como hidrofóbicos. Além disso, os agregados são compostos por diferentes minerais, com composições variáveis. Os agregados de rocha classificados como ácida costumam apresentar mau desempenho de adesividade, enquanto, rochas de composição mais básicas, apresentam melhor adesividade ao ligante asfáltico.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para cumprir todos os objetivos, a metodologia foi dividida em etapas de campo, laboratório e escritório. Cabe salientar que grande parte dos ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) da Universidade Federal de Santa Maria, contando ainda com o Laboratório de Laminação do Departamento de Geociências. Além desses, houve apoio da instituição externa Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE. Ao total foram visitadas cinco pedreiras para avaliação do maciço rochoso (frente de lavra) e coleta de material britado, duas localizadas no Estado de Santa Catarina e as outras três, situadas no Rio Grande do Sul. A Figura 3-1 sintetiza as etapas utilizadas nesse trabalho.

Figura 3-1 - Esquema da metodologia adotada na presente pesquisa.



3.1 ETAPA DE CAMPO

A etapa de campo teve início com a escolha das jazidas, cuja exploração encontra-se ativa e apresentam infraestrutura de médio a grande porte. Além disso, para complementar os trabalhos já realizados no PPGEC por Paiva (2017) e Back (2018), optou-se, por jazidas cujo material pétreo extraído trata-se de litologias de rochas plutônicas e metamórficas.

Como já salientado, Paiva (2017) estudou seis jazidas localizadas na porção central do estado do RS e Back (2018) caracterizou outras seis, porém, situadas no Planalto e Escudo Sul Rio Grandense. Sendo assim, as jazidas selecionadas na presente pesquisa estão inseridas dentro do Escudo Sul Rio Grande e Complexo Granulítico de Santa Catarina, portanto, buscou-se avaliar e caracterizar esses agregados, com foco na aplicação da regularização de sub-leitos, sub-base, base e revestimentos. A Tabela 3-1 apresenta as coordenadas de localização das respectivas jazidas e sintetiza as nomenclaturas utilizadas.

Tabela 3-1 - Localização, código das pedreiras estudadas.

Código	Nome Empreendimento	Município	Coordenadas Geográficas Datum SIRGAS 2000 (UTM)
FRAG	Britador Fragoso	Campo Alegre - SC	22J 660919,05 m E/ 7102744,02 m S
VOG	Britagem Vogelsanger	Joinville - SC	22J 705279,70 m E/ 7091726,68 m S
MIN	Minersul	Capão do Leão - RS	22J 356218,47 m E /6481377,01 m S
ELD	Eldorado Mineração Ltda	Eldorado – RS	22J 452516.14 m E/ 6670215.12 m S
CONP	Conpasul	Butiá - RS	22J 409812.82 m E/ 6670310,44 m S

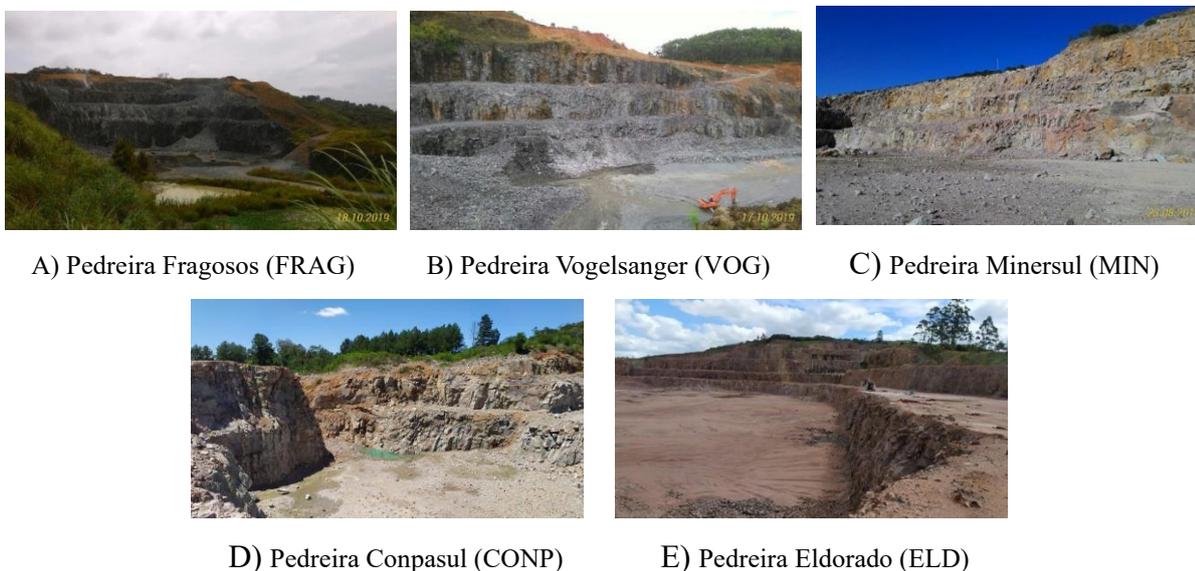
Após definidas as jazidas, procedeu-se a etapa de visita, cujo objetivo consistiu no reconhecimento geológico da atual frente de lavra (no período de realização deste estudo) e, a realização de coleta representativa de amostras para os ensaios laboratoriais. Foram realizados ao todo, cinco visitas de campo, uma em cada jazida e a coleta foi realizada em uma única campanha, para melhor representatividade do material de acordo com a bancada explorada.

Ressalta-se que foram coletadas amostras de mão para a fabricação das lâminas petrográficas, buscando por material representativo das características do maciço rochoso. Além disso, o material britado foi coletado das pilhas $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ ", pó e rachão, localizados nas praças de britagens das diferentes pedreiras.

Destaca-se que, para a Pedreira Fragoso, a coleta foi diferenciada. A jazida apresenta um contato bem demarcado, cuja extração e britagem ocorrem para dois tipos litológicos. No entanto, em decorrência das propriedades mineralógicas da rocha localizada a leste ser diferente da atual frente de lavra e um material extraído em menor quantidade, coletou-se amostras das pilhas $\frac{3}{8}$ " e Pó. Assim, nesta jazida em especial, a coleta para todas as frações ocorreu na britagem mais explorada atualmente (frações $\frac{3}{8}$ " e pó, além da amostra de mão). Na Figura 3-2,

são apresentadas imagens de cada pedreira estudada buscando trazer uma visão geral delas. No item 4.1 , é discutido com detalhe cada uma delas.

Figura 3-2 - Jazidas estudadas neste trabalho.



3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A campanha de ensaios para caracterização tecnológica das rochas envolveu diferentes tipos de ensaios, cujo objetivo foi avaliar parâmetros químicos, geomecânicos e petrográficos dos materiais. Na Tabela 3-2 é sintetizado os ensaios laboratoriais e normativas utilizadas no decorrer da pesquisa. Na sequência, de modo resumido, são apresentados os procedimentos de execução de cada ensaio realizado.

Tabela 3-2 - Ensaio laboratoriais realizados em acordo com as especificações normativas.

Ensaio Laboratoriais	Normas
Análise Petrográfica – materiais rochosos usados em rodovias	DNER – IE 06/94
Agregado - Análise Granulométrica	DNER - ME 83/98
Equivalente de Areia	DNER – ME 54/97
Agregado Graúdo – determinação da absorção e da massa específica	DNER – ME 195/98 NBR 5564/14
Agregado miúdo - Pavimentação asfáltica – mistura asfáltica – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de Ensaio	DNIT 411/2019 - ME
Agregado em estado solto – determinação da massa unitária	DNER – ME 152/95
Agregado Graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro	NBR 7809/08 DNIT 42/2020
	Continuação

Agregado graúdo – determinação do índice de forma (Crivos Redutores)	DNER-ME 86/94 e DNER -ME 86/2020
Agregado graúdo – determinação do índice de lamelaridade	DAER-EL 108/01
Partículas achatadas e alongadas no agregado graúdo (Paquímetro Calíper)	ASTM d 4791/15
Pavimentação – Mistura asfáltica – Teor de vazios de agregados miúdos não compactados	DNIT 415/2019 - ME
Agregados – Determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI) – Método de ensaio	DNIT 432/2020 - ME
Cisalhamento direto	ASTM: D3080-11
Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton	DNER – ME 399/99
Agregado – determinação da Abrasão Los Angeles	DNER – ME 35/98
Agregado graúdo – determinação da resistência ao Esmagamento	DNER – ME 197/97
Resistência à carga pontual	ISRM 1985
Agregado – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio	DNER – ME 89/94
Agregado Graúdo – adesividade a ligante betuminoso	DNER – ME 78/94

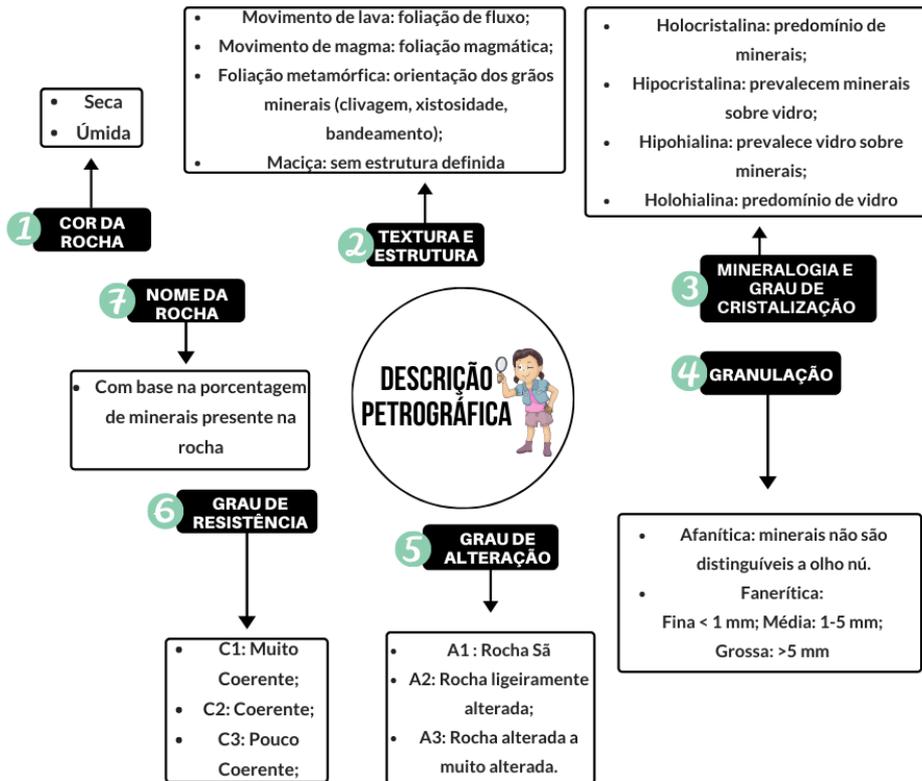
Ressalta-se que, os agregados foram secos e, posteriormente, a separação do material a ser ensaiado ocorreu por meio de quarteamento das amostras nas frações exigidas para em cada ensaio.

3.2.1 Análise petrográfica

Considerando que a análise petrográfica é fundamental para avaliar o comportamento tecnológico das rochas para uso na engenharia civil, a avaliação foi executada via descrição macroscópica a olho nu e com auxílio de lupa de mesa. Também foi utilizada a petrografia microscópica através de luz transmitida com o auxílio de um microscópio petrográfico binocular da marca OPTON. Tanto o preparo das lâminas como as descrições foram realizadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geociências, pertencente à Universidade Federal de Santa Maria.

As normas utilizadas nesta etapa, para fins de caracterização mineralógica e texturais foram a NBR 15845 – Anexo A (ABNT, 2010a) e a DNER-IE 006 (DNER, 1994). Ao todo foram realizadas nove análises petrográficas, buscando obter informações quanto a mineralogia, aspectos texturais e estruturais, grau de alteração, microfraturamento, coesão, entre outras propriedades, que são de grande relevância ao estudo de propriedades físico-mecânicas. A Figura 3-3 sintetiza os aspectos observados e descritos na análise petrográfica.

Figura 3-3 - Fluxograma utilizado para a descrição das rochas coletadas nas jazidas estudadas.



3.2.2 Análise granulométrica

Os agregados geralmente são classificados em grãos (material retido na peneira de malha de 4,75 mm) e miúdos (agregados que passam pela peneira de 4,75 mm). No entanto, ao fazer esse tipo de classificação, surge a necessidade de quantificar as porcentagens dos agregados dentro de grupos menores de tamanho, contido no intervalo que define cada tipo de material. Portanto, a análise granulométrica apresenta as proporções relativas, expressas em porcentagens, dos diferentes tamanhos de grãos, podendo ser expressa pelo material que passa ou pelo material retido por peneiras.

Ressalta-se que o ensaio de peneiramento é um método tradicional utilizado para determinar, e conseqüentemente avaliar, a distribuição granulométrica das partículas de uma dada amostragem. Para o presente trabalho, fez-se o uso da norma DNER – ME 83/98. Após o preparo das amostras, separados de acordo com o exposto na Tabela 3-3, as peneiras foram empilhadas em ordem crescente de abertura das malhas, ficando a de maior abertura na parte superior. O peneiramento procedeu de modo manual, sem o uso de agitador de peneiras.

Tabela 3-3 - Separação da amostra para realização do ensaio de granulometria.

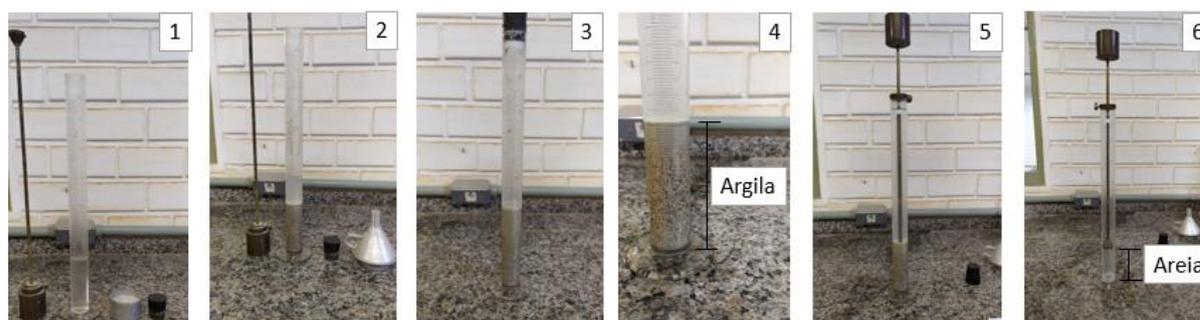
Dimensão máxima características do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
Agregados miúdos até 4,8	1
9,5	5
12,5	7
19,0	7

Após o peneiramento, os agregados retidos em cada peneira foram pesados. Os dados foram plotados em um gráfico, sendo que na ordenada são representados o percentual de massa retida acumulada e a abscissa, as aberturas das malhas das peneiras, em escala logarítmica.

3.2.3 Equivalente de Areia

O ensaio de equivalente de Areia regido pela norma DNER-ME 54/97 permite obter o teor de argila presente na fração de agregados passantes na peneira de malha nº 4 (4,75 mm). O ensaio consistiu em colocar o material separado conforme exposto anteriormente, em uma proveta graduada com uma solução flocculante, que posteriormente foi agitado. A função da solução flocculante consiste em forçar as partículas de argila presente e aderidas aos agregados a se soltarem. Por conseguinte, o material foi deixado em repouso num período de 20 minutos em repouso para que ocorra a sedimentação. Após este período, foi realizada a aferição da altura da argila suspensa e a areia sedimentada. A Figura 3-4 apresenta o esquema do procedimento do ensaio. O valor de equivalente de areia é calculado com base na média de três ensaios, através da relação entre a leitura de areia pela leitura da argila, expresso em termos percentuais.

Figura 3-4 - Procedimento do ensaio de equivalente de areia.



3.2.4 Índices físicos e massa unitária

Para a obtenção da absorção e massas específicas, tantos dos agregados graúdos quanto dos miúdos, foram realizados ensaios de acordo com as normativas DNER-ME 195/98, DNER-ME 81/98, e DNIT 411/2019 - ME, respectivamente.

Para a obtenção da massa específica dos agregados graúdos (Pilha $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ "), a quantidade em massa de agregado foi separada de acordo com a granulometria e tamanho nominal da fração, sendo peneirado e selecionado o material retido na malha 4,75 mm. Com o material limpo e seco, cada amostra permaneceu em imersão em água por um período de 24 horas. Posteriormente, secou-se superficialmente o excesso de água dos fragmentos e pesou-se o material (B). Na sequência, as amostras foram despejadas em um cesto conectado à balança e mergulhadas novamente em água e pesados (C), obtendo a massa imersa. Finalizada esta etapa, as amostras foram secas em estufa até atingir a constância de peso (A). Os cálculos utilizados estão expressos na Tabela 3-4. A Figura 3-5 mostra o procedimento utilizado na determinação dos índices físicos dos agregados graúdos

Figura 3-5 - Procedimentos para obtenção dos índices físicos dos agregado graúdos.



Para a obtenção dos parâmetros físicos do agregado miúdo, seguiu-se o procedimento conforme apresentado na Figura 3-6. Foi utilizado 1 kg de agregado seco, passante na peneira de 4,75 mm e retido em 0,075 mm. Na sequência, o material foi colocado em uma bandeja e imerso em água por um período de 24 horas. Posteriormente, após despejar a água em excesso, o material foi transferido para uma bandeja e exposto ao ar, até que atingiu a condição de superfície saturada. A verificação foi realizada por intermédio do cone metálico e, nesta etapa,

subentende-se que foi atingida a condição satisfatória quando, ao levantar o cone, parte do material havia desagregado. Posteriormente, foi separado em torno de 500 g do material, que foi pesado (B1) e transferido para o picnômetro com 90% de água e agitado, para tirar as bolhas de ar. Então, foi determinada a massa total do picnômetro, amostra e água (C), completada com água até a marca padronizada, e pesado o material (B), por fim, a amostra foi seca em estufa e seu peso, foi aferido (A).

Figura 3-6 - Procedimentos para obtenção dos índices físicos do agregado miúdo.



Tabela 3-4 - Equações utilizadas para obtenção dos parâmetros físicos graúdo e miúdo.

Agregado Graúdo (DNER – ME 195/98) (DNER – ME 81/98)		Agregado Miúdo (DNIT 411/2019 - ME)		Lastro Ferroviário (NBR 5564/14)	
$\gamma_s = \frac{A}{A - C}$	Eq. 3-1	$G_{sa} = \frac{A}{B + B1 - C}$	Eq. 3-2	$\rho_a = \frac{A}{A - C}$	Eq 3-3
$\gamma_{sss} = \frac{B}{B - C}$	Eq. 3-4	$G_{sb} = \frac{B1}{B + B1 - C}$	Eq. 3-5	$\alpha_a = \frac{B - A}{A} * 100$	Eq. 3-6
$D_{ap} = \frac{A}{A - C}$	Eq. 3-7	$ME_{sa} = 0,9771 \frac{A}{B + B1 - C}$ $ME_{sb} = 0,9971 \frac{B1}{B + B1 - C}$	Eq. 3-8		
$a = \frac{B - A}{A} * 100$	Eq. 3-9	$a = \frac{B1 - A}{A} * 100$	Eq. 3-10		

Sendo:

$\gamma_s = d$ = Massa específica na condição seca, (g/cm³);

$\gamma_{sss} = ME_{sb}$ = Massa específica na condição saturada superfície seca, (g/cm³);

$d_a = \rho_a$ = Massa específica aparente, (g/cm³);

ME_{sa} = Massa específica real (g/cm³)

$D_{ap} = G_{sb}$ Densidade aparente do agregado na condição seca, (g/cm³);

G_{sa} = Densidade relativa real (g/cm³)

a = Absorção (%).

Para a obtenção do material provindo da pilha pulmão, foram realizados os seguintes procedimentos conforme apresentados na norma ferroviária NBR 5564/2014 do Anexo B. Foram separados 10 blocos de rochas e submersos em água progressivamente de acordo com as seguintes etapas: inicialmente, 1/3 de sua altura, após 4 horas mais 2/3 e por fim, após o período de 4 horas, completou-se com água todas as amostras.

Por fim, para a realização do ensaio de massa unitária no estado solto, foi utilizado todo o material oriundo da pilha da pedreira, contendo agregados graúdos até miúdos, cujo volume necessário corresponde ao dobro do volume do recipiente utilizado. O ensaio exige que sejam tomadas três determinações com o mesmo material. O recipiente foi cheio com uma concha, evitando segregações, posteriormente, foi rasada a superfície (miúdo) ou regulada as saliências (graúdo) e pesou-se o material. A Eq. 3-11 apresenta o cálculo utilizado para a obtenção da massa unitária e a Figura 3-7 ilustra o procedimento da massa específica solta.

$$\rho_{ap} = \frac{M_{ar} - M_r}{V} \quad \text{Eq. 3-11}$$

Sendo:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado, (kg/m³);

V = volume do recipiente, (m³);

M_{ar} = massa do recipiente com o agregado, (kg);

M_r = massa do recipiente vazio, (kg).

Figura 3-7 - Ilustrativo da massa específica solta.



3.2.5 Forma, angularidade e textura das partículas

A forma dos agregados foi avaliada partindo de seis diferentes ensaios laboratoriais. Os agregados graúdos foram avaliados quanto ao índice de forma através das normas NBR 7809/08

– Método do Paquímetro Digital e DNER-ME 86/94 atualizada DNER-ME 86/2020 – Método dos crivos Redutores. A lamelaridade foi realizada pelas normas DAER – EL 108/01 – índice de Lamelaridade e ASTM d 4791/15 – Paquímetro Calíper. E os agregados miúdos foram avaliados em relação à angularidade, através da normativa DNIT 415/2019 - ME, designada como ensaio FAA. E por fim, tanto os agregados graúdos quanto os miúdos, foram avaliados através do processamento digital de imagem (PDI) pelo AIMS 2, através da normativa DNIT 432/2020.

3.2.5.1 *Avaliação da forma*

A forma obtida através do método do paquímetro, consiste na média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe. O comprimento consiste na maior dimensão possível de ser medida e a espessura, na menor distância entre planos paralelos entre si em qualquer direção do grão. Para este ensaio são necessárias 200 partículas de agregados. O índice deste ensaio varia de 0 a 3, sendo que quanto mais próximo de 1, mais cúbica a forma do agregado. Os cálculos utilizados estão expressos na Tabela 3-5.

Através do método dos crivos redutores é determinada a variação dos eixos multirracionais das partículas que compõem o agregado através de crivos redutores circulares e retangulares. Para este ensaio, inicialmente, a amostra foi separada por peneiramento nos crivos circulares, cujo peso foi determinado de acordo com o preestabelecido na normativa, e, posteriormente, as partículas foram submetidas ao crivo redutor retangular de abertura igual à metade do tamanho diretriz correspondente, anotando-se o peso retido, designado neste caso de Crivo I. O material passante, foi submetido, então ao Crivo Retangular II de abertura igual a 1/3 do tamanho diretriz de cada fração. Ao final, anotou-se o peso do material retido. Neste ensaio, o índice varia entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, mais cúbica será o fragmento do agregado avaliado. Os cálculos utilizados estão expressos na Tabela 3-5. A Figura 3-8 mostra os equipamentos utilizados na determinação do índice de forma.

Figura 3-8 - Equipamento utilizado para obtenção do índice de forma por intermédio do crivo redutor.

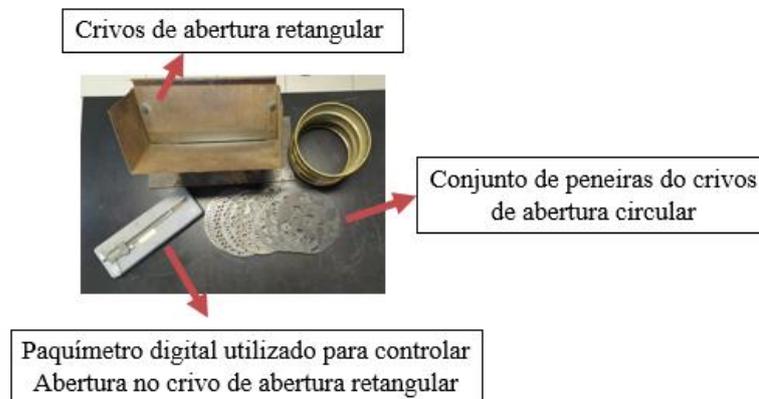


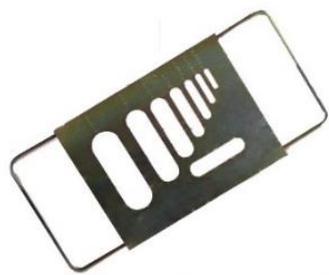
Tabela 3-5 - Equações para obtenção do índice de forma.

Métodos do paquímetro (NBR 7809/08) e		Método dos Crivos Redutores (DNER – ME 86/94)	
$IF = \frac{C}{N_i}$	Eq. 3-1	$IF = \frac{P1 + 0,5 P2}{100_N}$	Eq. 3-2
<p>IF = Índice de forma; N_i = número de grãos a serem medidos na fração i; C = comprimento do grão; e = espessura do grão.</p>		<p>P1 = soma percentagens retidas no Crivo I, de todas as frações; P2 = soma percentagens retidas no Crivo II, de todas as frações; N = número de frações que compõem a graduação.</p>	

3.2.5.2 Avaliação da lamelaridade

O ensaio de lamelaridade leva em consideração a granulometria inicial da amostra. Este ensaio compreende em passar as partículas de cada fração na abertura correspondente da placa e anotando-se o peso da amostra total e o peso do material passante. No final, o índice de lamelaridade foi calculado com base na relação entre o peso do material passante e o peso total da amostra, ponderado pela curva granulométrica. A Figura 3-9 mostra os equipamentos utilizados na determinação da lamelaridade do agregado graúdo.

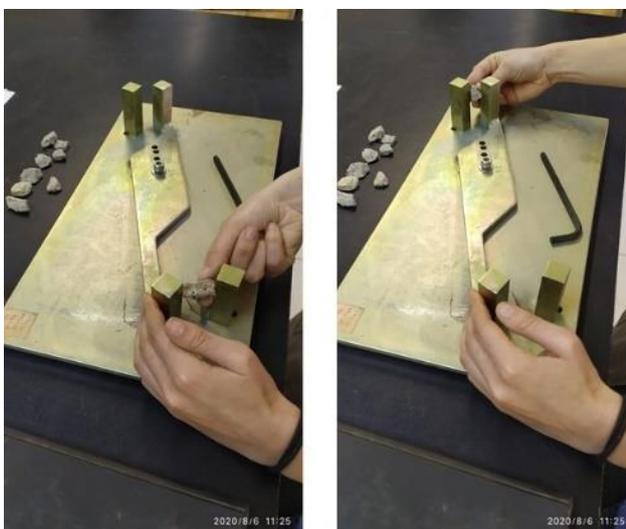
Figura 3-9 - Placa de lamelaridade do DAER.



O ensaio do Paquímetro Calíper (Figura 3-10) permite obter o percentual de partículas achatadas, alongadas e achatadas/alongadas. Para a realização do ensaio, o paquímetro pode ser ajustado para obter correlações entre a maior e a menor dimensão das partículas, conforme as relações estabelecidas: 2:1; 3:1; 4:1 ou 5:1.

Para este ensaio, o agregado é considerado plano, quando ao posicionar a largura do agregado na maior abertura, a espessura dele, consegue passar pela menor abertura. Já em relação às partículas alongadas, deve-se posicionar o comprimento da partícula na maior abertura, por conseguinte, a largura deve ser capaz de passar pela menor abertura. E por fim, os agregados são considerados planos/alongados, quando é possível colocar na maior abertura o comprimento da partícula e na outra, passar sua espessura. Os valores podem ser obtidos da relação por contagem ou por peso da amostra. Neste trabalho, levou-se em consideração os dois fatores.

Figura 3-10 - Equipamento calíper utilizado no respectivo estudo, na foto é apresentando um exemplo de medição de verificação do agregado plano.



3.2.5.3 Avaliação da angularidade dos agregados miúdos

Os ensaios de angularidade de agregados finos foram realizados através do equipamento desenvolvido para a dissertação de Rodrigues (2019) construído na Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

O ensaio de FAA pode ser realizado de acordo com três métodos distintos (A, B ou C). Para a presente pesquisa, foram realizados ensaios conforme os três métodos. No método A, o material miúdo é separado e posteriormente combinado através de frações específicas, conforme Tabela 3-6. O resultado é obtido da média entre duas determinações. Para o método B, o material é separado em frações individuais especificadas (Tabela 3-6), e o ensaio consiste na realização de cada fração de modo separado, porém, ao final do ensaio, o valor de FAA é obtido através da média dos três valores. Por fim, no método C, a amostra ensaiada não apresenta controle da granulometria (Tabela 3-6).

Tabela 3-6 - Parâmetros estabelecidos para avaliação da angularidade do agregado fino de acordo com os Métodos A, B e C.

Peneira (Passado – Retido)	Método A (g)	Método B (g)	Método C (g)
2,36 mm – 1,18 mm	44	190	Amostra única passante 4,75 e retido na #200 190
1,18 mm – 0,60 mm	57	190	
0,60 mm – 0,30 mm	72	190	
0,30 mm – 0,15 mm	17	-	

Os vazios não compactados são calculados pela diferença entre o volume do cilindro e o volume de agregado retido no mesmo, conforme indicado na Tabela 3-7. E a Figura 3-11 ilustra os procedimentos do ensaio.

Tabela 3-7- Cálculo utilizado na obtenção da angularidade do agregado fino (AFF).

(ASTM C 128; DNIT 415/2019 - ME)	
$U = \frac{V_c - \frac{M_a}{\rho_{ap}}}{V_c} * 100$	
U = vazios não compactados (%); M _a = massa do agregado contida no cilindro (g)	ρ_{ap} = massa específica aparente do agregado fino (g/cm ³); V _c = volume do cilindro (cm ³).

Eq. 3-3

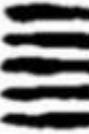
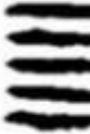
Figura 3-11 - Amostragem do procedimento para obtenção da angularidade do agregado fino (AAF) para o método A, método B e método C.



- Análise visual da forma, angularidade e textura dos agregados finos

As amostras submetidas ao ensaio de FAA foram analisadas por meio visual, de acordo com os diferentes graus de arredondamento, esfericidade e textura, conforme procedimento proposto por Rodrigues (2019), desenvolvido conforme critério apresentado na Figura 3-2 e resumido na Tabela 3-8. Para esta etapa, foram separados em torno de 200 partículas de cada agregado fino de acordo com o Método A do ensaio de FAA, conforme apresentado no item 3.2.5. Cabe ressaltar que as comparações foram realizadas para cada fração granulométrica separadamente.

Figura 3-12 - Graus de angularidade e esfericidade.

ESFERICIDADE	ARREDONDADO 10				
	SUBALONGADO 20				
	ALONGADO 30				
	BEM ALONGADO 40				
Grau de Arred.	Anguloso 1	Subanguloso 2	Subarredond. 3	Arredondado 4	

Fonte: Rodrigues (2019).

Tabela 3-8 - Critério utilizado na avaliação visual do agregado miúdo.

Grau de Arredondamento	Anguloso	1
	Subanguloso	2
	Arredondado	3
Grau de esfericidade	Esférico	10
	Subalongado	20
	Alongado	30
	Bem alongado	40
Textura	Lisa	1
	Rugosa	2
	Polido	3

Adaptado de Rodrigues (2019)

No geral, ao realizar a avaliação visual da forma, nota-se que os agregados apresentam variação de esfericidade e grau de arredondamento (de uma faixa para a outra). Portanto, ao utilizar a Tabela 3-8, pode ser empregado dois números tanto para o fator arredondamento quanto para o de esfericidade. Neste caso, conforme proposto por Rodrigues (2019), deve ser realizada uma soma entre esses dois parâmetros, nomeada por “Soma S” e “Soma P”. A “Soma S” refere-se ao primeiro valor anotado para o grau de esfericidade em adição o primeiro valor de arredondamento, já a “Soma P” trata-se do segundo valor do grau de esfericidade mais valor de arredondamento. Posteriormente, seguiu-se a classificação estabelecida também por Rodrigues (2019), conforme apresentada na Tabela 3-9.

Tabela 3-9 - Classificação da esfericidade/angularidade de acordo com a soma S ou P.

Soma (S ou P)	Classificação
11	Arredondado anguloso
12	Arredondando subanguloso
13	Arredondando Subarredondado
14	Arredondando Arredondado
21	Subalongado anguloso
22	Subalongado subanguloso
23	Subalongado Subarredondado
24	Subalongado arredondado
31	Alongado anguloso
32	Alongado subanguloso
33	Alongado subarredondado
34	Alongado arredondado
41	Bem alongado anguloso
42	Bem alongado subanguloso
43	Bem alongado Subarredondado
44	Bem alongado arredondado

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2019).

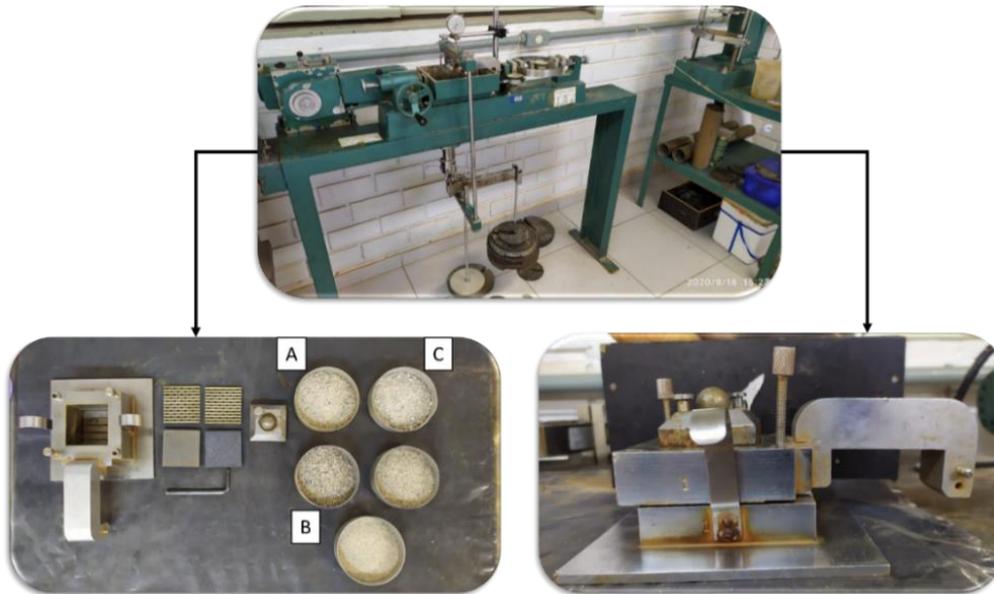
- Ensaio de cisalhamento direto com as amostras do FAA

Como mencionado na revisão bibliográfica, o ensaio de FAA é bastante discutido quanto sua eficácia, o ensaio de cisalhamento direto permite averiguar tal relação, conforme abordado por alguns estudos. Assim, na presente pesquisa optou-se por realizar o ensaio de cisalhamento direto com o material presente dos métodos A e C.

O ensaio de cisalhamento direto é o mais simples para a determinação da resistência ao cisalhamento. Seu objetivo principal é a obtenção da envoltória de resistência e o parâmetro de

ângulo de atrito. Nesta pesquisa, a execução do ensaio seguiu os procedimentos descritos na normativa americana ASTM: D3080-11. O equipamento utilizado para a execução dos ensaios foi uma prensa de cisalhamento direto produzida pela Ronald Top S/A apresentada na Figura 3-13.

Figura 3-13 - Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto.



A tensão de cisalhamento é obtida da relação entre a força e a área cisalhada da amostra, por outro lado, a deformação horizontal e vertical são determinadas a partir do deslocamento e das dimensões da amostra, conforme Tabela 3-10.

Tabela 3-10 - Formulas utilizadas para obtenção dos parâmetros de cisalhamento direto.

$t = \frac{Fhc}{A}$	Eq. 3-4	$Fhc = Lm \times K$	Eq. 3-5	$\epsilon_h = \frac{Lh}{L}$	Eq. 3-6
<p>T = Tensão cisalhante (Kgf/cm²); Fhc = Força horizontal cisalhante aplicada (Kgf); A = área do corpo de prova; Lm = Leitura do extensômetro Lm (0,001 mm);</p>		<p>K = constante da mola (kgf/divisão); ϵ_h = Deformação horizontal (%); Lh = deslocamento horizontal medido através das leituras do extensômetro (Lh) mm; L = Dimensão lateral da amostra (mm);</p>			

Para o presente ensaio, em virtude do material utilizado ser o mesmo dos métodos do FAA, trata-se de material não compacto. Porém, após acomodar a amostra dentro da caixa

bipartida, o material foi submetido a compactação por vibração de modo manual. Foram utilizadas tensões normais de 192, 383 e 500 KPa, visando englobar a variação de tensões de confinamento que o pavimento é submetido quando exposto ao tráfego (GOUVEIA, 2002).

Desenvolvimento do ensaio:

Após a separação e homogeneização da amostra, o material foi colocado na caixa bipartida do cisalhamento. Em seguida, a amostra foi submetida a compactação por vibração. A espessura da camada compactada foi padronizada para todos os materiais ensaiados. Para controlar o índice de vazios de cada amostras, tomou-se o cuidado de colocar sempre o material até uma altura da caixa pré-estabelecida na sequência, a amostra mais todo o suporte foi pesada, caracterizando como M_i .

Posteriormente, a caixa bipartida é colocada na prensa de cisalhamento direto. Antes de iniciar o ensaio, com a tensão normal já aplicada, foi observado no extensômetro (Lv) o valor da deformação de cada amostra.

Os corpos de provas foram submetidos a uma taxa de deformação cisalhante de 0,5 mm/min. O anel dinamométrico utilizado possui uma capacidade de 500 Kgf e constante (K) de 0,16 Kgf/divisão.

As leituras realizadas durante o ensaio: deslocamento horizontal, força cisalhante aplicada e deformação vertical, foram realizadas de modo manual.

3.2.5.4 Caracterização da forma dos agregados através do PDI

A avaliação da forma dos agregados através do PDI, fazendo uso do sistema AIMS2 seguiu a metodologia DNIT 432/2020 – ME e foi realizado no Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Através deste ensaio foi possível avaliar para os agregados graúdos a forma (esfericidade, baseada nas três dimensões da partícula), a angularidade (baseada em duas dimensões) e a textura superficial (através de uma imagem em escala de cinza). Por conseguinte, para partículas miúdas foram obtidos os parâmetros de forma (forma 2D) e a angularidade.

Ressalta-se que para o procedimento desta análise, o material foi quarteado, peneirado e lavado de acordo com as frações e quantidades mínimas requeridas (Tabela 3-11).

Tabela 3-11 - Valor mínimo requerido por cada fração para o ensaio AIMS 2.

Tamanho da Peneira	Número de Partículas Sugerido
19,00 mm (¾")	50
12,50 mm (1/2")	50
9,5 mm (¾")	50
4,75 mm (#4)	50
2,36 mm (#8)	150
1,18 mm (#16)	150
0,60 (#30)	150
0,30 (#50)	150
0,15 (#100)	150
0,075 mm (#200)	150

Por intermédio do software do próprio equipamento, a forma dos agregados analisados foi obtida conforme as equações apresentadas no Tabela 3-12.

Tabela 3-12 - Equações utilizadas para caracterização AIMS.

Ensaio Aggregate Image Measurement System (AASHTO TP 81-12/17 e DNIT 432/2020 - ME)			
Forma 2D $= \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[\frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right]$	Eq. 3-12	$\text{Esfericidade} = \sqrt{\frac{d_s * d_i}{d_L^2}}$	Eq. 3-13
R_{θ} = raio da partícula no ângulo 0°; $\Delta\theta$ = diferença de incremento no ângulo;		d_s = menor dimensão do agregado d_i = dimensão intermediária do agregado d_L = maior dimensão do agregado	
$\text{Angularidade} = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} \theta_i - \theta_{i+2} $	Eq. 3-14	$\text{Text. Sup.} = \frac{1}{3N} \sum_{t=1}^3 \sum_{f=1}^N (D_{t,j}(x,y))^2$	Eq. 3-15
θ = ângulo de orientação dos pontos de borda; n = número de pontos; i = i-ésimo ponto de borda da partícula		D = função de decomposição. n = nível de decomposição da imagem; N = número total de coeficiente em uma imagem; i = direção da textura; j = índice wavalet; x,y = localização dos coeficientes no domínio.	

A partir dos resultados das propriedades de forma obtidos por meio do AIMS2, foram utilizados dois sistemas para classificar as partículas de cada agregado, sendo eles, o primeiro desenvolvido por Al-Rousan (2004) e segundo por Ibiapina et al (2018), conforme

Tabela 3-13.

Tabela 3-13 - Valores limites estabelecidos para a classificação do resultado AIMS 2 através da metodologia Al-Rousan (2004) e Ibiapina et al (2018).

Propriedades	Valores Limites				
	<6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	>10,5	
Forma 2D	< 4,0	4,0 – 11,0	11,0 – 15,5	> 15,5	
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	
Angularidade	<2100	2100 – 4000	4000 – 5400	>5400	
	< 1260	1260 – 4080	4080 – 7180	>7180	
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	
Esfericidade	<0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	>0,8	
	< 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	>0,9	
	Achatado/ Alongado	Baixa Esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	
Textura	<165	165 – 275	275 – 350	350 – 450	>460
	<260	260 – 440	440 – 600	600 – 825	>825
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

OBS: os valores em negrito remetem a classificação de Al-Rousan (2004) e os demais, Ibiapina et al (2018).

3.2.6 Resistência mecânica

Para avaliação da resistência mecânica dos agregados foram utilizados cinco ensaios laboratoriais, cuja resistência por intermédio de cada ensaio é obtida de modos distintos. Ressalta se que a avaliação foi empregada apenas para os agregados graúdos e rachão. O ensaio de Esmagamento foi realizado conforme DNER-ME 197/97, já o ensaio de Abrasão Los Angeles foi realizado tanto para os agregados referente a Pilha ¾” quanto para a ⅜” e seguiu as diretrizes prescritas na DNER-ME 35/98. Quanto à tenacidade, os agregados foram avaliados através do ensaio designado “Perda ao choque no aparelho Treton”, conforme normativa DNER-ME 399/99. E por fim, com as amostras coletadas da pilha rachão, foram submetidas ao ensaio de “Resistência a Carga Pontual” regido pela norma ISRM 1985.

Ressalta-se que, os agregados submetidos aos ensaios de Esmagamento e Abrasão Los Angeles, tiveram sua forma avaliada antes e após os ensaios. Para essa caracterização, contou-se com os ensaios dos Crivos Redutores (DNER-ME 86/94) e índice de Lamelaridade (DAER – EL 108/01). O objetivo de tal procedimento foi avaliar a perda da forma dos diferentes agregados antes e após a submissão aos ensaios de resistência.

Para o ensaio de Esmagamento, de acordo com a especificação normativa DNER-ME 197/97, o material separado é passante na peneira 12,7 e retido 9,5 mm. Neste trabalho, foram utilizados os agregados apenas das pilhas ¾”. Ressalta se que, após a separação, 1/3 de amostra

é colocada no cilindro pré-determinado, efetuando 25 golpes com uma haste de socamento, etapa esta que se repete três vezes. Na sequência, o material é pesado e obtido a massa pré compactada (M_i). Posteriormente, o material é transferido ao cilindro de aço rígido de ensaio, tomando o cuidado em colocá-lo sempre respeitando 1/3 do recipiente e, a cada camada efetua-se novamente, os 25 golpes. Após o preparo do material, deu-se início ao ensaio propriamente dito, aplicando uma carga de 400 KN, a uma velocidade constante de 40 KN por minutos. Finalizada esta etapa, o material foi peneirado e pesado o material retido na peneira de 1,18 mm (massa final - M_f). A Figura 3-14 exemplifica o ensaio de resistência ao esmagamento. A resistência é dada a partir da média de duas determinações, e sua equação é apresentada na Tabela 3-14.

Figura 3-14 - Etapas do ensaio de Esmagamento.



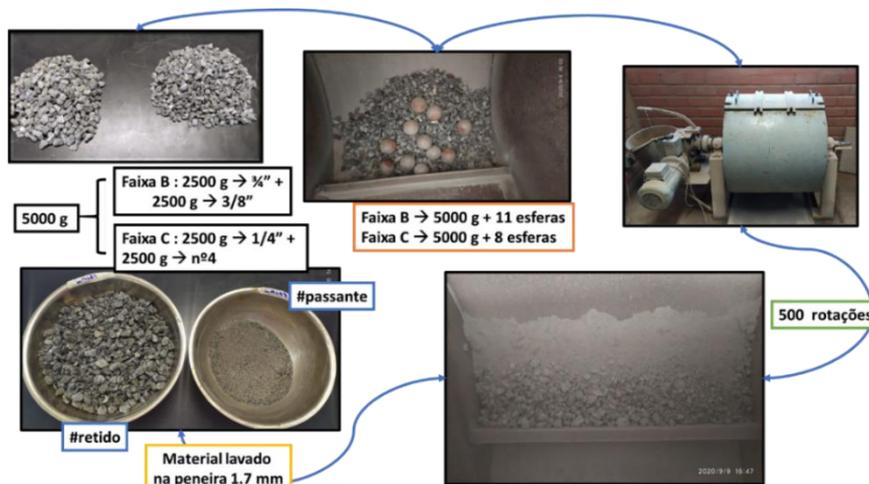
O segundo ensaio, designado para avaliar a resistência às solicitações de impacto no processo de soca, recebe o nome de “Perda ao Choque no aparelho Treton” (Figura 3-15). O método prevê a utilização de no máximo 60 fragmentos de rochas que são separados em três conjuntos de 20 fragmentos, podendo variar para menos, pois o peso inicial foi selecionado levando em consideração 50 vezes a massa específica aparente do agregado. O agregado também foi separado de acordo com uma forma pré-estabelecida, ou seja, com elevada cubicidade, angularidade e equidimensionalidade. Após obtido todos os critérios estabelecidos de acordo com a normativa, cada conjunto de fragmentos de agregados foi posicionado em um cilindro metálico oco e submetido ao impacto (10 quedas) de um soquete padronizado. Após o ensaio, o material foi passado na peneira de 1,7 mm e obteve-se o peso retido. O índice de resistência ao impacto Treton foi calculado de acordo com o Tabela 3-14, e para este ensaio é realizado a média final com três determinações.

Figura 3-15 - Etapas do ensaio “Perda ao Choque” pelo Treton.



Para o ensaio de Abrasão Los Angeles (Figura 3-16) foram escolhidas as faixas granulométricas representativas de acordo com as pilhas $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ ", para tanto, adotaram-se as granulometrias B e C, respectivamente. O procedimento seguiu com a colocação das amostras, após pesadas (Mi), num cilindro giratório de aço, sendo que o correto número de esferas metálicas varia de acordo com a granulometria escolhida. O tambor giratório deve efetuar o ensaio a uma velocidade constante, a depender do número de rotações e em conformidade a granulometria escolhida, no geral, gira a velocidade de 30 a 33 rpm, até completar o número de rotações especificadas.

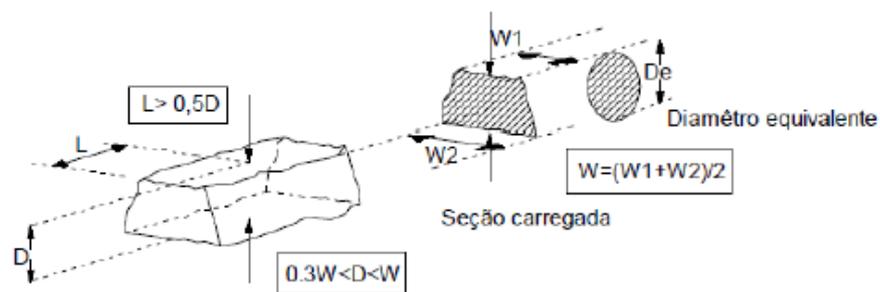
Figura 3-16 - Etapas do ensaio de Abrasão Los Angeles.



O resultado do ensaio, refere-se a perda por desgaste. Portanto, após o ensaio, o material foi lavado na peneira de número 1,68 mm e pesado depois de seco (Mf). O índice da resistência “ALA” é calculado através da relação entre a diferenças das massas inicial e retida na peneira com abertura de 1,68 mm, conforme apresentado na Tabela 3-14.

Por fim, o último ensaio realizado é designado “Resistência a Carga Pontual”. Este ensaio permite obter a resistência de um fragmento de rocha quando submetido a ruptura entre duas ponteiros cônicos normalizados. Em decorrência da impossibilidade de obter corpos de provas regulares para ensaio de compressão uniaxial, foi executado o ensaio com os fragmentos de rochas coletados da pilha rachão. No entanto, antes da realização do ensaio propriamente dito, os fragmentos irregulares foram medidos e verificados se atendiam as dimensões conforme apresentado na Figura 3-17.

Figura 3-17 - Especificações para o ensaio de carga puntiforme com amostra irregular.



Fonte: ISRM (1985)

O ensaio consiste na aplicação de carga pontualmente no corpo de prova, por meio de dois cones metálicos. Para o presente ensaio, foram separados um total de 20 fragmentos de rochas, sendo 10 destes realizados a seco e os outros 10 saturados em água por 72 horas. No entanto, foi observado que o tempo de 72 horas indicado pela normativa, não foi suficiente para que, os tipos litológicos estudados viessem a saturar (Figura 3-18). Diante do exposto, foram também efetuados ensaios após um período maior de saturação, sendo este de um mês (30 dias). Conforme resultado, ressalta-se que, o respectivo período ainda não foi suficiente para a saturação por completo da rocha, conforme amostrado na Figura 3-18.

Figura 3-18 - Rompimento da amostra após saturação por 72 horas e 1 mês.



Neste ensaio, a ruptura ocorre pelo desenvolvimento de fraturas paralelas ao eixo de carregamento, e os parâmetros obtidos são calculados conforme apresentado no Tabela 3-14.

Tabela 3-14 - Equações utilizadas para obtenção dos parâmetros mecânicos.

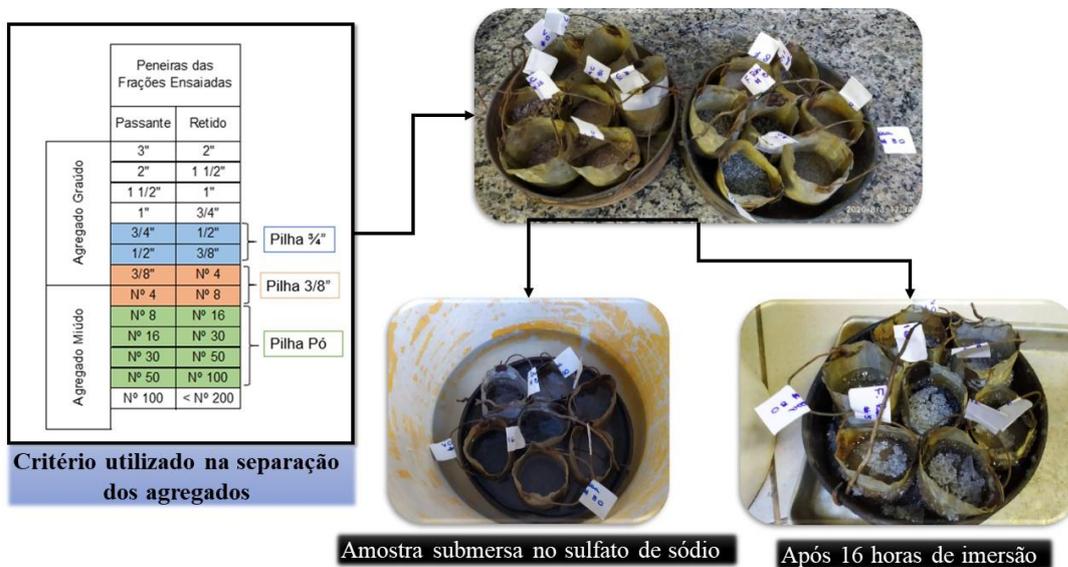
Resistência ao Esmagamento (DNER – ME 197/97)		Perda do Choque no Treton (DNER – ME 399/99)		Abrasão Los Angeles (DNER – ME 35/98)	
$ESM = \frac{M_I - M_F}{M_I} * 100$	Eq. 3-7	$T = \frac{M_I - M_F}{M_I} * 100$	Eq. 3-8	$ALA = \frac{M_I - M_F}{M_I} * 100$	Eq. 3-9
Resistência à Carga Pontual – Point Load Test (ISRM, 1985)					
$(D_e)^2 = \frac{4WD}{\pi}$	Eq. 3-10	$F = \left(\frac{D_e}{50}\right) 0,45$	Eq. 3-11	$I_s = \frac{FP}{(D_e)^2}$	Eq. 3-12
ESM = resistência ao Esmagamento (%) T = perda do choque Treton ALA = resistência a Abrasão Los Angeles (%); M _I = massa inicial (g) M _F = massa final (g).			De = diâmetro equivalente (mm ²); W = largura do corpo de prova (mm); D = altura do corpo de prova (mm); F = fator de correção de tamanho; I _s = índice de resistência corrigido (Mpa); P = carga de ruptura (N).		

3.2.7 Durabilidade e sanidade

O ensaio de durabilidade de agregados com solução de Sulfato de Sódio foi realizado seguindo a normativa do DNER ME 89-94 e do DAER – EL 104/01, para as duas normativas, o processo consiste na avaliação quantitativa (determinação da perda de peso) e qualitativa (observação visual) da alteração do agregado após submetido alternadamente a imersões numa solução saturada de sulfato de sódio e a secagens em estufa.

Os ensaios foram executados com o uso das três pilhas coletadas ($\frac{3}{4}$ " , $\frac{3}{8}$ " e pó) e, separados em acordo com a representatividade da curva granulométrica, conforme exposto na Figura 3-19. Ressalta-se que, para a normativa DNER-ME 89/94, a avaliação do agregado miúdo finaliza na faixa passante nº 30 e retido nº 50.

Figura 3-19 - Critério utilizado na separação dos agregados para submissão do ensaio de sanidade.



Após a separação nas respectivas faixas, os agregados foram lavados e secos e após, foi obtido o peso inicial para cada fração. Posteriormente, as amostras foram imersas na solução de sulfato de sódio, durante um período de 14-16 horas e, na sequência, foram secas na estufa, cada ciclo durando 24 horas. Este procedimento foi executado por cinco ciclos consecutivos. Finalizado esta etapa, as amostras foram lavadas, secas e peneiradas nas respectivas peneiras e obteve-se o peso do material retido.

A perda no ensaio de durabilidade pela normativa DNER-ME é obtida pela média ponderada calculada em função da porcentagem de perda de cada fração e com base na granulometria da porção do material que representa a amostra. Já para a norma DAER – EL 104/01, segue-se o mesmo procedimento em relação à média, porém, a ponderação já vem pré-estabelecida, ou seja, não se leva em consideração a granulometria. Outro diferencial, consiste na expressão final. Neste caso, a perda final corresponde a somatória obtida entre a perda do agregado graúdo multiplicando por 0,55 a do miúdo, multiplicando por 0,45.

3.2.8 Afinidade ao ligante asfáltico

O ensaio de afinidade ao ligante asfáltico ou Adesividade é normatizado pelo DNER – ME 078/94. Para o presente ensaio, são separados aproximadamente 500 g do material passante na peneira de malha 19,1 e retido 12,7 mm. Esse material foi lavado, para que materiais pulverulentos não viessem interferir na ligação dos ligante asfáltico ao agregado.

O agregado foi aquecido a temperatura pré-estabelecida de 100 °C. A temperatura do ligante betuminoso irá depender da composição dele. No presente ensaio, foi utilizado ligante asfáltico CAP 50/70 pré-aquecido a 120°C, sendo utilizado 17,5 g por mistura. Na sequência, conforme apresentando na Figura 3-20, com o agregado e ligante betuminoso aquecidos, foi realizada a homogeneização da mistura até que todo o material estivesse recoberto pelo ligante. Posteriormente, a mistura foi transferida para um recipiente e, após resfriamento, as amostras foram totalmente recobertas por água destilada. O material foi colocado em estufa a 40°C por 72 horas. Após este período, faz-se a avaliação visual da adesividade do agregado ao ligante, classificando entre satisfatória e não satisfatória.

Figura 3-20 - Esquema utilizado para a realização do ensaio de adesividade.



3.3 ANÁLISES DE CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS

A análise estatística permite avaliar e modelar relações entre variáveis, com o propósito em gerar um modelo matemático. A correlação tem como objetivo avaliar o grau de associação

entre duas variáveis, por conseguinte, as regressões lineares simples e multivariada permitem obter um modelo que seja capaz de descrever a relação entre variáveis dependentes e independentes.

Diante do exposto, um dos objetivos do presente estudo consistiu em utilizar apenas variáveis cuja correlação respeita-se os critérios geológicos e laboratoriais de existência. Pois segundo Landim (2011), os resultados obtidos por intermédio de vias quantitativas, devem apresentar explicação lógica e coerente no contexto das geociências. Deste modo, o método empregado neste estudo está atrelado ao raciocínio geológico na avaliação da possibilidade de comparação entre as variáveis petrográficas e físico-mecânicas.

Deste modo, as análises estatísticas utilizadas na presente pesquisa consistem nas correlações lineares simples e multivariada. Alguns testes foram necessários para averiguar qual metodologia de fato adequava-se aos dados, para não ocorrer a geração de uma análise subestimada ou superestimada. A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas em cada análise. Ressalta-se que, em todas as análises aplicadas, foram utilizados os softwares Excel e o RStudio, versão R v. 4.0,5 (R Core Team, 2021).

3.3.1 Metodologia aplicada na análise de correlação linear simples

Para a análise e correlação dos dados foi utilizada a Análise de Correlação e as análises de Regressão Linear Simples e Multivariada. De acordo com Farrar e Glauber (1967), é desejável que variáveis independentes tenham uma correlação linear com a variável dependente. Diante do pressuposto, foram desenvolvidas quatro matrizes de correlação, uma que abrange todos os conjuntos de rochas e outras três separadas por litologias, sendo elas: vulcânica, plutônica e metamórfica.

Após a análise dos resultados apresentados na matriz de correlação, deu-se sequência às análises de regressão. Para identificar os melhores modelos matemáticos, gerados através da combinação das variáveis independentes e dependentes, foram calculados os valores de R^2 e p-valor. Tais combinações foram abordadas como cenário neste estudo. Ressalta-se que, um modelo é considerado válido quando for confirmado estatisticamente. Deste modo, para um nível de confiança de 95%, o p-valor deve ser menor que 0,05. Para o valor de R^2 não há um valor mínimo a ser considerado válido, porém, quanto maior o valor, melhor é o nível de ajuste do modelo.

Para a construção de um modelo, é imprescindível a definição das variáveis independentes e dependentes. Neste aspecto, na Tabela 3-15 são apresentadas as variáveis que,

com base em trabalho encontrado na literatura, foram utilizadas como dependentes e independentes.

Tabela 3-15 - Variáveis dependentes e independentes utilizadas na análise de regressão linear simples.

Propriedades	Variável dependente	Variável independente
Características Mecânicas	ALA	Esmagamento
	ALA	Treton
	ALA	Is(50)seco
	ALA	Is(50)sat
	Esmagamento	Treton
	Esmagamento	Is(50)seca
	Esmagamento	Is(50)sat
Características mecânicas versus índices físicos	ALA	Absorção $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ "
	ESM	Absorção
	TRETON	Absorção
	Is(50)seco	Absorção
Características Mecânicas versus Durabilidade	ALA	Durabilidade
	ESMAGAMENTO	Durabilidade
	TRETON	Durabilidade
Características Mecânicas versus Petrografia	ALA	Granulação
	ESMAGAMENTO	Granulação
	TRETON	Granulação
Índices físicos	M.E.A	Absorção
	M.E.A	Durabilidade
Angularidade do Agregado Miúdo	FAA	Ângulo de atrito
	FAA	PDI
	PDI	Ângulo de atrito

De posse dos resultados obtidos na regressão linear simples, foram avaliadas as regressões multivariadas, com o propósito de chegar a um modelo que possibilite prever a variável dependente com base em mais variáveis independentes. Na Tabela 3-16 são apresentadas as variáveis dependentes e as independentes utilizadas na análise de regressão multivariada.

Tabela 3-16 - Variáveis dependentes e independentes utilizadas na análise de regressão multivariada.

Propriedades	Variável dependente	Variável independente	
Características Mecânicas	ALA	Esmagamento	Treton
	ALA	Esmagamento	Is(50) seca
	ALA	Absorção ($\frac{3}{4}$ "	Absorção ($\frac{3}{4}$ "

4 RESULTADOS E ANÁLISES

No presente capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios para avaliar as propriedades tecnológicas de agregados, sendo inicialmente apresentado uma descrição das jazidas (pedreiras) e caracterização petrográfica das rochas destas jazidas.

4.1 AVALIAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO E ANÁLISE PETROGRÁFICA

Este item se destina a apresentar as jazidas estudadas descrevendo a atual frente de lavra, comportamento e feições geológicas evidentes no maciço rochoso. Tais análise ajudaram, posteriormente, a compreender os resultados obtidos na caracterização do agregado, em vista que, o agregado pode apresentar comportamentos associado a rocha de origem que muitas vezes só pode ser observado no maciço (pedreira). Portanto, foram analisados os seguintes aspectos: heterogeneidade litológica do material, presença de estruturas (descontinuidades), intensidade de alteração e padrão de fraturamento.

4.1.1 Pedreira Fragoso (FRAG)

Os granulitos máficos (de origem dioríticas) e os granulítico félsicos (de origem graníticas) da pedreira Fragosos, em Santa Catarina no município de Campo Alegre - SC, estão inseridos no Complexo Granulítico de Santa Catarina e pertencem a unidade Gnaiss Granulítico Luis Alves (CPRM, 2014).

A pedreira possui três bancadas exploradas pelo método de lavra a céu aberto. De forma geral, na bancada inferior do maciço do granulítico máfico, foi observado uma grande variedade de descontinuidades, com dobras de grande porte e rocha com estrutura foliada, porém, não foi observado um padrão de orientação preferencial, conforme apresentado na Figura 4-1-1. Além disso, a rocha apresenta estrutura metamórfica bem marcada. Nota-se que, esse tipo de estrutura se torna um facilitador a percolação à água da chuva no maciço, podendo resultar na sua alteração de forma diferencial, embora, nas porções analisadas, a rocha não se apresentava alterada.

A atual frente de lavra é marcada por uma rocha escura (preta) maciça a bandada fanerítica classificada como Granulito Máfico (Figura 4-1-1), diferente das rochas subjacentes, que apresentam coloração cinza claro, com bandeamento incipiente com níveis milimétricos ricos em quartzo, feldspato (rosa) em associação a biotita (preto), classificada como Granulito Félsicos (Figura 4-1-2).

Figura 4-1 - Aspecto geral da pedreira Fragosos com os pontos mais importante observados: 1) Dobra de grande porte; 2) Granulito Félsico em contato com a rocha Granylito Máfico.



Para a confecção de lâminas petrográficas optou-se por caracterizar tanto a atual frente de lavra, como também, o contato rochoso existente. Porém, este último para sua utilização apresenta problemas operacionais que são decorrentes desta variação litológica. Por conseguinte, essa variação repercute diretamente na produção da brita que, devido as características texturais e mineralógicas da rocha, tem como uma das consequências o desgaste do britador, devido à alta porcentagem de sílica.

Na Tabela 4-1 e Tabela 4-2 são descritos os resultados obtidos da análise petrográfica para as amostras 1 e 2, respectivamente.

Tabela 4-1 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida FRAG-M (NBR 7389-1/2009).

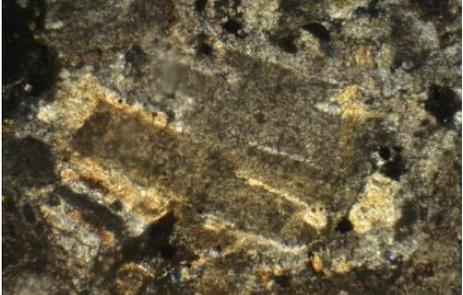
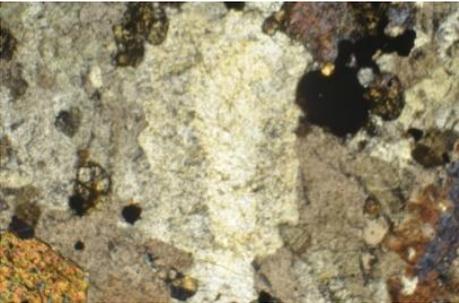
<p>Identificação: Pedreira FRAG – Amostra 1 Procedência: Pedreira Fragosos, Campo Alegre/SC</p>	 <p>Fotografia: Amostra de mão</p>
<p>Cor: No estado seco/úmido: preto com ripas de plagioclásio/cinza escuro com porções cinzas</p>	
<p>Textura e Estrutura: Rocha holocristalina, com textura predominantemente equigranular, granulação média, caracterizada por constituintes minerais visíveis a olho nu, os minerais variam de 0,3 a 0,6 mm. Ao microscópico observa-se textura ígnea preservada com plagioclásio ripiforme, maclado e parcialmente alterado, bem como, foliação cataclástica com presença de alguns minerais quebrados por deformação mecânica.</p>	
<p>Estado de Alteração: Na amostra de mão não se observa alteração na rocha. Em lâmina delgada, alguns minerais primários apresentam-se levemente alterados por hidrotermalismo. A amostra pode ser classificada como ligeiramente alterada A2 (DNER-IE 006/94).</p>	
<p>Composição Mineralógica: Plagioclásios (32%): os cristais variam de 2 a 5 mm, têm formas subédricas a euédricas, apresentam bordas irregulares devido às reações metamórficas e por vezes, apresentam deformações, como segmentação de cristais, apesar de alguns cristais ainda apresentarem maclamento polissintético. Anfibólios (25%): variam de 0,8 a 2,5 mm, pleocroísmo com variação do verde a castanho, por vezes apresenta bordas deformados com bordas irregulares. Piroxênios (23%): cristais em tons de verde e por vezes, rosado, com pleocroísmo, variam de 1 a 2 mm, e por vezes, apresenta-se com bordas serrilhadas, mineral característico de hiperstênio. Quartzos (10%): incolores e ocorrem como cristais anédricos variam de 1 a 1,5 mm, geralmente, com contatos irregulares com hornblenda e plagioclásio. Biotitas (7%): apresentam-se como lamelas de aproximadamente 1 mm, possui baixo pleocroísmo, variando do marrom ao marrom claro, em alguns casos apresenta-se cloritizada. Minerais opacos (3%): ocorre como fenocristais de forma subédricos a anédricos.</p>	
 <p>Fotomicrografia Lâmina com aumento de 4 vezes, com presença de cataclase e no centro plagioclásio (LN 2x4/01).</p>	
<p>Classificação Petrográfica: <i>Granulito Máfico</i></p>	
<p>Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)</p>	

Tabela 4-2 - Descrição petrográfica da Amostra 2 da jazida FRAG-F (NBR 7389-1/2009).

<p>Identificação: Pedreira FRAG – Amostra 2 Procedência: Pedreira Fragosos, Campo Alegre/SC</p>	
<p>Cor: No estado seco/úmida: cinza claro rosado/cinza escuro rosado</p>	<p>Fotografia: Amostra de mão</p>
<p>Textura e Estrutura: Rocha holocristalina apresenta estrutura foliada caracterizada pela orientação de biotita, k-feldspato e quartzo estirados, marcado por um bandeamento incipiente com níveis milimétricos (3 a 5 mm), ricos em quartzo e k-feldspato e níveis máficos muito finos e descontínuos de biotita. Em lâmina, observa-se textura poiquiloblástica (quando grãos maiores englobam grãos minerais podendo ou não estarem orientados) e textura cataclástica.</p>	
<p>Estado de Alteração: Na amostra de mão não se observa alteração na rocha. Em lâmina delgada, alguns minerais primários apresentam-se levemente alterados por hidrotermalismo. A amostra pode ser classificada como ligeiramente alterada A2 (DNER-IE 006/94).</p>	
<p>Composição Mineralógica: <i>k-Feldspatos potássicos (41%):</i> minerais de forma prismática pouco alongada, subédrica com dimensões entre 0,2 a 0,5 cm. Apresentam contato suturados entre os grãos e, por vezes, apresentam-se argilizados por alteração hidrotermal e intempérica, alterados para epidoto e sericita. <i>Quartzos (22%):</i> incolores, variando de 0,2 a 0,5 mm, apresenta-se com extinção ondulante. <i>Plagioclásios (14%):</i> presentes na matriz e como fenocristais. No geral, são euedricos à subédricos, levemente zonado e com macla polissintética. <i>Biotitas (12%):</i> de cor castanha e com pleocroísmo de amarelo a castanho, variando de 0,3 a 0,5 mm, encontram-se espaçados na rocha, às vezes alterado para clorita. <i>Anfibólios (hornblenda)(8%):</i> apresentam cor esverdeada a amarronzada, com planos de clivagem preenchidos predominantemente por biotita. <i>Minerais opacos (3%):</i> ocorrem em geral, subédricos a anédricos.</p>  <p>Fotomicrografia – Lâmina delgada mostrando textura poiquiloblástica (LN 2x4/01).</p>	
<p>Classificação Petrográfica: <i>Granulito Félsicos</i></p>	
<p>Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)</p>	

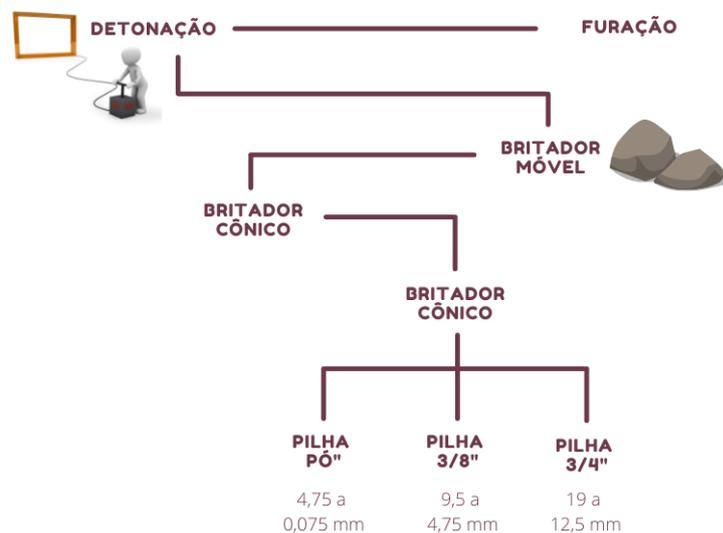
As amostras coletadas da jazida Fragosos apresentam sinais de processos metamórficos e diagenéticos que indicam significativa diferença na composição química, mineralógica e textural na origem do protólito. Entretanto, as duas amostras provêm de rochas plutônicas granulito máfico do diorito (Amostra 1 – FRAG-M), enquanto, a granulito félsico do granito (Amostra 2 – FRAG-F). A rocha FRAG-M apresenta textura equigranular de granulação média

com minerais variando de 0,3 a 0,6 mm, e, em lâmina, observa-se foliação cataclástica com presença de alguns minerais quebrados devido a deformação mecânica que a rocha foi submetida ao longo da sua formação. Além disso, a rocha é composta por minerais máficos, dentre eles, plagioclásio, anfibólio e piroxênio que são minerais que permitem maior facilidade na fragmentação até atingir o tamanho desejado do agregado.

Por sua vez, a rocha FRAG-F, apresenta estrutura foliada, com orientação de minerais de biotita, k-feldspato e quartzo, marcando bandeamento incipiente. A foliação cataclástica é pouco presente nesta rocha, diferente do observado na rocha FRAG-M. Além disso, a composição mineralógica é outro ponto a ser destacado, a rocha FRAG-F é composta por minerais félsicos, como quartzo e k-feldspato, que apresentam maior porcentagem de sílica, dificultando a fragmentação do material e gerando maior desgaste do britador, sendo por isso, uma rocha pouco explorada na jazida Fragosos.

Na pedreira, há instalada uma planta de britagem. O fluxograma na Figura 4-2 exemplifica a planta de britagem da pedreira Fragosos.

Figura 4-2 - Fluxograma da planta de britagem da Pedreira Fragoso.



Após a etapa de furação e detonação, a fragmentação dos blocos é realizada em três etapas, sendo elas: (1) primária, realizado por um britador móvel SANDWICK QJ331; (2) secundária, realizada por britador cônico da marca LUFTEC 1350; e (3) terciário, realizado pelo britador cônico VSI LUSAN 500, sendo nesta última etapa obtido o material nas frações pilha $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " e pó.

4.1.2 Pedreira Vogelsanger (VOG)

As rochas de origem metamórfica da Pedreira Vogelsanger, localizado no município de Joinville Santa Catarina, pertencem ao Complexo Granulítico de Santa Catarina correspondente a unidade Gnaisses Granulítico Luis Alves (CPRM, 2014). A rocha da presente jazida se formou em decorrência de um ambiente de alta pressão e temperatura, neste caso especificamente, associado ao metamorfismo regional, que gerou rochas com estruturas gnáissicas, com minerais orientados.

Os gnaisses apresentam bandeamento composicional gerado por segregação metamórfica, com disposição irregular e descontínua, de espessura variando de milimétrica a centimétrica. As bandas máficas são dominantes e constituídas à base de biotita. A orientação dos cristais de biotita caracteriza a textura nematoblástica média a grossa. Os níveis félsicos possuem composição quartzo-feldspática e textura granoblástica inequigranular caracterizada por cristais de plagioclásio e quartzo.

A pedreira possui três bancadas e com lavra a céu aberto. De modo geral, o maciço rochoso onde está instalada a pedreira possui diversos tipos de descontinuidades como múltiplas falhas e fraturas ao longo da frente de lavra. As descontinuidades no maciço são apresentadas na Figura 4-3 (1) e (2). Nota-se que os processos de percolação de água, identificado na Figura 4-3 pelo círculo em vermelho, ocorre em decorrência da facilidade da água da chuva infiltrar pelas diversas zonas de falhas existente ao longo da bancada tanto superior quanto inferior, provocando a alteração da rocha. Isto pode ser constatado pela alteração da coloração das rochas para tons marrons claros a amarelo na porção superior do maciço (Figura 4-4).

Figura 4-3 - Aspecto geral da pedreira Vogelsanger com os pontos mais importantes observados.



Figura 4-4 - Bancada superior identificada pelo círculo laranja zona de alteração.



A rocha sã possui uma intercalação de cores com bandas pretas e brancas e encontra-se preferencialmente na bancada inferior. A alteração é mais pronunciada na bancada superior, adjacente à espessa camada de solo, este com características argilosas. Isso foi observado por Meurer (2015). A autora relatou em seu trabalho, a presença de material argiloso no interior das fraturas do maciço rochoso, na frente de lavra no ano 2016.

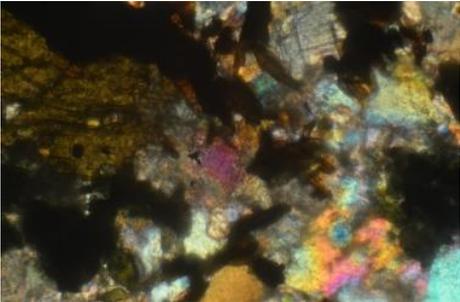
A biotita gnaisse é uma rocha com alternância de bandas claras (brancas) e escuras (pretas), marcando foliação metamórfica, com estrutura de bandeamento de aproximadamente 0,5 cm. A olho nu são identificáveis micas bem formadas, com 0,5 a 1,5 cm, com tamanho médio de 0,5 cm. Destaca-se a maior fragilidade da rocha ao tato com frequente perda e descolamento de cristais lamelares de mica (Figura 4-5 B).

Figura 4-5 - Detalhe da rocha VOG – A) amostra de mão com ênfase na estrutura de bandeamento; B) amostra de mão, detalhe dos minerais micáceos.



Embora o maciço rochoso apresente litologia diferentes e, porções mais sãs e outras mais alteradas, optou-se no presente estudo caracterizar petrograficamente apenas a atual porção explorada no ano da coleta do material (Tabela 4-3). O agregado coletado na praça de britagem e posteriormente caracterizado no laboratório apresenta visualmente composição apenas da rocha sã.

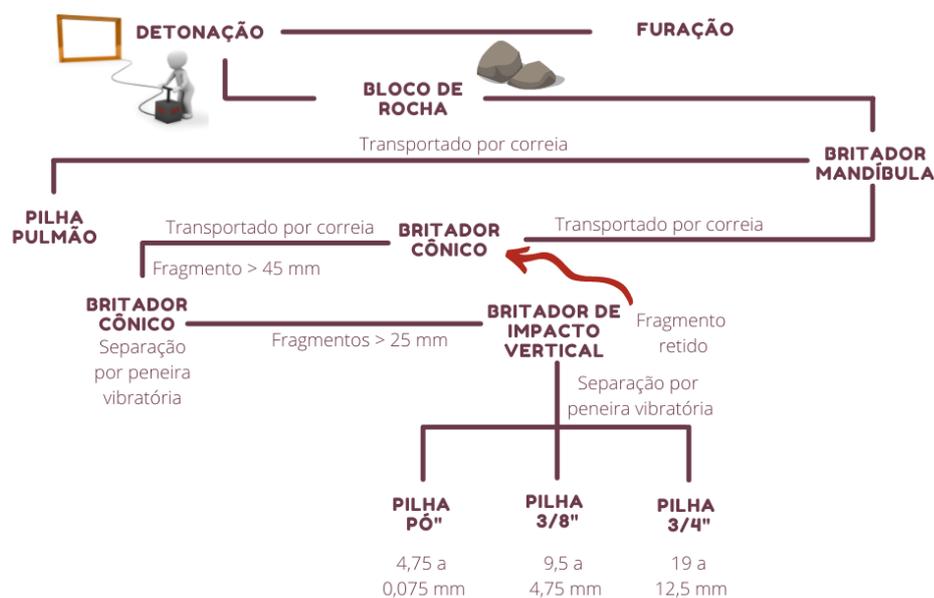
Tabela 4-3 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida VOG (NBR 7389-1/2009).

Identificação: Pedreira VOG – Amostra 1 Procedência: Pedreira Vogelsanger, Santa Catarina/SC	
Cor: No estado seco/úmido: preto e branca/preto e branco	Fotografia: Amostra de mão
Textura e Estrutura: Rocha holocristalina com granulação de média a grossa, textura do tipo lepidoblástica e estrutura foliada com bandas quartzo-feldspáticas alternadas com bandas máficas de biotita, com dimensão média de 0,5 cm. A olho nu são identificáveis micas bem formadas, com 0,5 a 1,5 cm, com tamanho médio de 0,5 cm. Em lâmina observa-se textura cataclástica com minerais quebrados devido a esforço mecânico.	
Estado de Alteração: Na amostra de mão não se observa alteração. Ao microscópico os minerais primários apresentam-se levemente alterados por hidrotermalismo com geração de clorita, epidotos e sericita. A amostra pode ser classificada como ligeiramente alterada A2 (DNER-IE 006/94).	
Composição Mineralógica: Plagioclásios (32%): no geral, são euédricos à subédricos, levemente zonado e com macla polisintética. Alguns minerais apresentam-se alterado para sericita. Quartzos (25%): ocorrem como agregado intersticiais com extinção ondulante, marcando processos tectônicos, com bandas de deformação, estrutura de cristais e recristalização. Por vezes apresenta textura cataclase, no qual a quebra deste tipo de mineral está associada a esforços tectônico. Biotitas (18%): apresentam-se com cor castanha e com pleocroísmo de amarelo a castanho, alguns com borda corroída, às vezes em processo de cloritização (biotita esverdeada), alterado para clorita. Feldspatos (14%): a luz natural, ocorrem em tons de amarelo e não são pleocróicos, com cores entre o cinza e o amarelo claro. As formas são prismáticas pouco alongada, subédrica com dimensões entre 0,4 a 1,0 cm. Anfibólios (8%): ocorrem em contato com as biotitas e plagioclásio, apresenta cor variando de verde a marrom. Minerais opacos (3%): ocorre em geral, subédricos a anédricos.	
	
Fotomicrografia – Textura cataclástica (LN 2x4/01).	
Classificação Petrográfica: <i>Biotita Gnaisse</i>	
Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)	

No que tange aos processos de beneficiamento, há instalada na pedreira uma planta de britagem. Após etapa de furação e detonação, a fragmentação dos blocos é realizada em quatro

etapas de britagem, sendo elas: (1) primária, realizada por um britador de mandíbulas do modelo C125; (2) secundária, material é transportado através de um transportador de correia até a pilha pulmão (pedra rachão) e fragmentos superiores a 32 mm são transportados para um segundo britador do tipo cônico; (3) terciária, os fragmentos são transportados por correia e, fragmentos superiores a 45 mm são direcionados para um terceiro britador do tipo cônico; (4) quaternária, com auxílio de uma peneira vibratória, o material é separado, fragmentos retidos na peneira de 25 mm são encaminhados para um quarto britador de impacto vertical, o material é passado novamente para um conjunto de peneiras vibratórias, que separa o agregado em três tamanhos, brita 2, brita 1 e brita 0, que são referentes a Pilha ¾", ¾" e pó, respectivamente. Todo material que passa pelos britadores terciários e quartanários, retornam para o britador secundário e passam novamente por todo processo, até saírem com tamanhos referentes a brita 2, 1 e 0.

Figura 4-6- Fluxograma da planta de britagem da Pedreira Vogelsanger.

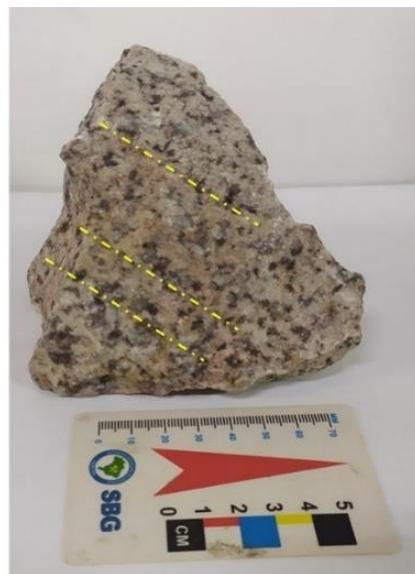


4.1.3 Pedreira Minersul (MIN)

Situada no município de Capão do Leão, no Rio Grande do Sul, que segundo a CPRM (2014) é identificada como Granito Capão do Leão, dentro da Suíte Dom Feliciano, na borda do Batólito de Pelotas. A Suíte Dom Feliciano faz parte de um importante cinturão orogênico alongado conhecido como Batólito de Pelotas, que por sua vez integra um sistema de orogêneses em maior escala, representado pela Província Mantiqueira.

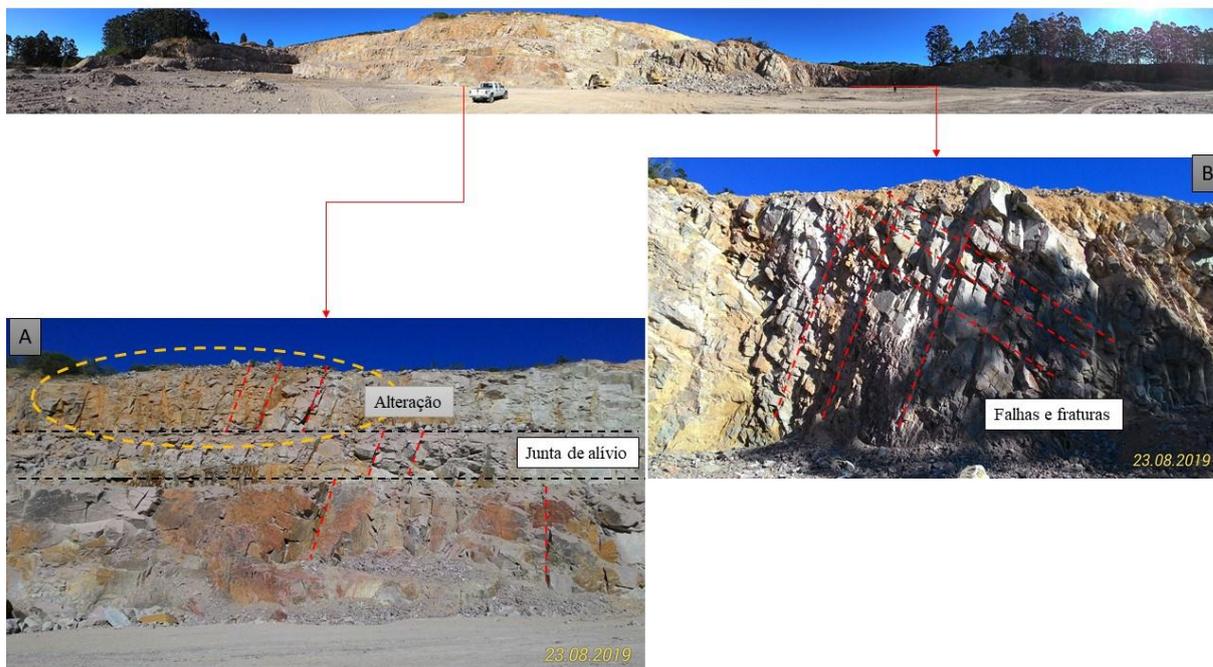
A pedreira é formada por rochas maciças com predominância de sienogranitos, de coloração branca e rosa, porém, em algumas porções do maciço foi evidenciada pequena mudança composicional com a presença de uma rocha granítica de cor cinza mais escuro do tipo monzogranito. A textura é predominantemente fanerítica média a grossa, com estrutura maciça e predomínio de fraturas ao longo de toda pedreira. Em porções da pedreira, foi identificado foliação do tipo magmática dada pelo alinhamento dos minerais (Figura 4-7).

Figura 4-7 - Alinhamento dos minerais indicando foliação magmática.



A jazida possui três bancadas e, nota-se que, a definição destas bancadas é delimitada por juntas de alívio. De modo geral, apenas nas porções superiores das bancadas foram evidenciadas zonas de alteração intempéricas, possivelmente por tratar-se de uma área bastante fraturada, a água percola por essas discontinuidades com maior facilidade, acarretando a alteração do maciço, como pode-se observar pela alteração da cor da rocha nesta área (Figura 4-8 – A).

Figura 4-8 - Aspecto geral da pedreira Minersul com os pontos mais importante observados
 A) Frente de lavra com juntas de alívio que define as bancadas e no círculo amarelo, evidencia de rocha mais alterada.
 B) Bancada onde a rocha apresenta falhas e fraturas.



Com base nas observações realizadas nessa pedreira, foram coletadas duas amostras de mão (denominadas amostras 1 e 2) em pontos específicos para descrição macroscópica e confecção de lâminas delgadas. A amostra 1 corresponde a um sienogranito, rocha predominantemente na jazida e a Amostra 2, uma rocha leucocrática (cor mais clara em comparação à anterior) classificada como monzogranito.

A Tabela 4-4 e Tabela 4-5 apresenta a descrição petrográfica da Amostra 1 e Amostra 2, respectivamente.

Tabela 4-4 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida MIN (NBR 7389-1/2009).

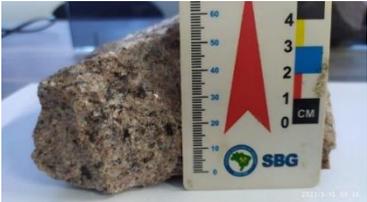
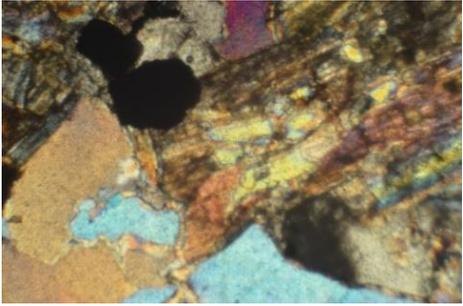
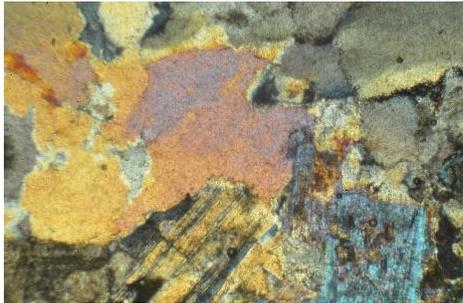
<p>Identificação: Pedreira MIN – Amostra 1 Procedência: Pedreira Minersul, Capão do Leão - Rio Grande do Sul/RS</p>	
<p>Cor: No estado seco/úmido: rosa e branca/rosa e branca</p>	<p>Fotografia: Amostra de mão</p>
<p>Textura e Estrutura: Rocha fanerítica média e com textura cristalina. Minerais predominantes visíveis a olho nu, variando de 0,5 a 10 mm e, com uma leve orientação mineralógica provavelmente associada a esforços. Ao microscópico observa-se textura equigranular-hipidiomórfica e poiquilítica pela intrusão de biotita e plagioclásio em feldspatos potássicos. Presença de esforços deformacionais visíveis pela orientação da biotita e presença de quartzo e feldspato com bordas quebradas.</p>	
<p>Estado de Alteração: Na amostra de mão não se observa alteração. Ao microscópico os minerais primários apresentam-se levemente alterados por hidrotermalismo com geração de clorita, epidotos e sericita. A amostra pode ser classificada como ligeiramente alterada A2 (DNER-IE 006/94).</p>	
<p>Composição Mineralógica: Feldspatos alcalino (45%): a luz natural, ocorrem em tons de amarelo e não são pleocróicos. Mineral de baixo relevo e birrefringência com cores entre cinza e o amarelo claro, com forma de prisma subédricos. Quartzos (25%): ocorrem como anédricos, incolores com extinção ondulante, fraturados e por vezes com bordas serrilhadas, indicando textura catáclase, devido a esforços deformacionais associado a formação da rocha, que gera quebra em grãos menores. Plagioclásios (22%): ocorrem incolor a luz natural e cinza a amarelo a luz polarizada. A forma é de prismas longos, com presença de macla polissintética. Biotitas (3%): ocorrem como pequenos prismas castanhos com clivagem marcadas por oxidação e argilização. Minerais opacos (8%): forma subédricas a anédricas com bordas oxidadas. Classificadas como magnetita e ilmenita</p>	
	
<p>Fotomicrografia – Mostra textura hipidiomórfica e poiquilítica (LN 2x4/01).</p>	
<p>Classificação Petrográfica: <i>Sienogranito</i></p>	
<p>Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)</p>	

Tabela 4-5 - Descrição petrográfica da Amostra 2 da jazida MIN (NBR 7389-1/2009).

<p>Identificação: Pedreira MIN – Amostra 2 Procedência: Pedreira Minersul, Capão do Leão - Rio Grande do Sul/RS</p>	 <p>Fotografia: Amostra de mão</p>
<p>Cor: No estado seco/úmido: cinza/cinza escuro</p>	
<p>Textura e Estrutura: Rocha fanerítica média, com constituintes visíveis a olho nu, os minerais variam de 0,2 a 0,5 mm. Ao microscópico observa-se textura inequigranular hipidiomórfica e poiquilitica pela intrusão de biotita e plagioclásio em feldspato. Nota-se a evidência de esforços de deformações, devido a orientação da biotita, quartzo e feldspato com bordas quebradas.</p>	
<p>Estado de Alteração: Na amostra de mão não se observa alteração. Ao microscópico os minerais primários apresentam-se levemente alterado por hidrotermalismo com geração de cloritas, epidotos e sericita. Os plagioclásios e os feldspato apresentam argilizados, especialmente nas bordas microfraturadas. A amostra pode ser classificada como ligeiramente alterada A2 (DNER-IE 006/94).</p>	
<p>Composição Mineralógica: Plagioclásios (40%): a luz natural, ocorrem incolor e cinza a amarelo a luz polarizada com macla polissintéticas. Quartzos (27%): ocorrem anédricos, incolores e apresenta extinção ondulante, por vezes apresenta-se fraturados bordas serrilhadas. Feldspatos (25%): a luz natural, ocorrem em tons de amarelo e não são pleocróicos, apresenta relevo baixo e birrefringência com cores entre cinza e o amarelo claro. As formas são de prismas subédricos. Biotitas (5%): de cor castanha e com pleocroísmo de amarelo a castanho, alguns com borda corroída, às vezes alterado para clorita; Minerais opacos (3%): ocorre em geral, equidimensionais e subédricos. Classificadas como magnetita e ilmenita</p>	
	
<p>Fotomicrografia - Mostra textura hipidiomórfica e poiquilitica e grãos de quartzo (cinza) com borda serrilhada (LN 2x4/01)</p>	
<p>Classificação Petrográfica: <i>Monzogranito</i></p>	
<p>Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)</p>	

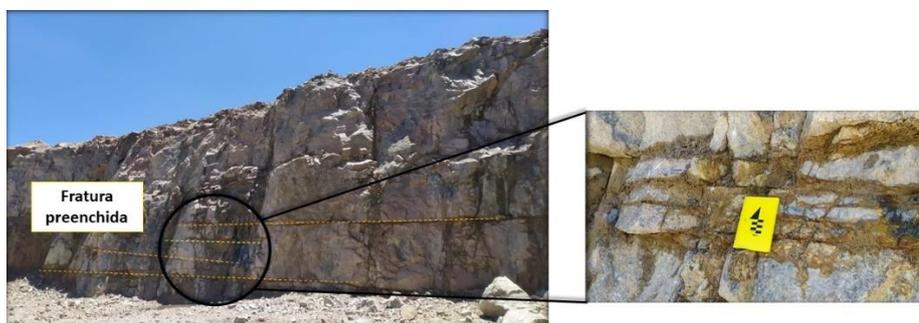
As amostras coletadas da jazida Minersul apresentaram diferença composicional e textural que permitiu identificar duas rochas diferentes, sendo elas: sienogranito (Amostra 1) e monzogranito (Amostra 2). A rocha sienogranito (Amostra 1) apresenta minerais variando de 0,5 a 10 mm, enquanto, a rocha monzogranito (Amostra 2), os minerais variam de 0,2 a 0,5

mm, em ambas as rochas foram observados leve orientação mineralógica provavelmente associado a foliação do tipo magmática. No entanto, essas rochas apresentaram diferença em relação a porcentagem na composição mineralógica, o sienogranito é formado essencialmente, em ordem decrescente, por feldspato alcalino, quartzo e plagioclásio, enquanto o monzogranito, plagioclásio, quartzo e feldspato. Entretanto, o material britado, referente as pilhas $\frac{3}{4}$ ”, $\frac{3}{8}$ ” e pó, apresentam composição heterogênea, ocorre tanto sienogranito quanto monzogranito, isso demonstra que todo o material da pedreira é britado sem nenhum critério de seleção.

4.1.4 Pedreira Conpasul (CONP)

A jazida Conpasul (CONP) localiza-se no município de Butiá, Rio Grande do Sul e geologicamente inserida no batólito de Pelotas pertencendo a Suíte Intrusiva Erval (CPRM, 2014). Esta pedreira é formada por duas bancadas demarcadas por juntas de alívio. Na porção superior foi observada uma zona de maior grau de fraturamento, com predomínio de fraturas verticais, enquanto, na porção inferior, é observado fraturas horizontais e algumas verticais, porém, preenchidas com material característico de processo de alteração da própria rocha de origem (Figura 4-9). Ressalta-se que, na maior parte do maciço rochoso predomina rocha sã, porém, nas zonas de falha, constatou-se percolação de água pelas fraturas, que pode facilitar a alteração da rocha (argilização), originando o material (argilominerais) que está preenchendo muitas destas fraturas.

Figura 4-9 - Fraturas preenchidas por material de alteração da própria rocha.



Foi observada, na porção inferior da bancada 1, foliação do tipo magmática definida pelo alinhamento de fenocristais de feldspato potássico com grão de tamanho em torno de 1 cm. Este alinhamento relativamente regular de feldspato se apresenta em vários pontos na frente de lavra, porém, à medida que deslocamos para as porções superiores do maciço, a

regularidade e a definição desta foliação diminuem, isto é, a estrutura da rocha passa ser mais maciça. Além disso, estruturas, como veios de quartzo, também foram observados nas porções inferiores da bancada 1, bem como, a presença da textura rapakivi (feldspato circundado por plagioclásio) e antirapakivi (plagioclásio circundado por feldspato) em amostras de mão (Figura 4-10A).

Figura 4-10 - a) e b) grãos de feldspato porfirítico a megaporfirítico; c) textura antirapakivi.

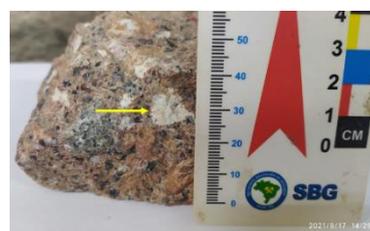


A jazida é formada por uma rocha ígnea intrusiva com aspecto granítico e apresenta cor acinzentada com pontuações de cor esbranquiçada a alaranjada dadas por megacrístais de feldspato potássico. Quando alterados mostram tonalidades esbranquiçadas a rosadas. A textura porfirítica está definida por uma densidade variável de 10 a 35% de megacrístais tabulares de feldspato potássico imerso numa matriz inequigranular fina a média (1-5 mm), composta por feldspato potássico, plagioclásio, quartzo e biotita. Os megacrístais são subédricos a euédricos com formas prismáticas tabulares variáveis entre 1 a 3 cm, com média de 1,5 cm.

Figura 4-11 – Amostras de mão coletadas na jazida CONP, sendo: A) grãos de feldspato e plagioclásio porfirítico a megaporfirítico B) megacrístais de feldspato potássico alterados.



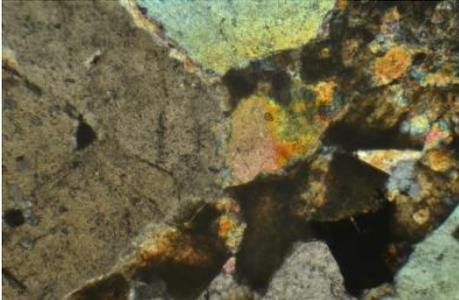
A) Grãos de Feldspatos porfirítico a megaporfirítico



B) Grãos de feldspato alterados

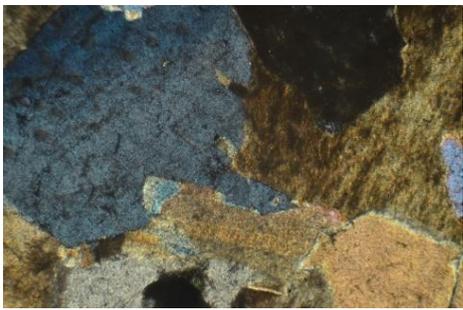
Foram coletadas duas amostras de mão, nomeadas por Amostra 1 e Amostra 2, respectivamente, em pontos estratégicos do afloramento, porção da rocha mais clara e outra mais avermelhada, para descrição macroscópica e confecção de lâminas delgadas, conforme Tabela 4-6 e Tabela 4-7.

Tabela 4-6 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida CONP (NBR 7389-1/2009).

<p>Identificação: Pedreira CONP – Amostra 1 Procedência: Pedreira Conpasul, Butiá /RS</p>	 <p>Fotografia: Amostra de mão</p>
<p>Cor: No estado seco/úmido: cinza e rosa/cinza e rosa</p>	
<p>Textura e Estrutura: A rocha apresenta textura fanerítica média, holocristalina que permite visualizar a olho nu os cristais formados na rocha. Nota-se orientação mineralógica provavelmente associada a esforços. O arranjo entre os minerais é inequigranular com pórfiros de feldspato e quartzo com tamanho, variando entre 0,2 até 2,0 cm, com tamanho médio de 0,5 cm. Cristais de quartzo quebrados e esticados, provavelmente pela ação de zonas de cisalhamento associado a cataclase. Em lâmina delgada ocorre textura cataclástica com fragmentação e microgranulação dos minerais por ação de esforço dinâmico.</p>	
<p>Estado de Alteração: Na amostra de mão observa-se processo de alteração de alguns minerais pela perda do brilho dos constituintes e mudança da cor para tonalidade amarelas e branca. A amostra pode ser classificada como alterada entre A2/A3 (DNER-IE 006/94).</p>	
<p>Composição Mineralógica: Plagioclásios (38%): incolores a amarelos à luz natural, apresentam maclas polissintéticas e por vezes, apresentam-se argilizados para epidoto. Feldspatos alcalinos (32%): à luz natural ocorrem em tons de amarelo e não são pleocróicos. Apresentam relevo e baixo, com intercrescimento peritítico. Quartzos (25%): minerais incolores a luz natural, baixa birrefringência, com bordas quebradas e extinção ondulante. Anfibólios (3%): minerais marrons com clivagens bem marcadas, pleocroísmo de marrom escuro a claro, ocorrem isolados e dispersos na matriz. Apresentam-se alterados para clorita; Minerais opacos (2%): ocorrem em geral, equidimensionais e subédricos. Classificadas como magnetita e ilmenita</p>  <p>Fotomicrografia – Mostra textura cataclástica (LN 2x4/01)</p>	
<p>Classificação Petrográfica: <i>Monzogranito pórfiro</i></p>	

Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)

Tabela 4-7 - Descrição petrográfica da Amostra 02 da jazida CONP (NBR 7389-1/2009).

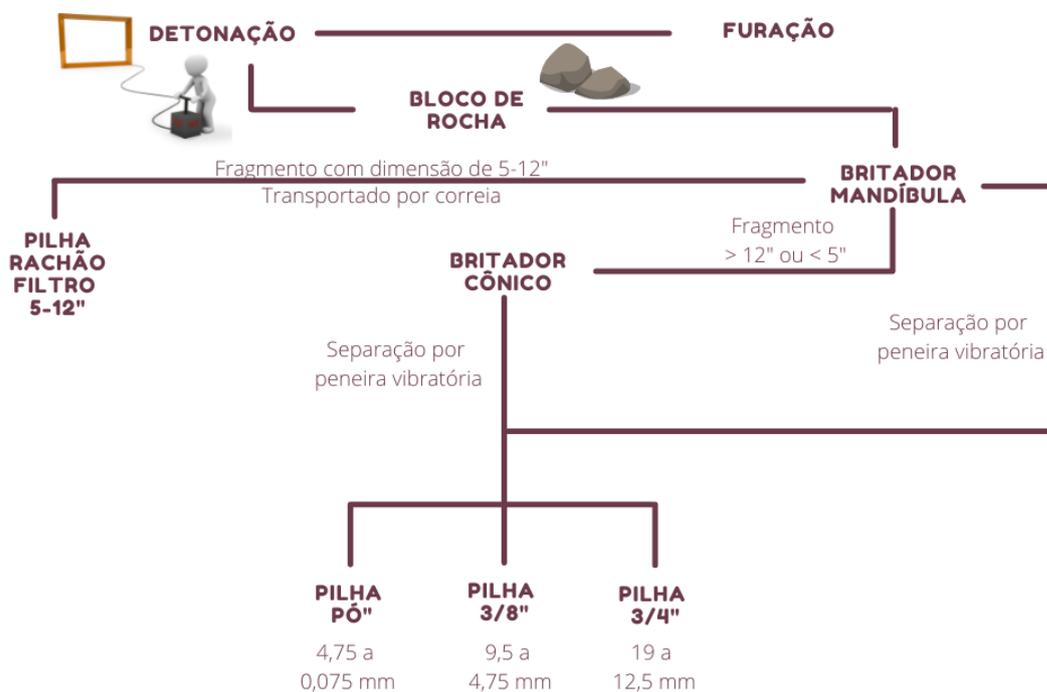
<p>Identificação: Pedreira CONP – Amostra 2 Procedência: Pedreira Conpasul, Butiá /RS</p>	 <p>Fotografia: Amostra de mão</p>
<p>Cor: No estado seco/úmido: vermelha / vermelha</p>	
<p>Textura e Estrutura: Rocha fanerítica média, com constituintes visíveis a olho nu, os minerais variam de 0,5 a 10 mm. Ao microscópico observa-se textura equigranular-hipidiomófica e poiquilitica pela intrusão de biotita e plagioclásio em feldspatos. Esforços deformacionais são visíveis dada a orientação da biotita e presença de quartzos e feldspatos com bordas quebradas.</p>	
<p>Estado de Alteração: Na amostra de mão não se observa alteração. Ao microscópico os minerais primários apresentam-se levemente alterados por hidrotermalismo, pela presença de clorita, epidotos e sericita. A amostra pode ser classificada como ligeiramente alterada A2 (DNER-IE 006/94).</p>	
<p>Composição Mineralógica: Feldspatos (42%): a luz natural, ocorrem em tons de amarelo e não são pleocróicos, com baixo relevo e birrefringência com cores entre cinza e amarelo claro. Quartzos (30%): são anédrico, incolores, fraturados e por vezes com bordas serrilhadas e apresentam extinção ondulante. Plagioclásios (23%): ocorrem incolor a luz natural e cinza a amarelo a luz polarizada. A forma é de prismas longos com presença de maclas polissintéticas. Anfibólios (3%): de cor castanha com baixo pleocroísmo, alguns com bordas corroídas e alterados para cloritas. Minerais opacos (2%): apresentam formas subédricas a anédricas com bordas oxidadas. Classificadas como magnetita e ilmenita</p>	
 <p>Fotomicrografia – Mostra textura cataclástica (LN 2x4/01)</p>	
<p>Classificação Petrográfica: <i>Sienogranito</i></p>	
<p>Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)</p>	

Na jazida Conpasul foram coletadas duas amostras que apresentam diferença na coloração, composição mineralógica e textural, sendo classificadas como monzogranito pórfiro

(Amostra 1) e sienogranito (Amostra 2). A rocha monzogranito pórfiro, majoritária na pedreira, apresenta textura fanerítica com arranjo entre os minerais inequigranular com pórfiros de feldspato e quartzo com tamanho variando entre 0,2 até 20 mm. Por sua vez, o sienogranito apresenta textura equigranular hipidiomórfica, com minerais variando entre 0,5 a 10 mm. Porém, a rocha monzogranito pórfiro está mais alterada que a rocha sienogranito, com perda do brilho e mudança de cor de minerais variando para amarelo e branco, que são perceptíveis a olho nu. Além disso, no monzogranito pórfiro predomina plagioclásio, feldspato alcalino e quartzo, enquanto no sienogranito, feldspato, quartzo e plagioclásio. Entretanto, embora ter sido identificado e caracterizado duas rochas com composição diferentes na pedreira, as pedras britadas possuem composições homogêneas da rocha monzogranito pórfiro, isso demonstra que todo o material da pedreira é britado em acordo com um certo critério de seleção.

Na pedreira, há instalada uma planta de britagem. O fluxograma na Figura 4-12 exemplifica a planta de britagem da pedreira Conpasul.

Figura 4-12 - Fluxograma da planta de britagem da Pedreira Conpasul.



O processo de beneficiamento consiste em uma etapa de furação e detonação, sendo que a fragmentação dos blocos é realizada em duas etapas de britagem (1) primária, realizada por um britador de mandíbula onde o material com tamanho 5-12", passando pelo primeiro conjunto de peneiras vibratórias, é transportado para pilha rachão filtro e, material inferior ou superior a

esse tamanho, volta para a correia do retorno. Nesta etapa, o material passa por um segundo conjunto de peneiras vibratórias e, caso o agregado já apresente dimensões referente a brita 2, 1 ou 0, é direcionado para essas pilhas, caso contrário, o material é encaminhado para o britador secundário; (2) secundária, realizado por britador do tipo cone, o material retorna para a correia de retorno e passar novamente pelo segundo conjunto de peneiras vibratórias, para separar o agregado nas três dimensões referente a brita 2,1 ou 0.

4.1.5 Pedreira Eldorado (ELD)

As rochas de origem granítica da Pedreira de Edorado, localizada na cidade de Eldorado do Sul – RS, pertencem ao Batólito de Pelotas, Suíte Intrusiva Erval (CPRM,2014). A pedreira apresenta três bancadas e, assim como as demais jazidas, a lavra se dá a céu aberto. A bancada superior do maciço rochoso apresenta grau elevado de alteração (porção mais restrita) devido ao processo de intemperização, mais acentuado, marcado pela coloração amarelada da rocha. Na porção inferior, zona bastante fraturada, foram constatadas fraturas preenchidas por argilominerais, oriundos da alteração da própria rocha de origem (Figura 4-13) assim como a oxidação se alguns minerais primários, decorrência da percolação da água por essas fraturas.

Figura 4-13 - Vista geral da jazida Eldorado evidenciando zona alterada (amarelo).



Ressalta-se que, na porção inferior do maciço, foi observada uma rocha com aspecto semelhante à descrita na jazida CONP, diferente da rocha subjacente, com coloração mais clara

e com feldspato incipiente, como também, veios com espessura variando de milimétrica a centimétrica preenchidos por quartzo bem formados, conforme apresentado na Figura 4-14.

Figura 4-14 - Frente de lavra com presença de zonas de falha e fraturas, além de veios preenchidos por quartzo.



O maciço é composto por rochas com textura predominantemente fanerítica inequigranular porfírica, com grãos grossos (cerca de 1 cm). A estrutura é maciça com presença de fraturas ao longo de toda pedreira. Por conseguinte, a rocha apresenta-se pouco alterada, com exceção de algumas porções junto às zonas de falhas.

Para a descrição e confecção de lâminas, foram coletadas amostras ao longo da porção inferior do maciço, tomando o cuidado para, especificamente nesta pedreira, coletar rochas sãs e mais alteradas, visto que, muitas vezes, não há separação desses materiais, na etapa de britagem. As amostras foram nomeadas por Amostra 1 e Amostra 2, e descritas nas Tabela 4-8 e Tabela 4-9, respectivamente.

Tabela 4-8 - Descrição petrográfica da Amostra 1 da jazida ELD (NBR 7389-1/2009).

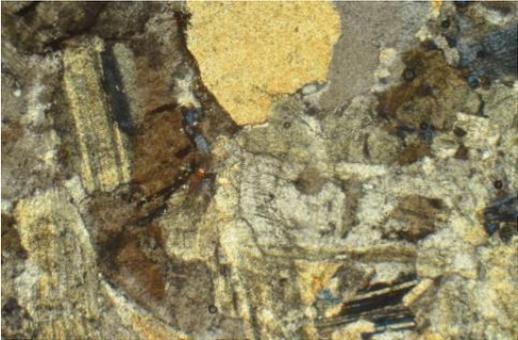
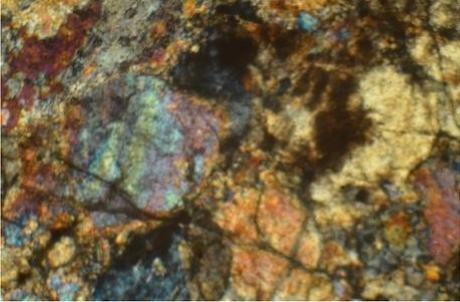
<p>Identificação: Pedreira ELD – Amostra 1 Procedência: Pedreira Eldorado, Eldorado/RS</p>	 <p>Fotografia: Amostra de mão</p>
<p>Cor: No estado seco/úmido: vermelha / vermelha</p>	
<p>Textura e Estrutura: Rocha fanerítica média, com constituintes visíveis a olho nu, os minerais variam de 0,5 a 0,8 mm. Ao microscópico observa-se textura equigranular-hipidiomófica e poiquilitica pela intrusão de biotita e plagioclásio em feldspato. Esforços deformacionais são visíveis dada a orientação da biotita e presença de quartzo e feldspato com bordas quebradas.</p>	
<p>Estado de Alteração: Na amostra de mão não se observa alteração. Ao microscópico os minerais primários apresentam-se levemente alterados por hidrotermalismo, pela presença de clorita, epidotos e sericita. A amostra pode ser classificada como ligeiramente alterada A2 (DNER-IE 006/94).</p>	
<p>Composição Mineralógica: Feldspatos (40%): à luz natural ocorrem em tons de amarelo, não pleocróicos. Baixo relevo e birrefringência com cores entre cinza e amarelo claro. A forma é de prismas subédricos. Quartzos (35%): ocorrem predominantemente anédricos, incolores, fraturados e por vezes com bordas serrilhadas. Plagioclásios (20%): ocorrem incolores à luz natural e cinza a amarelo a luz polarizada. A forma é de prisma longos, com presença de maclas polissintéticas. Anfibólios (3%): cor castanha e com pleocroísmo de amarelo a castanho, alguns com borda corroída, às vezes alterados para cloritas. Minerais opacos (2%): ocorrem em geral, equidimensionais e subédricos. Classificadas como magnetita e ilmenita</p>	
 <p>Fotomicrografia – Lâmina petrográfica à luz polarizada mostrando quartzo (em cinza), plagioclásio prismático (cinza) e biotita (marrom) (LN 2x4/01).</p>	
<p>Classificação Petrográfica: <i>Sienogranito</i></p>	
<p>Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)</p>	

Tabela 4-9 - Descrição petrográfica da Amostra 2 da jazida ELD (NBR 7389-1/2009).

Identificação: Pedreira ELD – Amostra 2 Procedência: Pedreira Eldorado, Eldorado/RS	 Fotografia: Amostra de mão
Cor: No estado seco/úmido: vermelha / vermelha	
Textura e Estrutura: Rocha apresenta textura fanerítica média, com constituintes visíveis a olho nu, os minerais variam de 0,3 a 0,7 mm. O arranjo entre os minerais é inequigranular com pórfiros de feldspato e quartzo. Em lâmina delgada ocorre textura cataclástica com fragmentação e microgranulação dos minerais por ação de esforço dinâmico.	
Estado de Alteração: Na amostra de mão observa-se processo de alteração de alguns minerais pela perda do brilho dos constituintes e mudança da cor para tonalidade amarelas e branca. Ao microscópico os minerais primários apresentam-se levemente alterados por hidrotermalismo, pela presença de clorita, epidotos e sericita, além de concentrações ferruginosas nos planos de clivagens dos minerais de piroxênios. A amostra pode ser classificada como alterada entre A2/A3 (DNER-IE 006/94).	
Composição Mineralógica: Feldspatos (34%): à luz natural ocorrem em tons de amarelo e não são pleocróicos. Relevo baixo e birrefringência com cores entre o cinza e o amarelo claro. As formas são de prismas subédricos. Quartzos (30%): ocorrem predominantemente anédricos, incolores, fraturados e por vezes com bordas serrilhadas. Plagioclásios (23%): ocorrem incolor a luz natural e cinza a amarelo a luz polarizada. Com forma em prismas longos e marcados pela maclas polissintéticas. Piroxênios (5%): presente como fenocristais, apresentam concentrações ferruginosas em seus planos de clivagem, encontram-se microfraturados com grau de alteração médio a alto, por vezes alterados para hornblenda. Biotitas (5%): presente como fenocristais, de cor castanha e com pleocroísmo de amarelo a castanho, alguns com borda corroída, marcados por oxidação e argilização. Minerais opacos (3%): ocorrem em geral, subédricos a anédricos. Classificadas como magnetita e ilmenita	
 Fotomicrografia – Mostra porções sem alteração associada ao quartzo e porções bem alteradas pela argilização em arranjo equigranular-hepidiomófico (LN 2x4/01).	
Classificação Petrográfica: Sienogranito	
Propriedades físicos mecânicas: Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 – DNER-IE 006/94)	

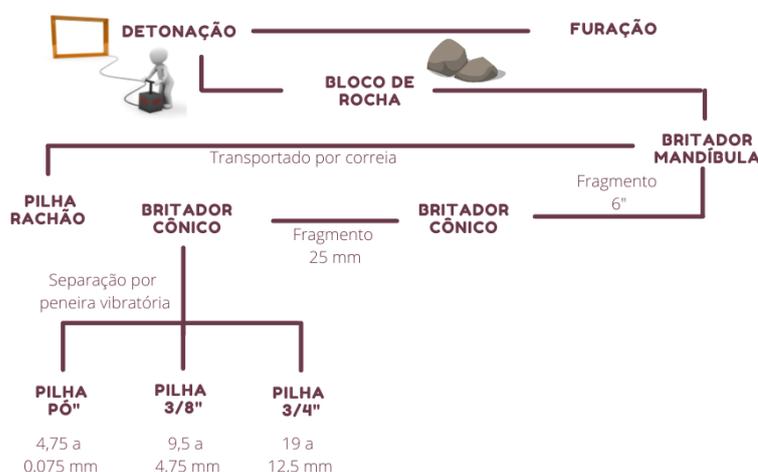
Da pedreira Eldorado, as duas amostras caracterizadas trata-se de sienogranito, entretanto, o que as diferenciam entre si, além da composição mineralógica e textural, é o grau

de alteração. O sienogranito da Amostra 1, apresenta textura equigranular hipidiomórfica, com os minerais variando entre 0,5 a 0,8 mm, já na Amostra 2, o arranjo entre os minerais é inequigranular com pórfiros de feldspato e quartzo, com minerais variando de 0,3 a 0,8 mm. Além disso, a alteração observada na Amostra 1 foi apenas em lâmina, enquanto, para a Amostra 2, a alteração é observada tanto na amostra de mão quanto em lâmina, através das concentrações ferruginosas nos planos de clivagens dos minerais de piroxênios.

Entretanto, o material britado, referente as pilhas 3/4", 3/8" e pó, apresentam composição heterogênea, ocorre tanto sienogranito referente a Amostra 1, quanto da Amostra 2, isso demonstra que todo o material da pedreira é britado sem nenhum critério de seleção.

Nesta pedreira a britagem é realizada em três etapas, sendo: (1) primária, realizada por um britador de mandíbula, o fragmento de rocha é reduzido até 6"; (2) secundária e (3) terciária, realizado por britador do tipo cônico. Na britagem secundária, o fragmento de rocha é reduzido até a dimensão de 25 mm, enquanto, na britagem terciária, o material apresenta dimensões inferiores a 12". O controle das dimensões da rocha é efetuado por meio de peneiras vibratórias presentes no fluxo de britagem.

Figura 4-15 - Fluxograma da planta de britagem da Pedreira Eldorado.



4.1.6 Síntese das análises

Por intermédio de visita a campo, foi constatado que as cinco pedreiras estudadas apresentam estruturas geológicas bem marcadas como falhas, fraturas ou dobras. Esse tipo de estrutura é um facilitador à percolação de água da chuva no maciço, podendo resultar em alteração mais proeminente das rochas.

As jazidas cujas rochas pertencem ao Escudo Sul Rio Grandense e fazem parte do Batólito de Pelotas, MIN, CONP e ELD, apresentam diferenças como variações texturais, coloração e/tonalidade, proporção dos minerais máficos e félsicos que, no geral, se reflete, nas propriedades químicas e mecânicas destas rochas. Essas variações são resultantes da diferenciação magmática, podendo estar relacionadas com a cristalização fracionada (forma como o magma cristalizou) e com sua localização no Batólito como por exemplo em sua borda o que confere uma foliação do tipo magmática, mesmo que incipiente, ao maciço. Salienta-se que as jazidas CONP e ELD, situadas a uma distância aproximadamente de 50 km, apresentaram, pontualmente, semelhança petrográfica, com diminuição gradativa dos tamanhos dos cristais de feldspatos (base para o topo), nas bancadas inferiores dessas jazidas.

As jazidas Fragosos e Vogelsanger, situadas aproximadamente 75 km uma da outra, pertencem a formação Gnaiss Granulítico Luis Alves lavram rochas metamórficas, cujo protólito é de origem granítica, porém foram submetidos a diferentes intensidades de metamorfismo e deformação que resultou em rochas com diferentes características texturais, estruturais e mineralógica. As rochas presentes na jazida Fragosos, apresentam baixo grau metamórfico onde observa-se textura e estruturas da rocha de origem (granito) preservada, enquanto, na pedreira Vogelsanger, a rocha não apresenta mais textura da rocha de origem, embora, seu protólito seja o mesmo da jazida Fragosos. Neste caso, devido aos processos de metamorfismo, alta pressão e temperatura, resultaram em rocha com estrutura bandadas ricas em quartzos e feldspatos separadas de camadas micáceas ou máficas.

Importante ressaltar que, embora algumas pedreiras tenham apresentado porções com rochas de coloração, textura e composição mineral distintas, não foi possível identificar e distinguir a porcentagem presente de cada tipo de rocha na composição final do material após britagem. A exceção foi a pedreira Fragosos, que devido a presença do contato geológico, optou-se por realizar a caracterização de cada tipo litológico separadamente.

É notório que todas as diferenças minerais, texturais e estruturais observadas em cada jazida, interferem nos resultados físico e químico do material explorado. Portanto, essa etapa é de grande relevância no estudo de caracterização do agregado mineral. Entender e caracterizar o macro para poder compreender os resultados obtidos a partir do micro. Ademais, a descrição mineralógica passa a servir como um guia para a compreensão da composição química da rocha quando não existe a possibilidade da realização de uma análise química. Assim, na Tabela 4-10 são apresentadas as principais propriedades petrográficas das jazidas estudadas, assim como, a descrição da composição mineralógica observada nesta análise.

Tabela 4-10 - Compilação da análise petrográfica.

Propriedades Petrográficas		FRAG-M	FRAG-F	VOG	MIN	CONP	ELD
Coloração		Mesocrática Preta a verde escuro	Leucocrática Cinza claro	Mesocrática Cinza a preta	Leucocrática Vermelho a rosada	Leucocrática Rosa acinzentada	Leucocrática Rosa avermelhado
Estrutura		Foliação (bandamento)	Foliação (bandamento)	Foliação (bandamento)	Foliação do tipo magmática	Foliação do tipo magmática	Maciça a leve foliação magmática
Textura		Catáclase	Poiquiloblástica	Cataclástica/ Lepidoblástica	Inequigranular Porfirítica	Megaporfirítica	Porfirítica
Granulação -Variação (mm) - Predominância (mm)		Média 1-4 2	Média 1-4 2	Média a grossa 3 a 15 5	Média a Grossa 2 a 10 5	Grossa a porfirítica 2 a 20 15	Média a grossa 3 a 15 5
Estado microfissural		Ne	Ne	Ne	Ne	Intergranular	Intergranular
Minerais Essenciais	Plagioclásio (%)	32	17	32	22	30	20
	Feldspato (%)	-	43	14	45	40	40
	Biotita (%)	7	5	18	3	-	-
	Quartzo (%)	10	25	25	25	25	35
	Piroxênio e Anfibólio	48	8	8	-	3	3
Grau de cristalização		holocristalina	holocristalina	holocristalina	holocristalina	holocristalina	holocristalina
Alteração Mineral		A1	A1	A1	A1	A1 e A2	A1 e A2
Classificação petrográfica		Rocha Metamórfica Granulito Máfico (dióritico)	Rocha Metamórfica Granulito Félsico (granítico)	Rocha Metamórfica Biotita Gnaisses	Rocha Ígnea Plutônica Sienogranito e monzogranítico	Rocha Ígnea Plutônica Monzogranito pórfiro	Rocha Ígnea Plutônica Sienogranítico

Ne = não identificado

Fonte: Autora

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

No presente capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados para avaliar as propriedades tecnológicas de agregados, sendo eles: análise granulométrica, índices físicos e massa unitária, índice de forma, resistência mecânica, equivalente de areia, durabilidade e sanidade, por fim, afinidade ao ligante asfáltico.

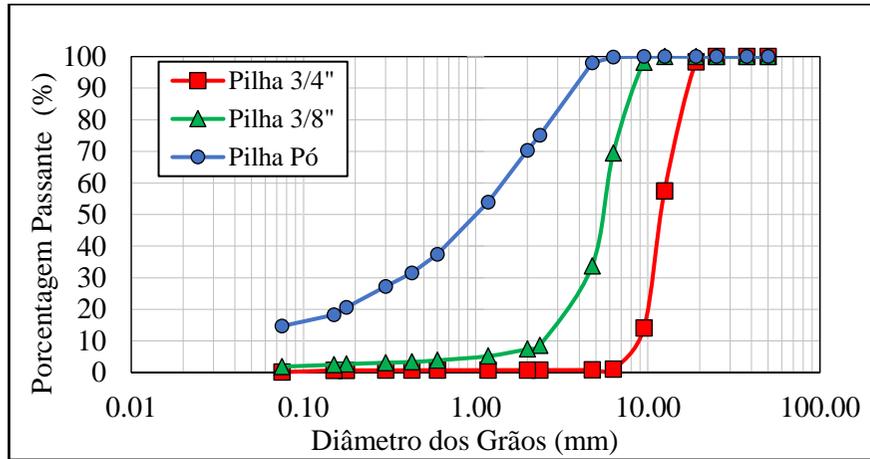
4.2.1 Análise granulométrica

As rochas, no geral, quando utilizadas em pavimentos betuminosos, lastros de ferrovias, concreto de cimento Portland e enrocamentos, são usadas na forma granular. Diversos autores apontam em seus estudos que os principais fatores que interferem nas propriedades de forma de agregados são as características da rocha de origem e o modo como as partículas são reduzidas, ou seja, os parâmetros utilizados nos processos de britagem (BERN, 1997; BRIGGS e EVERTSSON, 1998; BÉRUBÉ, 2001; BOUQUETY et al., 2007; RAJAN, SINGH, 2017).

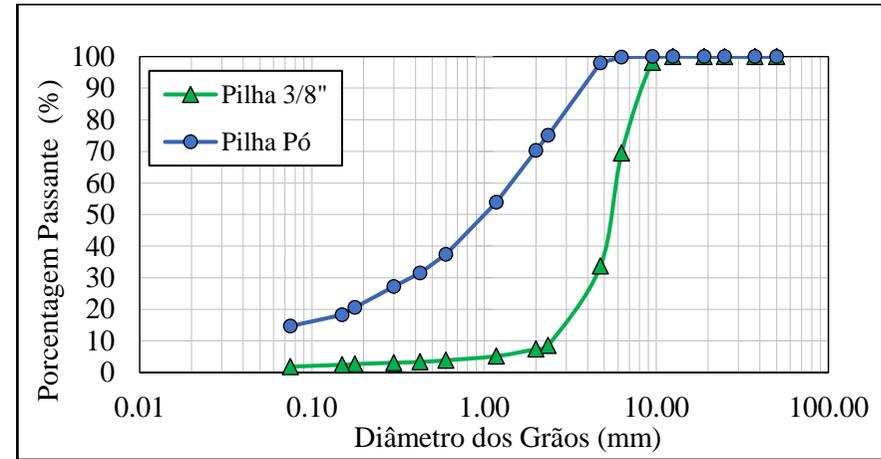
Na pavimentação, a distribuição granulométrica do agregado influencia na rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, entre outras características (BERNUCCI et al., 2007). Já para concreto de cimento Portland, Neville (1997) aponta que a granulometria se torna indiretamente responsável pela trabalhabilidade, que por consequência tem influência sob a demanda de água, segregação, exsudação, facilidade de lançamento e acabamento do concreto.

Tendo em vista a importância da caracterização do agregado frente a análise granulométrica, na presente pesquisa, o peneiramento foi realizado separadamente para cada pilha das amostras foram coletadas. A Figura 4-16 e a Figura 4-17 apresentam as curvas granulométricas das jazidas estudadas. É possível observar que, referente a Pilha $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ ", quase todas as pedreiras apresentaram graduação aberta, ou seja, exibem distribuição granulométrica contínua, porém com material fino (menor que 0,075 mm) insuficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores, consequentemente, maior será o volume de vazios. A única exceção refere-se ao material da pedreira FRAG-F (granulito félsico), para as duas pilhas ensaiadas (Pilha $\frac{3}{8}$ " e pó), que indicam graduação densa, assim como, para as demais "Pilha Pó" das jazidas ensaiadas (FRAG-M, VOG, MIN, CONP e ELD). Ou seja, exibem distribuição granulométrica contínua, próxima a densidade máxima.

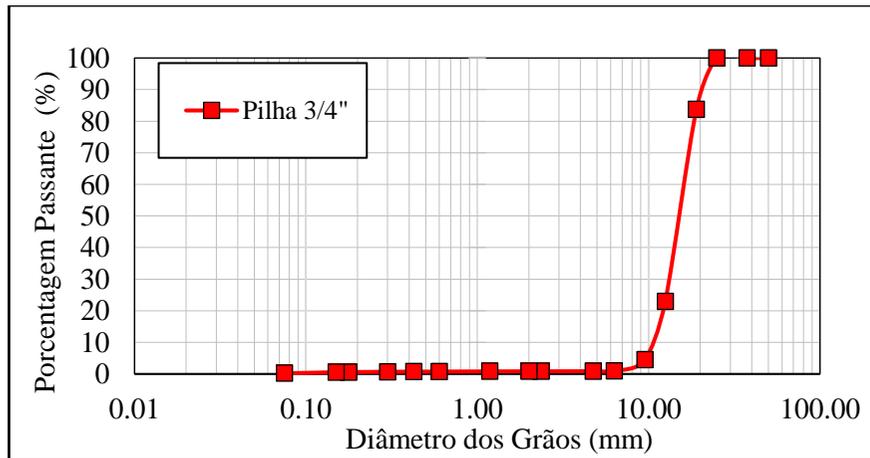
Figura 4-16 - Curva granulométrica: A) Pedreira Fragosos (FRAG-M); B) Contato da Pedreira Fragosos (FRAG-F); C) Material da primeira britagem da pedreira Fragosos (FRAG-N); D) Pedreira Vogelsanger (VOG).



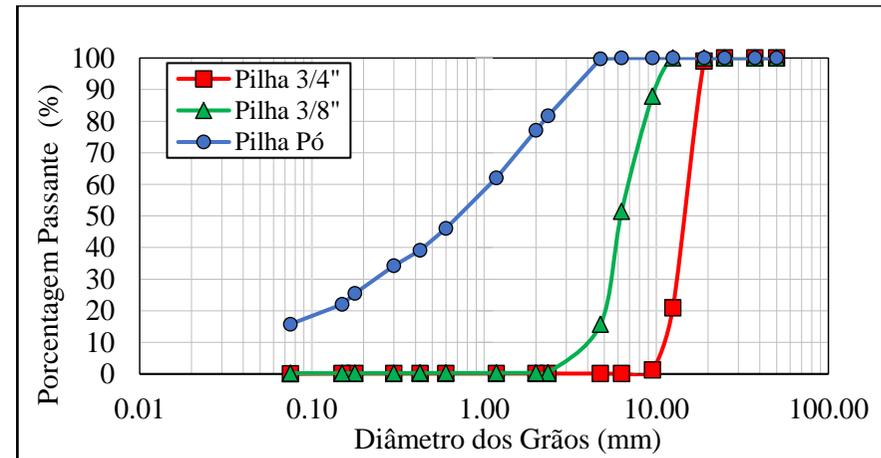
A) FRAG - M(Granulito Máfico)



B) FRAG-F (Granulito Félsico)

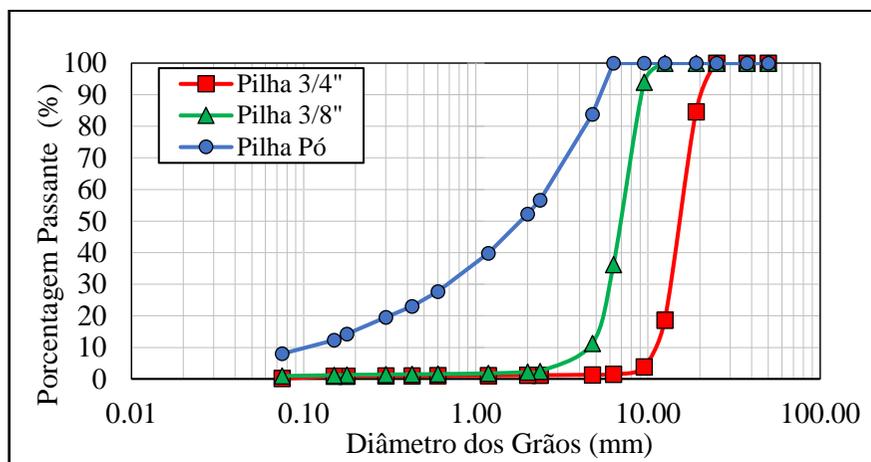


C) FRAG-N(Granulito Máfico)

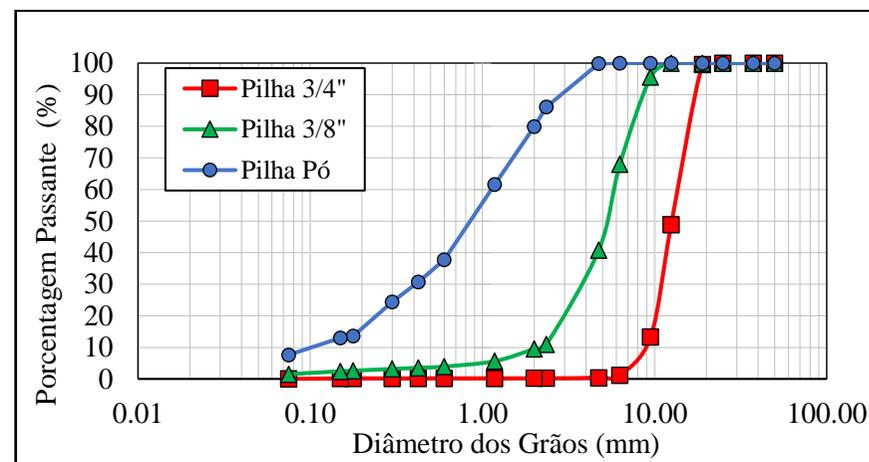


D) VOG(Biotita Gnaiss)

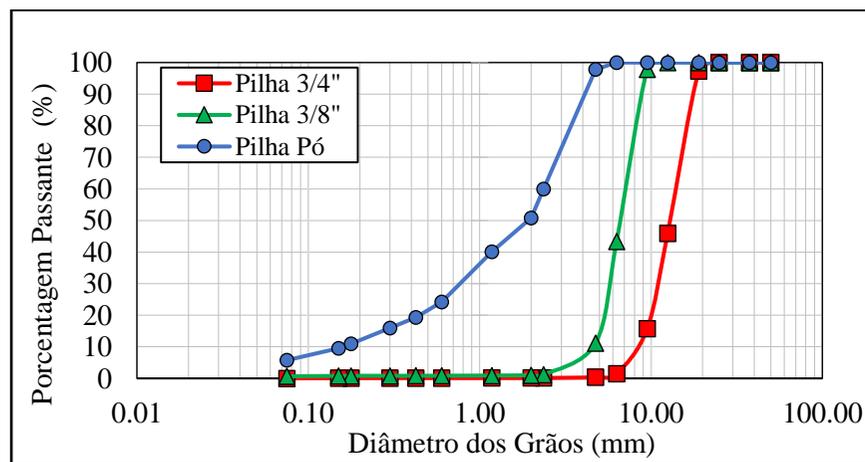
Figura 4-17 - Curva granulométrica: A) Pedreira Minersul (MIN) B) Pedreira Conpasul (CONP); C) Pedreira Eldorado (ELD).



A) MIN(Sienogranito)



B) CONP (Monzogranito pórfiro)



C) ELD (Sienogranito)

Outros dois parâmetros analisados apresentados na Tabela 4-11 foram o coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc). Por meio do Cu é possível avaliar a distribuição do tamanho das partículas, sendo que, valores inferiores a 5 são denominados uniformes e valores superiores a 15, desuniforme e, por fim, valores dentro deste intervalo (5 e 15), medianamente uniforme. Já o Cc avalia a graduação do material, sendo que, valores entre 1 e 3, é considerado como bem graduado e valores superiores a 3, mal graduado.

Tabela 4-11 - Coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (CC). Sendo: Uni. (uniforme), Desu. (desuniforme); Desc. (descontínua); BG (bem graduado); MU (médio uniforme).

Pilha	Parâmetro	FRAG-M	FRAG-F	FRAG-N	VOG	MIN	CONP	ELD
Pilha 3/4"	D10	9	-	10,1	12,5	11	9	8,5
	D30	10,1	-	12,5	14	16	11,5	11
	D60	12,5	-	17,5	16	17,5	15	16
	Cu	1,39 Uni.	-	1,73 Uni.	1,28 Uni.	1,59 Uni.	1,67 Uni.	1,88 Uni.
	Cc	0,91 Desc.	-	0,88 Desc.	0,98 Desc.	1,33 BG	0,98 Desc.	0,89 Desc.
Pilha 3/8"	D10	2,36	0,8	-	4	3,5	2	4,36
	D30	4,5	2,95	-	5,5	6	3,75	5,95
	D60	5	5	-	7	7,2	5,8	7
	Cu	2,12 Uni.	6,25 MU	-	1,75 Uni.	2,06 Uni.	2,9 Uni.	1,61 Uni.
	Cc	1,72 BG	2,18 BG	-	1,08 BG	1,43 BG	1,21 BG	1,16 BG
Pilha Pó	D10	-	0,25	-	-	0,1	0,08	0,15
	D30	0,43	0,9	-	0,25	0,6	0,43	0,75
	D60	1,18	2	-	1,18	2,36	1,18	2,36
	Cu	-	8,00 MU	-	-	23,6 Desu.	14,75 MU	15,73 Desu.
	Cc	-	1,62 BG	-	-	1,53 BG	1,96 BG	1,59 BG

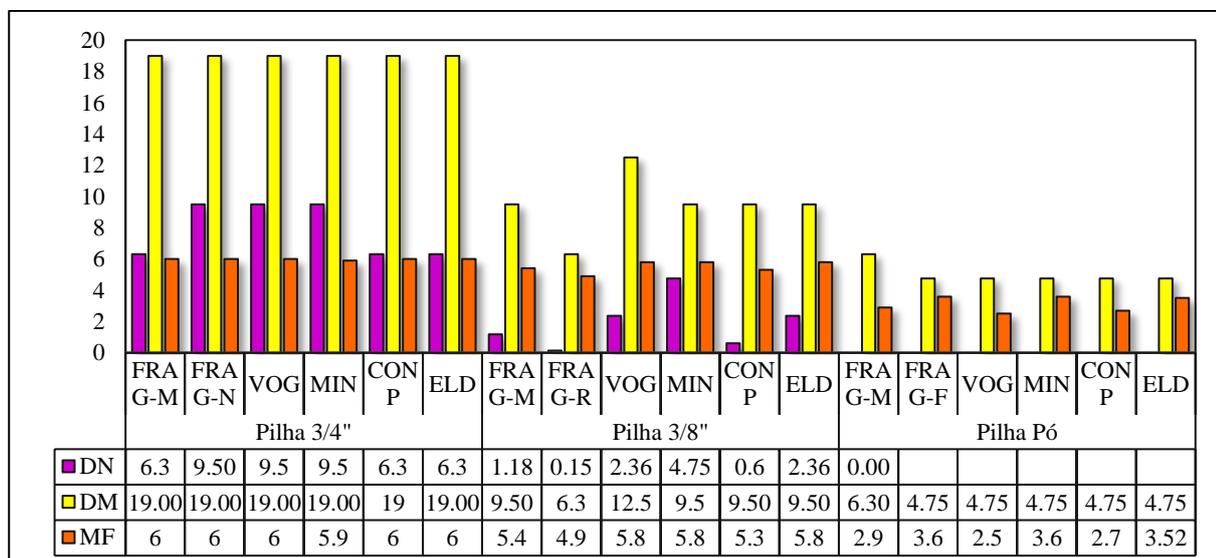
Para a Pilha 3/4" observa-se que, apenas a jazida MIN apresenta material com características "bem graduado", ou seja, dentre as partículas maiores, existe uma quantidade de partículas com tamanho menores que permitem que os espaços vazios sejam preenchidos por

esse material, resultando maior intertravamento entre os agregados que não é observado para as demais jazidas. Já, para as demais pilhas (3/8" e pó), todas as jazidas apresentaram características de material bem graduado, porém, variaram em relação a uniformidade, ou seja, para a pilha 3/8", todas as pedreiras apresentam agregados uniforme, porém, para a pilha pó, as jazidas MIN e ELD tendem a graduação desuniforme, enquanto as demais (FRAG-F e CONP), medianamente uniforme.

Além da distribuição do tamanho dos grãos, foi analisada a dimensão máxima característica dos fragmentos, módulo de finura e dimensões nominais. Segundo Frazão (2002) a dimensão máxima (DM) correspondente à abertura da malha na qual ocorre 5% do material retido acumulado, ou valor imediatamente inferior. Já o módulo de finura (MF) é um número correspondente à soma da porcentagem retida acumulada dividida por 100, por fim, a dimensão nominal (DN) corresponde a porcentagem retida igual ou superior a 95%.

Conforme foi observado na curva granulométrica, tanto o material retido na Pilha 3/4" quanto na Pilha 3/8", ambos apresentaram uma graduação aberta, ou seja, contém partículas grossas, com ausência de finos, o que justifica os valores encontrados para ambas as pilhas em relação ao DM e DN (Figura 4-18). O MF não variou entre as pilhas 3/4" e 3/8", corroborando também com as discussões acima. Entretanto, para Pilha Pó, esse fator variou entre as jazidas. As pedreiras FRAG-M, VOG e CONP apresentam módulo de finura médio, com valores variando entre 2, 9, 2,5 e 2,7, respectivamente, enquanto, as pedreiras FRAG-F, MIN e ELD, mostram módulo de finura grossa (3,6, 3,6 e 3,52, respectivamente).

Figura 4-18 - Análise da granulometria das pilhas 3/4", 3/8" e Pó em relação a DM, DN e MF.



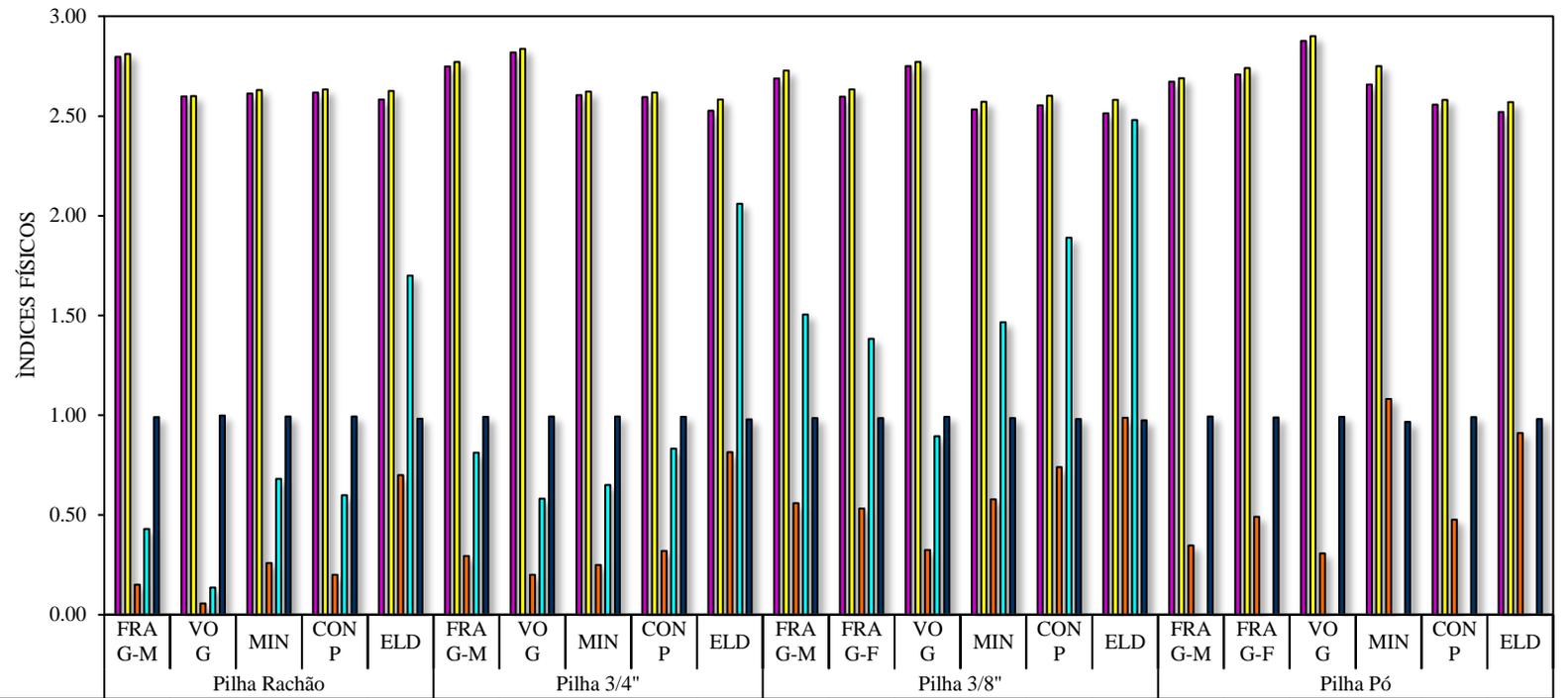
4.2.2 Índices físicos e massa unitária

Os resultados dos ensaios de índices físicos, massa específica aparente (M.E.A), massa específica real (M.E.R), porosidade aparente e absorção de água, para as cinco jazidas estudadas referentes as Pilhas 3/4", 3/8", Pó e Rachão encontram-se expressos na Figura 4-19.

As propriedades físicas e químicas dos agregados são controladas pela composição mineralógica, pelo grau de alteração e pela textura das partículas minerais (SIMS e BROWN, 1998). No geral, os dados de M.E.A se mostram compatíveis com os tipos de rochas estudadas. A proporção de minerais ferromagnesianos, que são minerais de alta densidade, como piroxênio, anfibólio e biotita, explica os valores superiores de M.E.A dos granulitos máficos e biotita gnaisses, das jazidas FRAG-M e VOG, respectivamente. Por sua vez, rochas com proporção de quartzo e feldspato elevado, tende apresentar massa específica inferior, conforme pode ser observado pelas jazidas MIN, CONP e ELD.

Nota-se que, grupos com mesma classificação petrográfica, com semelhante composição mineralógica apresentaram padrão de comportamento distintos para os índices físicos. Os agregados da pedreira ELD (sienogranito) exibem absorção superior em comparação aos agregados da pedreira MIN (sienogranito). De acordo com Frazão (1993), a absorção aumenta com o grau de alteração e, a massa específica diminui, o que justifica os índices físicos diferentes para as jazidas CONP e ELD. Além disso, a absorção e porosidade elevada da jazida ELD (sienogranito) em comparação as demais rochas está associada a presença de microfraturas existente em alguns minerais, conforme descrito na análise petrográfica.

Figura 4-19 - Índices físicos das pilhas rachão, 3/4", 3/8" e Pó.



	Pilha Rachão					Pilha 3/4"					Pilha 3/8"					Pilha Pó						
	FRA G-M	VO G	MIN	CON P	ELD	FRA G-M	VO G	MIN	CON P	ELD	FRA G-M	FRA G-F	VO G	MIN	CON P	ELD	FRA G-M	FRA G-F	VO G	MIN	CON P	ELD
■ M.E.A (g/cm³)	2.80	2.60	2.61	2.62	2.58	2.75	2.82	2.61	2.60	2.53	2.69	2.60	2.75	2.53	2.55	2.51	2.67	2.71	2.88	2.66	2.56	2.52
■ M.E.R (g/cm³)	2.81	2.60	2.63	2.63	2.63	2.77	2.84	2.62	2.62	2.58	2.73	2.63	2.77	2.57	2.60	2.58	2.69	2.74	2.90	2.75	2.58	2.57
■ ABSORÇÃO (%)	0.15	0.06	0.26	0.20	0.70	0.30	0.20	0.25	0.32	0.82	0.56	0.53	0.33	0.58	0.74	0.99	0.35	0.49	0.31	1.08	0.48	0.91
■ POROSIDADE (%)	0.43	0.14	0.68	0.60	1.70	0.81	0.58	0.65	0.83	2.06	1.51	1.38	0.90	1.47	1.89	2.48						
■ GRAU DE COMPACIDADE (M.E.A/M.E.R)	0.99	1.00	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.99	0.99	0.99	0.97	0.99	0.98

PEDREIRAS

De acordo com Frazão e Farjallat (1995) e a norma ASTM C 97, rochas graníticas tendem apresentar absorção de $\leq 0,4\%$ e porosidade $\leq 1\%$. Nesse sentido, para as pilhas pulmão e $\frac{3}{4}$ ", apenas a jazida ELD apresentou absorção e porosidade elevada, com valores de $0,7\%$ e $0,82\%$ para absorção e $1,7$ e $2,6\%$, para porosidade, respectivamente. Enquanto, para a pilha $\frac{3}{8}$ " e pó, todas as rochas graníticas (MIN, CONP e ELD) apresentaram valores de absorção acima do limite estabelecido.

A baixa absorção dos agregados da jazida VOG em comparação a jazida FRAG, ambas de origem metamórfica, pode estar associada a diferença na textura observada na lâmina petrográfica. A rocha granulito máficos (FRAG) em decorrência aos esforços de deformação sofrido durante a sua formação, apresenta textura cataclástica, ou seja, exibe minerais microfraturas que facilita a percolação da água por essas estruturas, o que justifica a alta absorção para esse tipo de rocha.

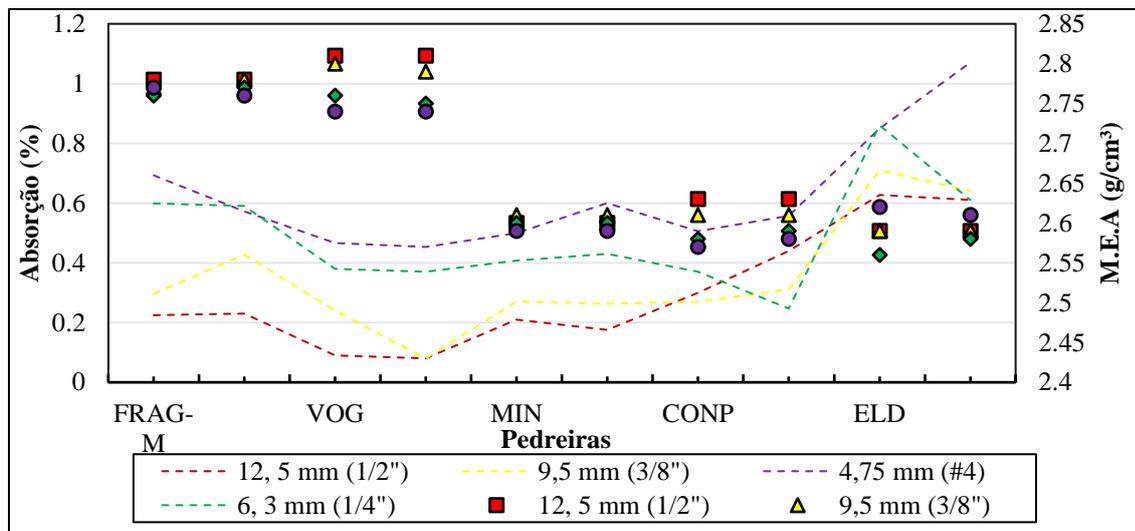
Por conseguinte, nota-se que, os valores de absorção, conforme a norma (passante na peneira $12,5$ mm e retido na peneira $4,75$ mm) tendem, no geral, apresentar absorção distinta ao analisado separadamente por fração, pois a absorção é um fator que está atrelado com o tamanho e granulação dos agregados. Nos estudos realizados por Kazi e Al – Mansur (1980), em agregados com diferentes tamanhos, esses autores concluíram que os altos valores de absorção são obtidos com o decréscimo do tamanho dos agregados.

Ao analisar a absorção das amostras ensaiadas na presente pesquisa separadas por tamanho nominal das partículas (TMN), os resultados apresentados na Figura 4-20 são análogos ao concluído pelos autores Kazi e Al – Mansur (1980).

Observa-se que a jazida ELD (sienogranito) apresentou valores altos de absorção em comparação as demais pedreiras, entretanto, para jazidas de origem metamórficas, biotita gnaiss (VOG) e granulito máficos (FRAG-M), observa-se o oposto ao descrito pela avaliação conforme a norma. Nota-se que, a absorção para os biotita gnaisses (VOG) são mais expressivos à medida que a rocha sofre processo de britagem e rebitagem, pois, o agregado menor é composto por quase que exclusivamente por minerais micáceos, cuja estrutura em folha, facilita a percolação da água que por sua vez, reflete na absorção do agregado mineral.

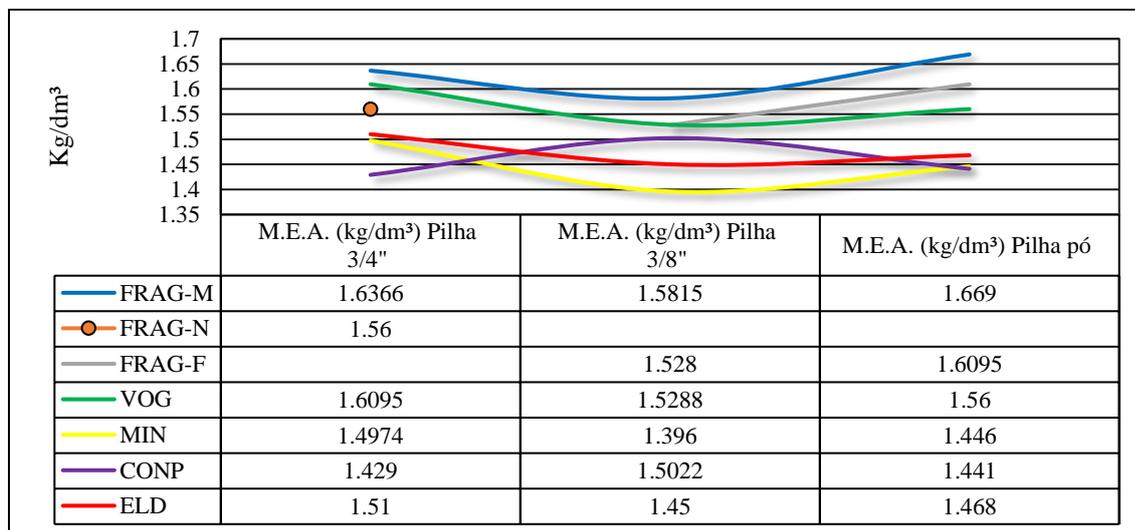
Por conseguinte, observa-se o oposto para a jazida FRAG (granulito máficos), à medida que o tamanho do agregado diminui, a textura cataclástica observada em lâmina, não é tão evidente e portanto, menor é a absorção do material.

Figura 4-20 - Absorção e M.E.A do agregado separado por fração.



Na Figura 4-21 são apresentados os resultados da M.E.A solta obtidos para as jazidas deste estudo.

Figura 4-21 - Massa específica aparente solta em acordo com as pilhas.



Observa-se que, com exceção da jazida CONP, todas seguiram a mesma tendência de resultados numa ordem decrescente, Pilha Pó, Pilha 3/4" e Pilha 3/8". Em contrapartida, a pedra CONP apresentou, maior M.E.A para Pilha 3/8", seguida pela Pilha Pó e Pilha 3/4". Esse tipo de comportamento apresentado pela jazida CONP pode estar associado a distribuição

granulométrica deste material, visto que, a quantidade de fino produzida é superior as demais pedreiras, podendo os espaços vazios que geralmente ocorre ter sido ocupado por esse material.

4.2.2.1 Síntese das análises

De modo geral, as rochas apresentam massas específicas condizentes com as respectivas litologias ensaiadas, visto que, a densidade está diretamente relacionada à composição mineralógica e ao arranjo cristalino, assim como a absorção de água está associada à sua porosidade.

A absorção e a porosidade são fatores preponderantes na relação agregado e mistura asfáltica, pois agregados que absorvem muita água, conseqüentemente, também irão absorver ligante asfáltico, fator indesejável na pavimentação. Além disso, a absorção está associada a textura e granulação dos agregados, assim como ao grau de alteração da rocha. Conforme observado, as jazidas apresentaram correlação significativa neste aspecto, ou seja, à medida que o tamanho da brita diminui, aumenta a absorção.

Por fim, cabe destaque aos resultados M.E.A solta. A jazida CONP apresentou um comportamento atípico para o respectivo ensaio, visto que, é esperado que a pilha pó apresente maior M. E.A, porém, neste caso, a pilha 3/8” apresentou o maior valor. Esse tipo de resultado pode estar atrelado à homogeneidade das amostras em relação à forma do agregado, pois, a M.E.A é obtida sem a compactação do material, correlacionando-se, assim, ao intertravamento entre os agregados e ao índice de vazios, ou seja, quanto maior o M.E.A, entende-se que maior o intertravamento e menor o índice de vazios.

4.2.3 Avaliação da forma do agregado através dos ensaios convencionais

A forma do agregado está relacionada com as características da rocha de origem e o modo como esse material foi fragmentado, ou seja, os parâmetros utilizados na etapa de britagem (BERN, 1997; BRIGGS e EVERTSSON, 1998; BÉRUBÉ, 2001; BOUQUETY et al., 2007; RAJAN e SINGH, 2017, DIÓGENES, 2018). Entende-se por forma, o conjunto de suas propriedades, que está atrelado a forma, angularidade e textura superficial. Ressalta-se que, essas propriedades, respectivamente, trata-se da relação entre as dimensões da partícula, às arestas existente e ao grau de rugosidade de sua superfície (MASAD, 2001).

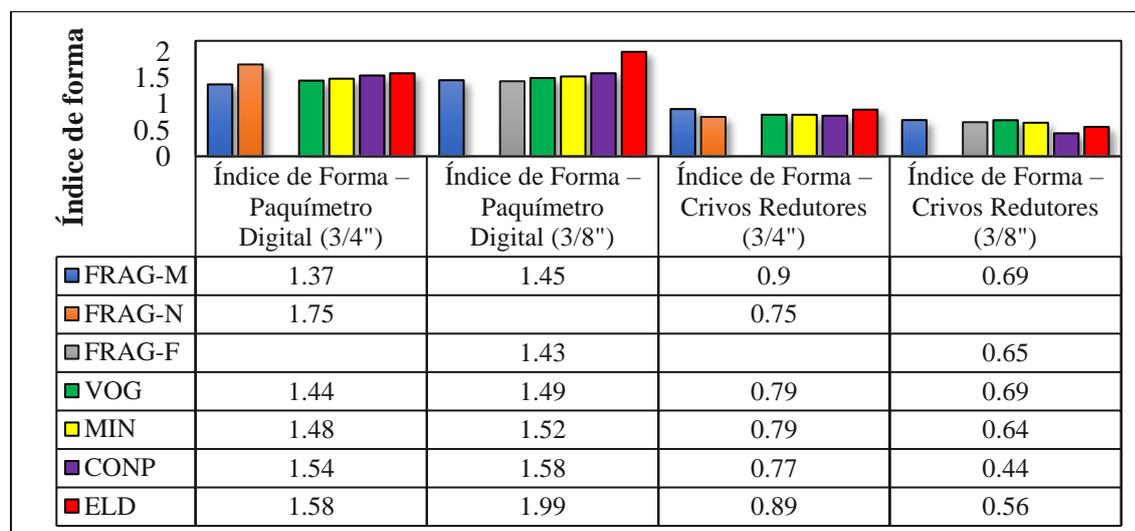
Face essa temática, na sequência serão apresentados os resultados dos ensaios designados convencionais seguindo as normas vigentes para as propriedades de forma e

lamelaridade de agregados graúdos, e angularidade dos agregados miúdos, além disso, os agregados também foram avaliados separando por fração.

4.2.3.1 Avaliação da forma dos agregados

Existem diversas normas em vigor com objetivo de avaliar a forma do agregado de acordo com cada critério estabelecido. Na Figura 4-22 são apresentados os resultados para o índice de forma por intermédio do paquímetro digital e crivos redutores. Ressalta se que, embora os ensaios tenham sido realizados com base em metodologias distintas, no geral, apresentaram coerência entre os resultados de forma. Ou seja, agregados que apresentaram no crivo redutor valores mais próximo de 1 e no paquímetro digital abaixo de 3 (limite aceitável), podem ter elevada cubicidade.

Figura 4-22 - Avaliação da forma das partículas dos agregados pelo método: paquímetro digital, crivos redutores, de acordo com as pilhas $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ ".

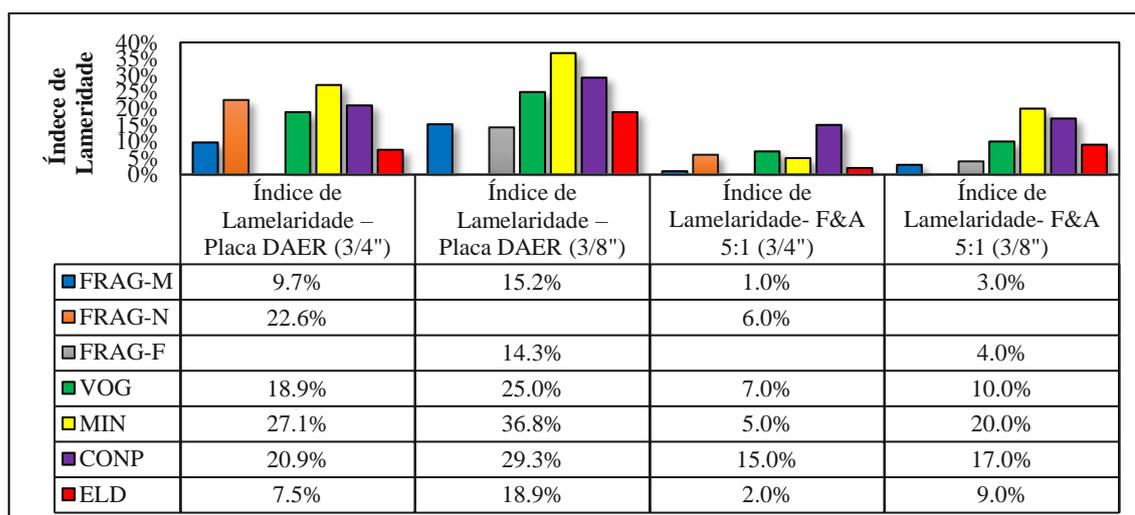


Avaliando a Figura 4-22, para as amostras oriundas das pedreiras FRAG-M (granulitos máficos) e VOG (biotita gnaiss), esperava-se menor cubicidade para estes agregados em comparação as demais pedreiras em decorrência da estrutura foliada presente nestas rochas. Entretanto, o tipo de britador e os processos de britagem influenciou na forma final do agregado. Conforme pode ser observado, o agregado FRAG-N (granulito máfico) que é material da primeira etapa de britagem desta pedreira, apresentou valores superiores tanto pelo paquímetro quanto pelo crivo em comparação a própria jazida, assim como, em relação as demais pedreiras.

No entanto, todas as jazidas permanecem dentro dos limites vigentes em ambas as normativas. Além disso, conforme já constado na literatura, as pilhas $\frac{3}{4}$ " apresentam melhor cubicidade que as pilhas $\frac{3}{8}$ ", por conseguinte, à medida que a fração diminui, maior a tendência de o agregado apresentar forma alongada e lamelar.

A Figura 4-23 apresentam os resultados da lamelaridade realizada pela placa do DAER e pelo paquímetro calípter. Como previsto, os agregados da Pilha $\frac{3}{8}$ " possuem partículas de forma alongada e lamelar superior a Pilha $\frac{3}{4}$ ", para ambas as metodologias aplicadas. No entanto, pela placa do DAER, a jazida MIN (sienogranito) e CONP (monzogranito pórfito) apresentaram partículas mais lamelares em comparação as demais jazida, principalmente em relação a ELD (sienogranito).

Figura 4-23 - Índice de lamelaridade dos agregados.



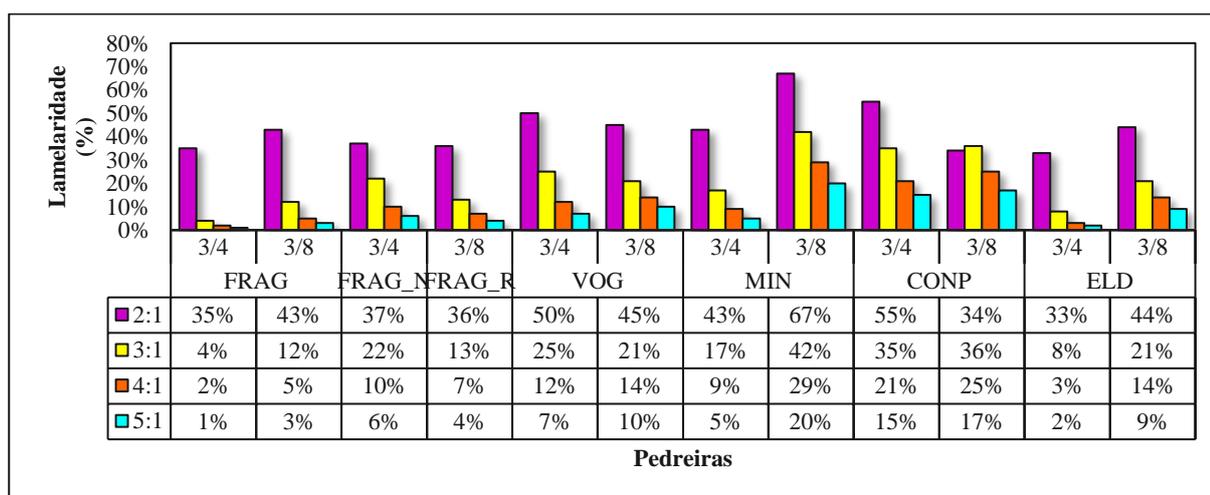
A elevada lamelaridade para esse tipo de rocha ígnea (plutônica) pode estar associada a foliação do tipo magmática representada pelo alinhamento dos minerais de feldspato observado nas duas jazidas e descritos na análise petrográfica. Da mesma forma, elevada lamelaridade da jazida VOG (biotita gnaiss) em comparação a jazida FRAG-M (granulito máfico) também está associada a estrutura foliada do tipo bandeamento observada em campo e também nas amostras descritas em laboratório. Por fim, comparando os agregados da jazida FRAG-M e FRAG-N, embora sejam originados do mesmo maciço rochoso, nota-se a influência das etapas de britagem no resultado da forma do agregado. Conforme pode ser observado na Figura 4-23, o

agregado da primeira britagem (FRAG-N) apresentou partículas mais lamelares em comparação aos agregados que passaram por todas as etapas de britagem.

Na metodologia Superpave, a lamelaridade é avaliada por meio da placa calíper, com limitação de no máximo de 10% de agregados para razão 5:1, ou seja, sua maior dimensão (comprimento) deve apresentar no máximo cinco vezes sua menor dimensão (espessura). Porém, Cominsky et al (1994) sugeriram a adição da relação 3:1 e Prowell et al (2005) complementam com novos limites máximos estabelecidos, sendo 5% para relação 5:1 e 20% para relação 3:1.

Diante das restrições da relação 5:1, no presente estudo, realizou-se a análise para todas as relações, sendo elas: 2:1; 3:1; 4:1 e, 5:1, conforme apresentado na Figura 4-24 para as Pilhas $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ ".

Figura 4-24 - Resultados da lamelaridade através da Placa Calíper.

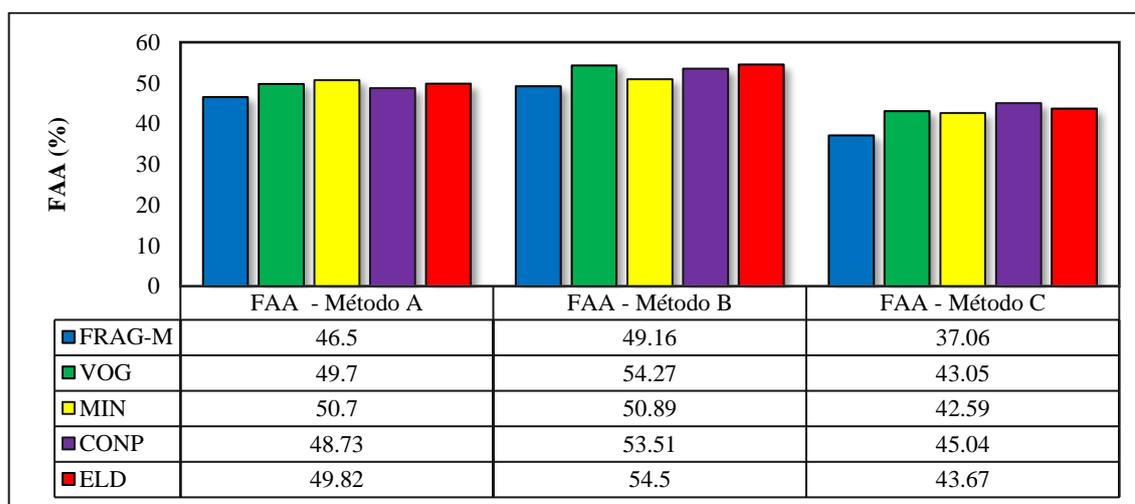


Analisando os dados da Figura 4-24, com base no critério estabelecido pela metodologia Superpave, com exceção da jazida COMP para a pilha $\frac{3}{4}$ ", todos os agregados apresentaram valores abaixo do limite proposto de 10%. Entretanto, para a pilha $\frac{3}{8}$ ", nota-se novamente a influência da foliação no resultado do agregado, pois as jazidas VOG (pilha $\frac{3}{8}$ " e COMP (ambas as pilhas), foram as únicas que apresentaram valores acima do limite estabelecido de 10% para a relação 5:1. Por sua vez, de acordo com o proposto por Prowell et al (2005), para a relação 3:1, apenas as jazidas FRAG-M, VOG e COMP apresentaram valores acima de 20% para pilha $\frac{3}{4}$ ", enquanto, para pilha $\frac{3}{8}$ ", as jazidas VOG, MIN, COMP e ELD, não atenderam o limite imposto. Já para a relação 5:1, esses mesmos autores estabeleceram

limite de 5%, desta forma, para a pilha $\frac{3}{4}$ ", as jazidas FRAG-N, VOG, MIN e CONP apresentaram valores superiores a 5%, enquanto, para a pilha $\frac{3}{8}$ ", apenas os agregados da jazida Fragosos (FRAG-M, FRAG-N e FRAG-F), atenderam o pressuposto.

Na sequência, com base nas normativas ASTM C 1252 e DNIT 415/2019 - ME foi obtida a angularidade do agregado miúdo para os três métodos (A, B e C) conforme apresentado na Figura 4-25. Ressalta-se que a angularidade é definida como a percentagem de vazios de ar presentes em agregados com tamanhos de partículas menores que 2.36 mm (BERNUCCI, et al., 2007). Por conseguinte, quanto mais elevado o índice de vazios, maior será a angularidade das amostras, menor a esfericidade e a textura do agregado tenderão a ser rugosa, devido ao espaço vazio ocasionado pelas partículas. Em contraste, um baixo índice de vazios, refere-se a agregados mais arredondados, com maior esfericidade e textura mais lisa.

Figura 4-25 - Resultados da análise da angularidade do agregado finos para os três métodos: A, B e C.



Analisando os resultados apresentados na Figura 4-25, nota-se que, os maiores valores de FAA foram encontrados para o método B, seguido do Método A e por último o Método C, conforme já havia sido observado por Fernandes et al. (2000). Para o Método A jazida MIN apresentou o maior valor, enquanto, a jazida FRAG-M o menor. Assim, pode-se inferir que a jazida MIN apresenta maior intertravamento entre as partículas em comparação a jazida FRAG-M. No método B, o resultado é obtido por intermédio da média aritmética das frações ensaiadas separadamente, neste caso, a jazida VOG detêm o maior resultado, enquanto a jazida FRAG-M continua apresentando valores inferiores. No método C, o agregado ensaiado refere-se ao

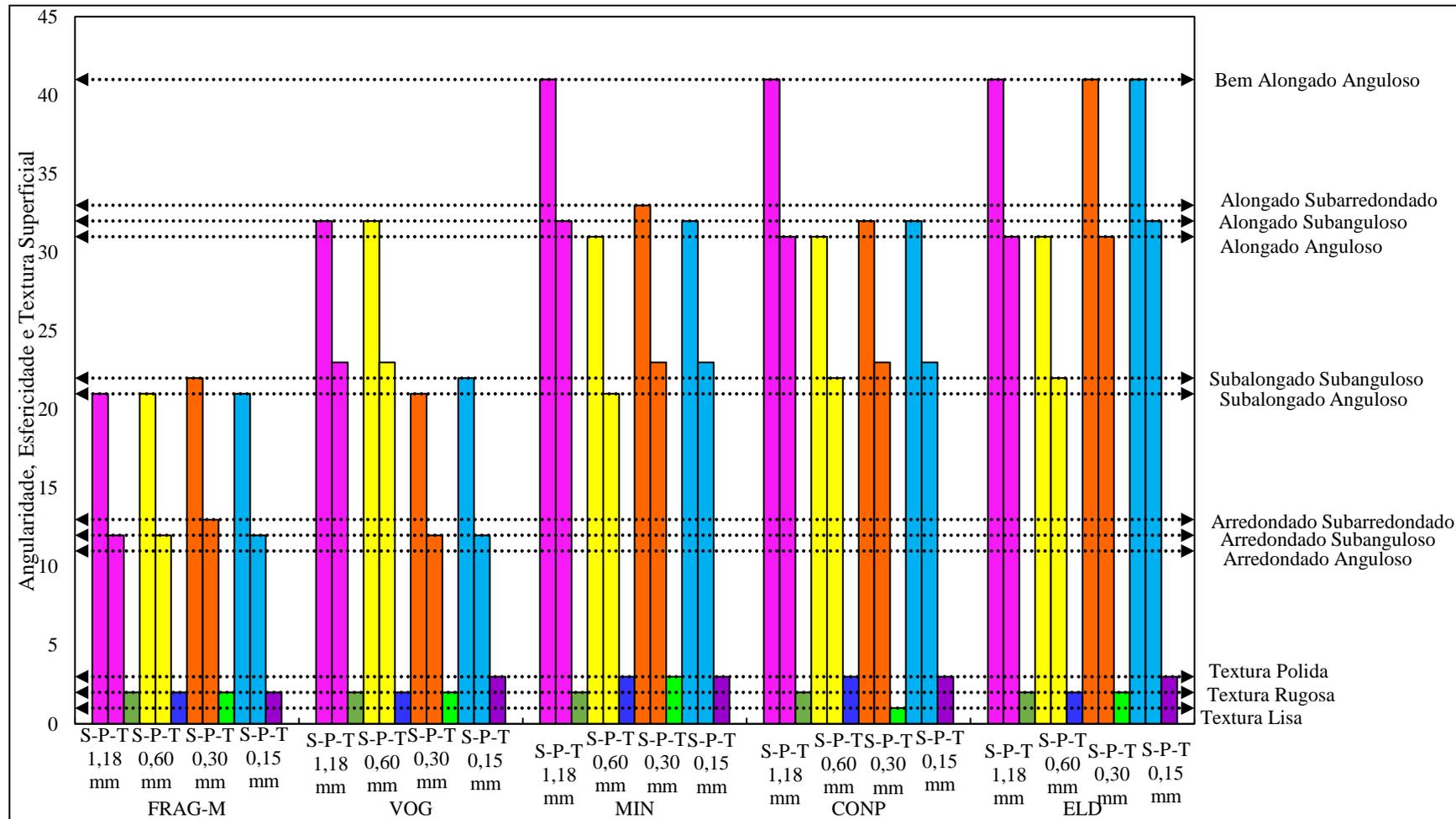
material passante na peneira de 4,75 mm (#4) e retido na 0,075 (#200), neste aspecto, gera-se maior intertravamento, em decorrência dos espaços vazios serem preenchidos pelas frações menores, conseqüentemente, a jazida CONP detêm o maior valor de FAA, enquanto, novamente, a jazida FRAG-M apresenta o menor valor.

De acordo com estudos desenvolvidos por Fernandes et al (2000), Gouveia e Fernandes (2002), Gouveia (2002, 2006), subentende-se que valores elevados de AAF ou FAA referem-se a maior angularidade e rugosidade das partículas. Portanto, analisando os resultados apresentados na Figura 4-25, nota-se que, independentemente do método utilizado, a jazida FRAG-M possui partículas mais arredondadas em comparação as demais jazidas, utilizando os métodos A, B e C, as jazidas MIN, ELD e CONP, respectivamente, apresentaram valores superiores de FAA. Portanto, observa-se que, dependendo do método empregado, a interação entre os agregados ocorre de modo diferente. O método A é o único que apresenta controle na granulometria. No método C, é notória a influência do material fino preenchendo os espaços vazios existentes, pois, conforme Figura 4-25, os resultados apresentam valores de AFF inferior aos demais.

Como discutido na revisão, há inúmeras controvérsias em relação a eficiência do respectivo ensaio na avaliação da angularidade. Desta forma, para complementar o estudo, os agregados foram analisados de modo visual com auxílio de lupa de mesa, com o propósito de avaliar a forma, angularidade e textura desses materiais. Ressalta-se que, nesta etapa cada fração do método A foi submetida a análise separadamente. Além disso, foi utilizada a classificação sugerida por Rodrigues (2019), que por meio de uma avaliação visual é possível classificar os resultados de esfericidade/angularidade dos agregados. Na Figura 4-26, são apresentados os resultados obtidos da avaliação visual dos agregados separados por jazida e fração.

Agregados com um bom desempenho na pavimentação, devem apresentar mais de 50% de suas somas (P e S) correspondentes as classificações subalongado anguloso (21), subalongado subanguloso (22), alongado anguloso (31) e alongado subanguloso (32) (RODRIGUES, 2019). Com base neste critério, os agregados oriundos das pedreiras CONP e ELD são as únicas pedreiras que produzem material com forma para uso em pavimentos asfálticos. As demais jazidas, podem ser consideradas para uso em pavimento, cujo tráfego a ser submetido seja médio a leve, pois são agregados com partículas com forma tendendo a subalongado a alongado e subarredondado.

Figura 4-26 - Resultados dos ensaios de avaliação visual de angularidade, esfericidade e textura superficial dos agregados finos.



Sendo: S (grau de esfericidade), P (grau de arredondamento) e T (textura superficial)

Observando as Figura 4-27 até Figura 4-29, podemos visualizar de forma individual os agregados quanto a angularidade, esfericidade e a textura superficial dos agregados finos. As partículas do agregado fino da jazida FRAG-M (Figura 4-27) são classificados como arredondado a subalongado com cantos anguloso a subanguloso e textura superficial rugosa. De certo modo, a análise visual foi condizente ao apresentado no ensaio de FAA, pois a jazida FRAG-M apresentou valores inferior as demais, o que justifica a falta de intertravamento entre os agregados deste tipo de litologia.

Figura 4-27 - Imagem visual da pedreira FRAG-M (granulito máficos): A) retido #16; B) retido #30; C) retido #50 e, D) retido #100. (aumento 75x).



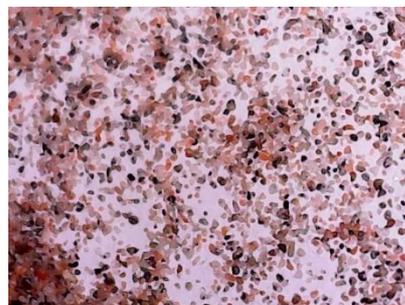
A) FRAG-M (granulito máficos) - #16



B) FRAG-M (granulito máficos) - #30



C) FRAG-M (granulito máficos) - #50



D) FRAG-M (granulito máficos) - #100

As partículas do agregado fino da jazida VOG (Biotita Gnaiss Figura 4-28) são classificadas como arredondada a alongada variando de angulosas a subangulosas e textura superficial rugosa. É possível observar por meio da análise visual que, em decorrência da estrutura bandada discutida na descrição petrográfica desta rocha, as intercalações de minerais máficos e félsicos justifica o predomínio de minerais micáceos (mineral preto) em comparação as demais litologias.

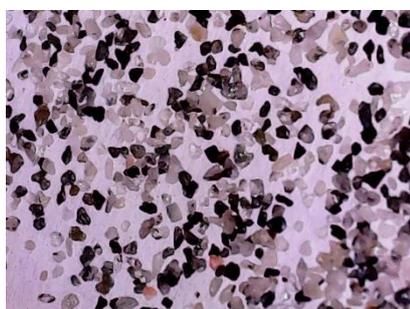
Figura 4-28 - Imagem visual da pedreira VOG (Biotita gnaisse): A) retido #16; B) retido #30; C) retido #50 e, D) retido #100. (aumento 75x).



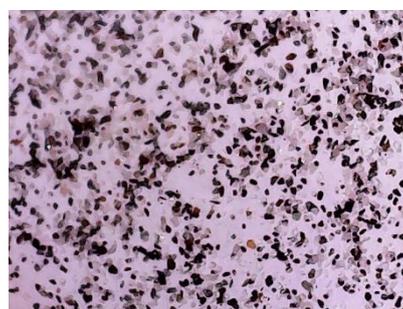
A) VOG (Biotita Gnaisse) - #16



B) VOG (Biotita Gnaisse) - #30



C) VOG (Biotita Gnaisse) - #50



D) VOG (Biotita Gnaisse) - #100

As partículas do agregado fino da jazida CONP (Figura 4-29), rocha de origem granítica, são classificadas de modo geral, com esfericidade alongada a subalongada, grau de arredondamento variando de anguloso a subanguloso e textura superficial polida. São partículas que tendem apresentar um bom intertravamento, condizente com o apresentado no ensaio FAA pelo método C. Com base na descrição petrográfica, a rocha apresenta textura porfírica a megaporfírica, portanto, é possível observar na Figura 4-29 -A, que algumas partículas, o agregado são compostas por apenas um mineral, ou seja, podendo ser observado minerais de quartzo (branco) e feldspato (laranja) o que explica a textura superficial lisa da pedra britada.

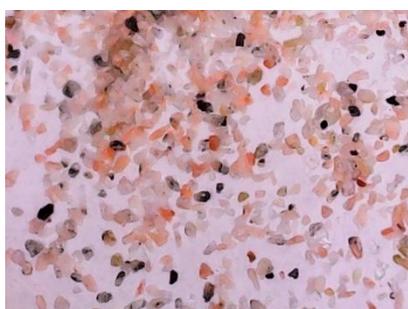
Figura 4-29 - Imagem visual da pedra CONP (Monzogranito pórfiro): A) retido #16; B) retido #30; C) retido #50 e, D) retido #100. (aumento 75x).



A) CONP (Monzogranito pórfiro) - #16



B) CONP (Monzogranito pórfiro) - #30



C) CONP (Monzogranito pórfiro) - #50



D) CONP (Monzogranito pórfiro) - #100

Foi observado que, partículas inferiores a 0,60 mm são formadas apenas por grãos minerais, fato de grande importância, pois, minerais mais flexíveis, como os micáceos presentes em quase todas as jazidas, porém, variando em porcentagem, são menos resistentes ao cisalhamento devido a clivagem perfeita em única direção deste tipo de mineral. Já minerais como quartzo, feldspato e plagioclásio, também presente em todas as litologias ensaiadas, são mais resistentes ao cisalhamento, devido à ausência ou clivagem em duas direções, respectivamente. Entretanto, esses minerais são mais friáveis, ou seja, tendem a se quebrarem com mais facilidade quando submetido a carga.

A fim de corroborar com os estudos já existentes sobre a avaliação da angularidade do agregado fino, foram realizados ensaios de cisalhamento direto, de acordo com a normativa ASTM (1990), com objetivo de averiguar a confiabilidade do AFF ou FAA quanto a resistência ao cisalhamento direto. Nesta pesquisa, diferente dos estudos realizados por Fernandes (2000), Gouveia e Fernandes (2002), Gouveia (2002, 2006), a resistência ao cisalhamento do agregado fino foi determinada através de ensaios de cisalhamento direto convencional com amostra na condição seca e solta, para os métodos A e C.

Os níveis de tensões normais aplicadas no ensaio foram determinados levando em consideração valores de tensões presentes na literatura, usualmente atuantes na camada de pavimentação (192, 382 e 500 kPa). Tanto o material utilizado quanto a preparação das amostras para os ensaios de cisalhamento direto seguiram as etapas descritas na metodologia. Durante o ensaio, buscou-se manter uma baixa variação no índice de vazios entre as amostras ensaiadas. Na Figura 4-30 e Figura 4-31 são apresentados os índices de vazios obtidos para cada amostra, conforme método A e método C, respectivamente.

Figura 4-30 - Índices de vazios das amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto – método A.

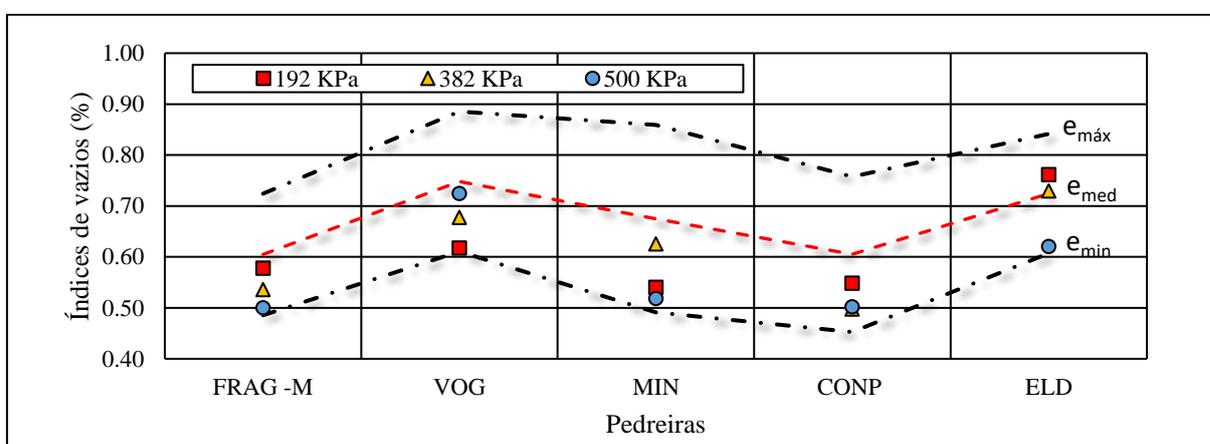
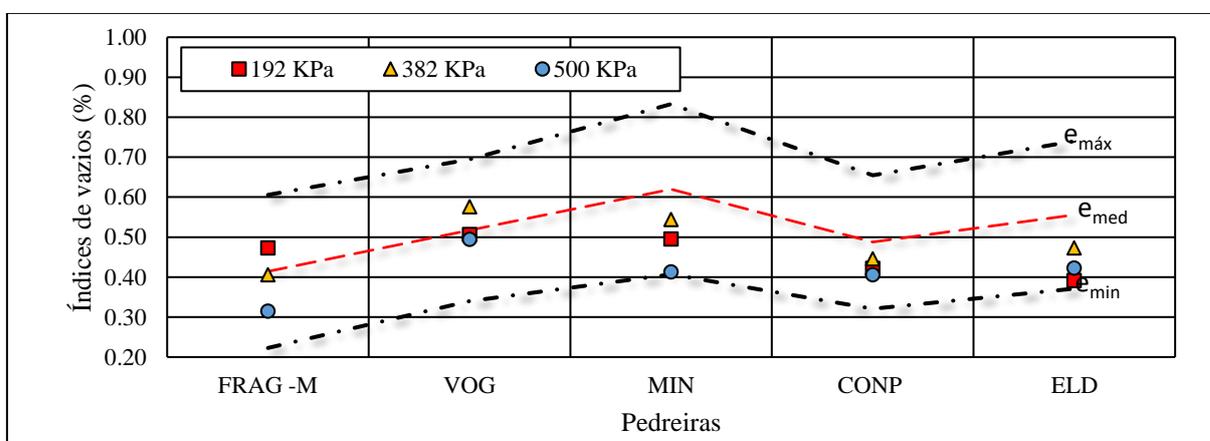


Figura 4-31 - Índices de vazios das amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto – método C.



Verificou-se que para todas as amostras ensaiadas o Método C, apresentou índices de vazios menores dos obtidos pelo Método A. Tal resultado era esperado, pois o método C

apresenta partículas de tamanho nominal diferentes, permitindo maior intertravamento entre os grãos, o que, por consequência, resulta menor índice de vazios. Para os ensaios de cisalhamento direto a amostra foi vertida no carrinho do equipamento e vibrada manualmente. Com isso, houve a necessidade de comparar o índice de vazios obtidos em cada amostra com a faixa de variação dos valores (e_{min} e e_{med}) demonstrada na Figura 4-30 e na Figura 4-31.

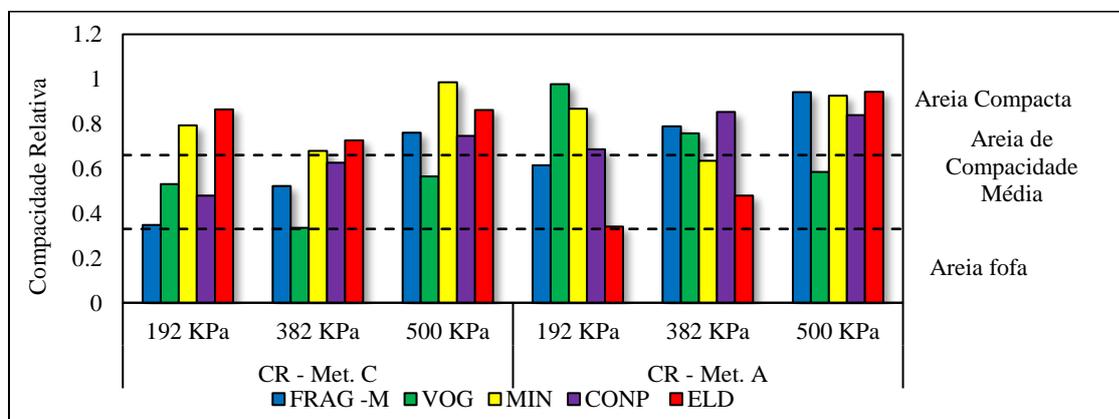
Avaliando a Figura 4-30 é possível observar que o índice de vazios das amostras pelo Método A situou-se entre a faixa de e_{min} e e_{med} , exceto para a pedraira ELD que o índice de vazios abrangeu a faixa de e_{min} e e_{med} . Na Figura 4-31 é apresentado os resultados para o Método C e observa-se que as pedreiras ELD, CONP e MIN enquadram-se na faixa de valores de e_{min} a e_{med} , e as amostras ensaiadas das pedreiras VOG e FRAG se aproximam dos valores de e_{med} . Em geral, as amostras se situam próximas ao estado compacto (e_{min}).

Para uma melhor visualização quanto a classificação do material, foi calculado a compactidade relativa (CR), através da equação (Eq. 4-1), que relaciona o índice de vazios que ela se encontra (antes do ensaio) com os valores extremos. Pinto (2009) apresenta uma faixa de classificação da CR proposta por Terzagui, onde valores abaixo de 0,33 indicam que a areia se encontra fofa, entre 0,33 e 0,66 no estado de compactidade média e, acima de 0,66, compacta.

$$CR = \frac{e_{max} - e_{nat}}{e_{max} - e_{min}} \quad \text{Eq. 4-1}$$

A Figura 4-32 apresenta os resultados da CR obtidos para as amostras referentes aos métodos A e C para todas as pedreiras e tensões estudadas. Salienta-se que é expresso no gráfico as faixas propostas para a CR por Terzagui para areias.

Figura 4-32 - Compactidade Relativa dos materiais.

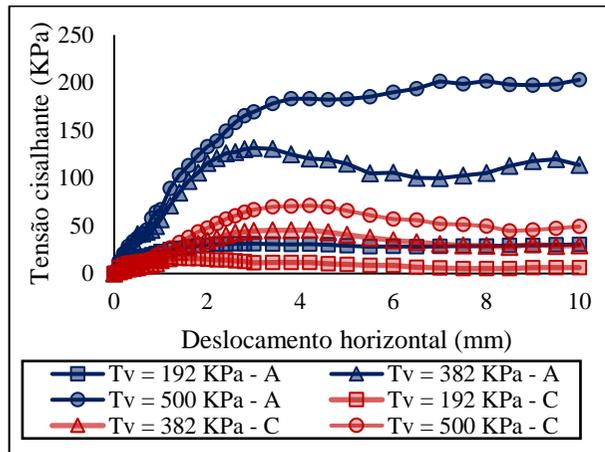


Salienta-se que a faixa proposta por Terzagui refere-se ao estado de compactidade de uma areia, no entanto, as amostras da presente dissertação apresentadas neste item, se assemelham ao formato dos grãos de uma amostra de solo granular. No geral, observando a Figura 4-32, independente da jazida e tensão aplicada, o material ensaiado variou entre areia de compactidade média a areia compacta. Era esperado que o Método C, apresenta-se comportamento mais compacto em relação ao Método A, no entanto, essa condição foi observada apenas para a pedreira MIN. Tanto para o Método A quanto para o Método C, os valores são superiores a 0,66 indicando que o material se encontra compacto. Para as amostras coletadas na pedreira ELD observa-se que para as tensões de 192 e 382 kPa o cálculo da CR indica um material compacto pelo método C e medianamente compacto para o método A. Já para a tensão de 500 kPa, ambos os métodos indicam que amostra se encontra compactada, entretanto a CR é apenas 9% superior para o Método A.

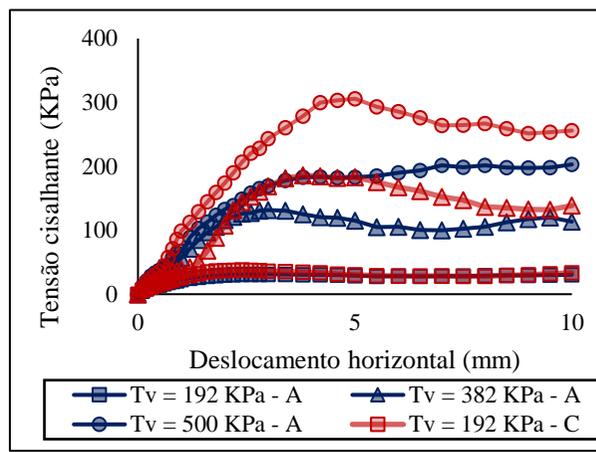
Avaliando a Figura 4-32, para as amostras oriundas da pedreira FRAG-M, o método A indica CR superior aos obtidos pelo Método C. Para a VOG a diferença entre os resultados é acentuada, já que para o método C todas as amostras são classificadas como medianamente compacta, enquanto para o método A, apenas a tensão de 500 kPa indica essa classificação. Tal fato é similar ao obtido para a pedreira CONP, com diferença neste caso à tensão de 500 kPa que indica que o material está compacto. Em geral, vide exceções apresentadas, o método A apresentou maior compactidade, essa diferença pode estar associada a outros fatores, como a distribuição granulométrica e o formato dos grãos.

Na Figura 4-33 são apresentadas as curvas tensão cisalhante *versus* deformação horizontal e na Figura 4-34 variação volumétrica por deformação horizontal das cinco jazidas para os dois métodos obtido do ensaio de cisalhamento direto.

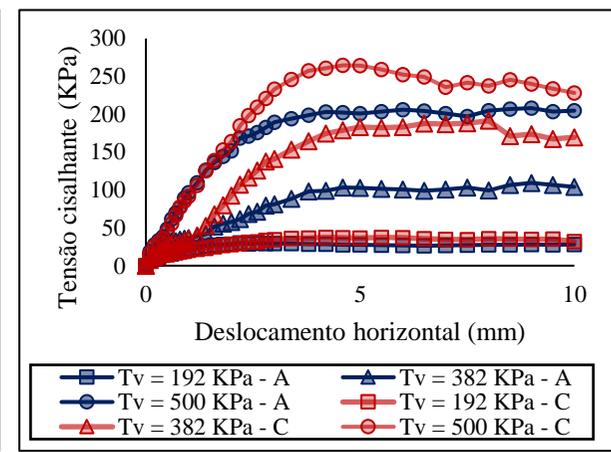
Figura 4-33 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.



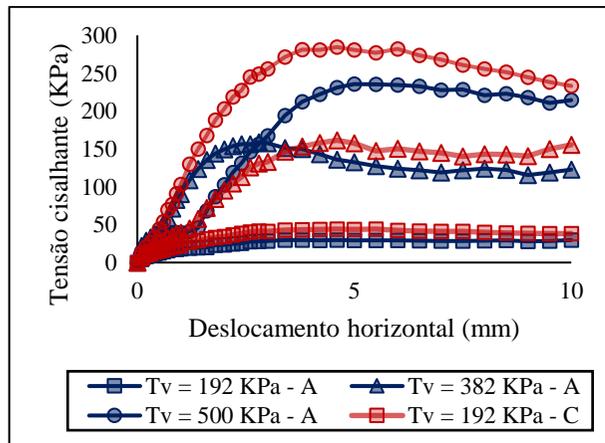
A) FRAG - M (Granulito Máfico)



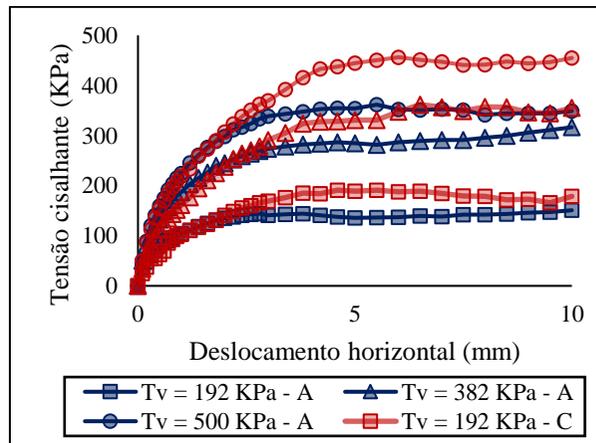
B) VOG (Biotita Gnaiss)



C) MIN (Sienogranito)

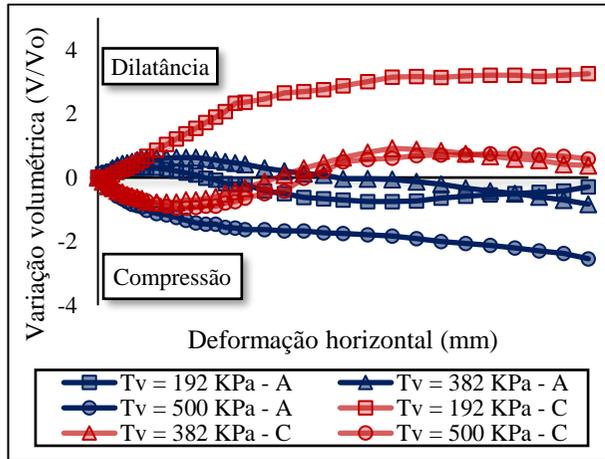


D) CONP (Monzogranito pórfiro)

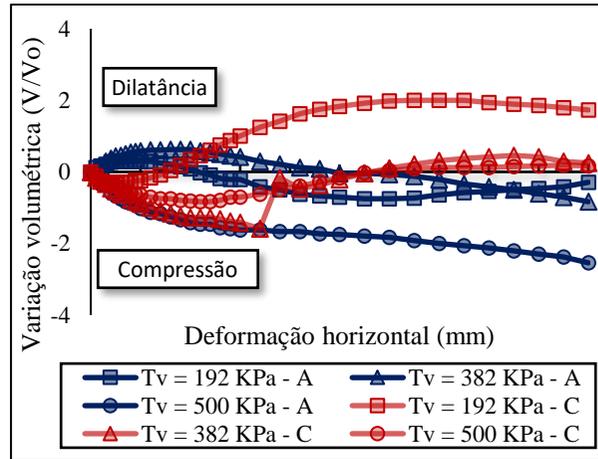


E) ELD (Sienogranito)

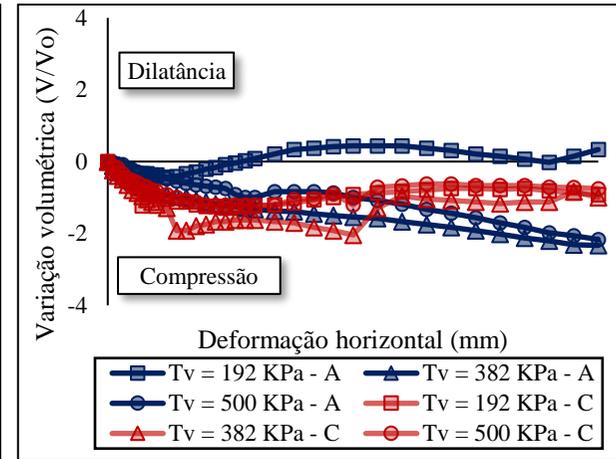
Figura 4-34 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.



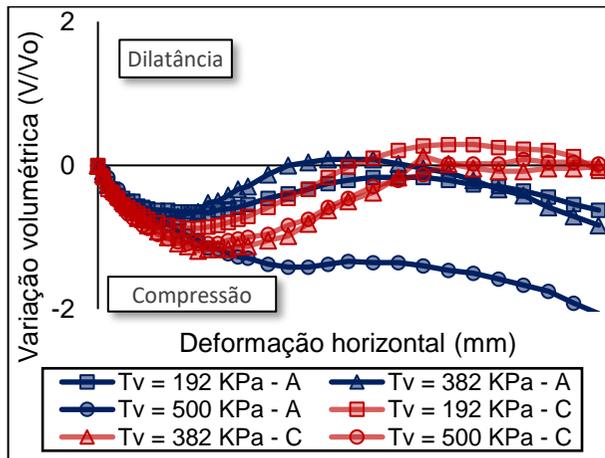
A) FRAG -M (Granulito Máfico)



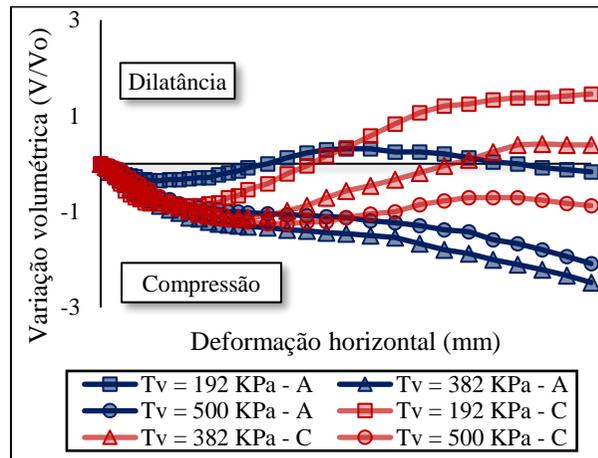
B) VOG (Biotita Gnaiss)



C) MIN (Sienogranito)



D) CONP (Monzogranito pórfiro)



E) ELD (Sienogranito)

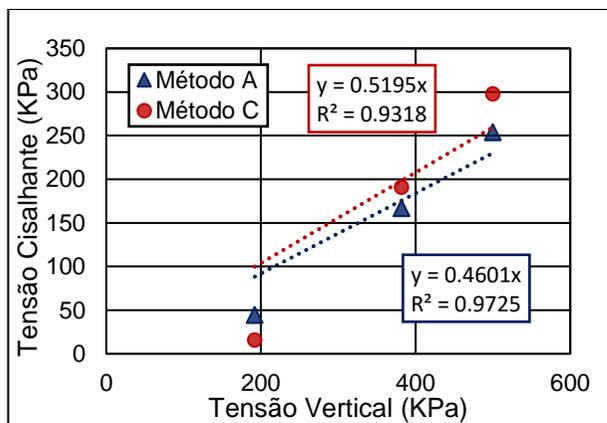
As curvas tensão-deformação (Figura 4-33), mesmo evidenciando algumas diferenças, apresentam um comportamento semelhante, com um crescimento da tensão de cisalhamento pelo deslocamento horizontal, até um ponto, onde, a partir daí, as tensões tendem a permanecer constantes. O método C tende a apresentar uma granulometria bem graduada e neste caso, há uma tendência em ter maior entrosamento entre os grãos, ou seja, há uma predominância do material mais fino preenchendo os espaços vazios e, assim, gerando uma estrutura granular mais resistente.

Analisando a Figura 4-34, nota-se que, a condição imposta ao método C resultou numa maior variação volumétrica em comparação o método A, embora não foi observado aspecto de dilatância entre todas tensões e jazidas analisadas. Para as duas condições (método A e C), as maiores variações ocorreram durante a aplicação da menor tensão normal, ou seja, 192 KPa. Em adição, observando o método C, quase todas as jazidas resultaram na menor variação volumétrica para a tensão de 500 KPa, com exceção apenas da jazida CONP, que apresentou variações bastante semelhantes entre as demais tensões (382 e 500 KPa), fato esperado se comparado com os índices de vazios, pois para a respectiva jazida, independente da tensão ensaiada (192, 382 e 500 kPa), os índices de vazios foram bem próximo. No entanto, para o método A, as jazidas FRAG-M, VOG e CONP detiveram as menores variações também na aplicação de 500 KPa e as jazidas MIN e ELD para tensão de 382 KPa.

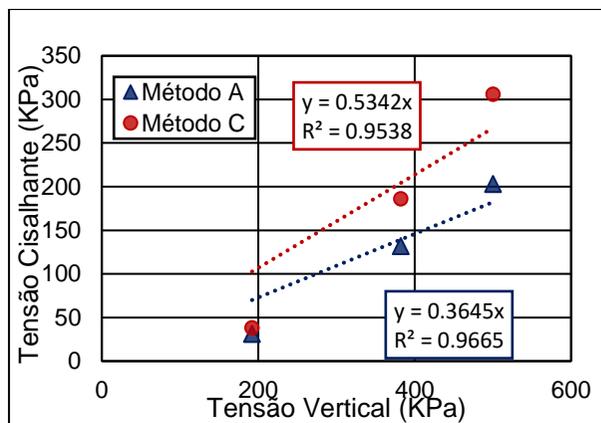
Neste caso, com base nos resultados apresentados no cisalhamento direto, esperava-se que os agregados ensaiados na condição do método C, devido ao maior intertravamento das partículas, apresenta-se valores de FAA superior ao método A, entretanto, os resultados foram o opostos.

Para todas as amostras ensaiadas, houve excelente correlação entre a tensão cisalhante *versus* a tensão normal, conforme apresentado na Figura 4-35

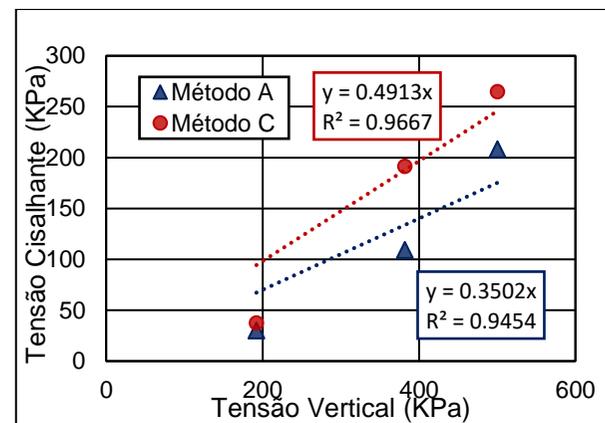
Figura 4-35 - Gráfico tensão cisalhante *versus* tensão vertical.



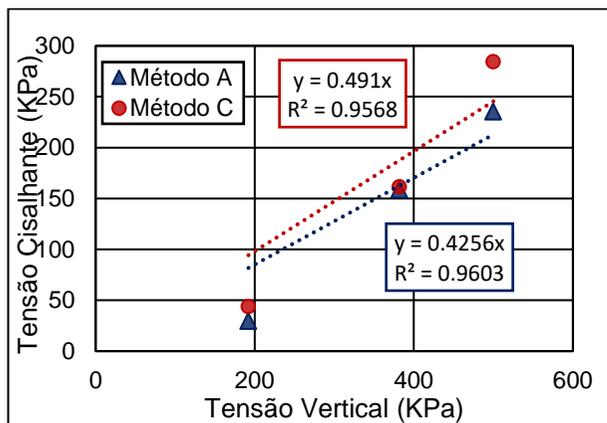
A) FRAG-M (Granulito Máficos)



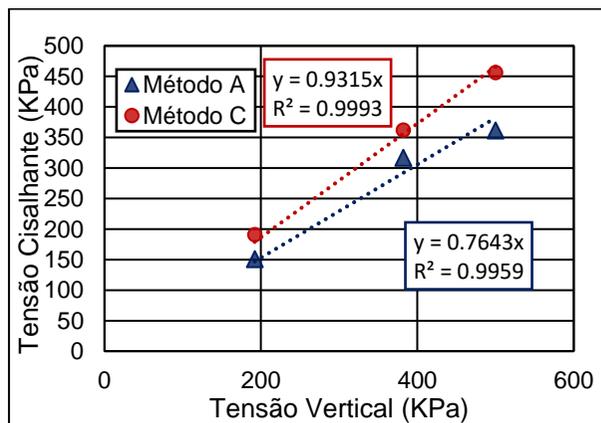
B) VOG (Biotita Gnaiss)



C) MIN (Sienogranito)



D) CONP (Monzogranito pórfiro)

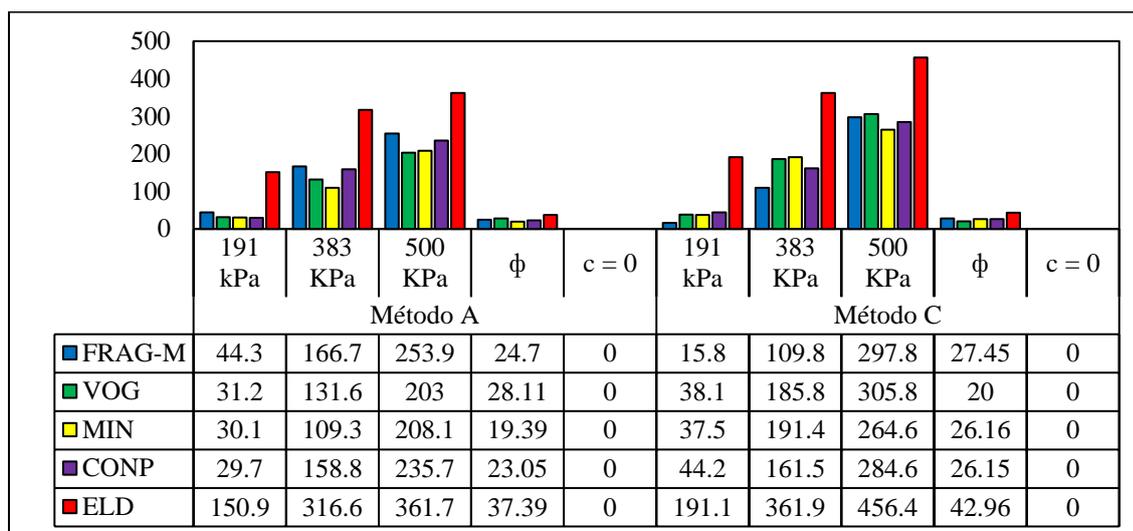


E) ELD (Sienogranito)

A resistência ao cisalhamento direto é dependente dos parâmetros de atrito interno e da tensão normal, por conseguinte, convém comparar a resistência sob um determinado nível de tensão de confinamento em vez de comparar os parâmetros de resistência. Contudo, considera-se a resistência ao cisalhamento para a tensão normal de 500 KPa, por tratar-se de um valor típico das tensões normais de compressão que atuam em revestimentos asfálticos sob as cargas do eixo padrão. Analisando as envoltórias apresentadas, observa-se que tanto para o método C quanto para o método A, a jazida ELD sobressaiu-se em relação às demais.

Na Figura 4-36 são apresentados os dados da tensão cisalhante para cada tensão normal aplicada e, o ângulo de atrito interno, para cada método analisado. Ressalta-se que a coesão do agregado neste ensaio é considerada nula, pois trata-se de amostra livre de qualquer material cimentante (GOUVEIA, 2002).

Figura 4-36 - Resultados das tensões cisalhante, normal e ângulo de atrito.



Não se observa baixos valores de resistência ao cisalhamento em relação a todas as tensões ensaiadas nos dois métodos empregados, contudo, a jazida ELD apresentou maior valor de resistência ao cisalhamento, para as duas condições ensaiadas. O maior valor de resistência desta jazida, formada por agregado de origem granítica (sienogranítico), ocorreu, provavelmente, por predominar partículas com esfericidade variando entre bem alongado a alongada e grau de arredondamento anguloso a subanguloso, conforme observado no ensaio visual (Figura 4-26), ou seja, são partículas com formas e textura superficial, que resulta num maior intertravamento.

Analisando apenas os resultados para as tensões de 500 KPa, é notória a influência do intertravamento dos grãos, pois o método C apresenta elevadas resistências ao cisalhamento, assim como ângulo de atrito, fato explicado pela boa interligação entre agregados de frações maiores, sendo, provavelmente, os espaços vazios preenchidos pelo material mais fino, ocasionando um bom intertravamento.

Os elevados valores de ângulo de atrito das amostras FRAG-M e ELD em relação as demais, para ambos os métodos, indicam uma maior habilidade desses agregados resultarem um bom intertravamento e, conseqüentemente, numa estrutura granular mais resistente. Sendo assim, os maiores valores do ângulo de atrito podem ser atribuídos à maior angularidade e à textura superficial mais rugosa dessas amostras.

Para o método A, a jazida MIN (sienogranito) apresentou menor ângulo de atrito, enquanto, para o método C, foi a jazida VOG (Biotita Gnaisse). Em resumo, diversas características interferem na resistência ao cisalhamento dos agregados, como compacidade, tamanho, forma, angularidade, textura superficial e granulometria. Pode-se dizer que para o método A, a baixa angularidade da jazida MIN está condicionada soma desses fatores (compacidade, tamanho, forma, angularidade, textura superficial e granulometria), enquanto para o método C, além da influência mineralógica associada aos minerais micáceos que tendem a resultar, neste tipo de ensaio menor resistência do material (devido a clivagem das micas), a compacidade também interferiu, pois de acordo com o CR a jazida apresentou comportamento de uma areia de compacidade média.

No entanto, em ambos os métodos (i.e., A e C), a jazida ELD apresenta valores superiores em relação as demais, portanto, pode-se aferir que, os agregados pertencentes a esta pedra detêm forma mais angular e/ou rugosa, condizente com a análise visual, bem como, com características de materiais granulares mais compactos e, conseqüentemente mais resistente.

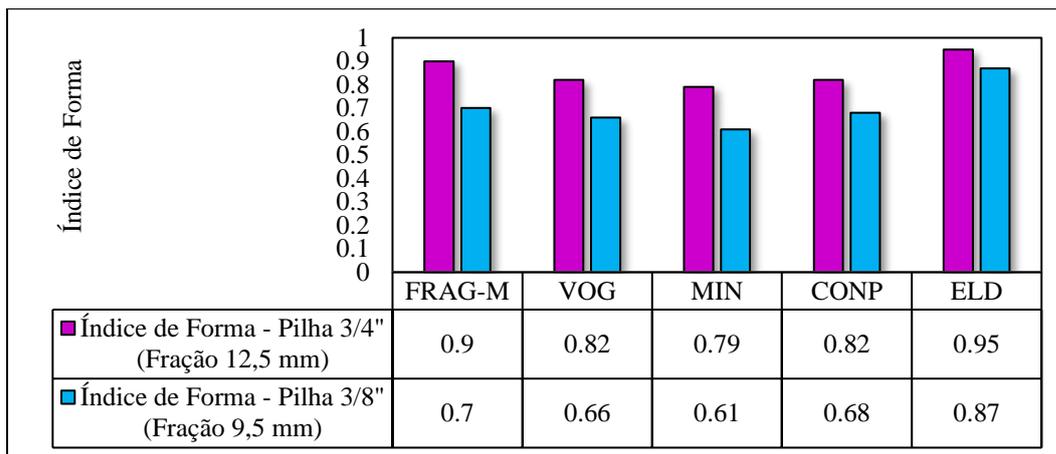
Portanto, como o objetivo consistia em contribuir com as análises já realizadas por Fernandes et al (2000), Gouveia e Fernandes (2002), Gouveia (2002, 2006), Rodrigues (2019), nota-se os resultados obtidos com o ensaio de angularidade do agregado fino (FAA), de fato, não são condizentes com os resultados apresentados no ensaio de cisalhamento direto, ou seja, a jazida MIN, que detém o maior resultado de FAA para o método A, e CONP, para o método C, não apresentaram os maiores valores de resistência na aplicação da tensão de 500 KPa.

4.2.3.2 Avaliação da forma dos agregados separados peneira a peneira

Tendo em vista o resultado do Índice de Forma, no geral, consiste na média obtida da soma envolvendo todo o material composto de uma mesma pilha, faz-se necessário avaliar cada fração de modo separado. Diante disto, neste tópico serão apresentados os estudos da caracterização da forma, separado por tamanho nominal (TMN) do agregado.

A Figura 4-37 têm por objetivo comparar as características dos índices de forma provenientes das pilhas $\frac{3}{4}$ ", separados por TMN diferentes, ou seja, obtidos através do peneiramento dos materiais. Em adição, nas Figura 4-38, Figura 4-39 e Figura 4-40, são apresentados os resultados de lamelaridade, para as pilhas $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ ".

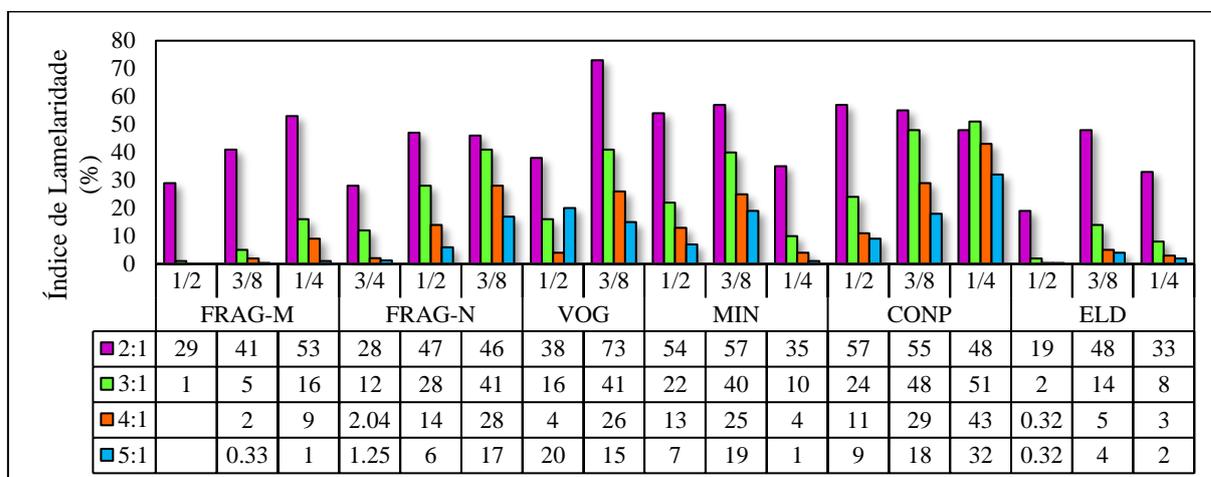
Figura 4-37 - Avaliação do Índice de Forma através do Crivo Redutor para Pilha $\frac{3}{4}$ " separado por fração.



Ao avaliar a forma do agregado por meio do crivo redutor, nota-se que todas as jazidas demonstram o mesmo comportamento, as frações $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm) apresentaram maior índice de forma em comparação a fração $\frac{3}{8}$ " (9,5 mm). O presente resultado é pertinente, visto que, à medida que o agregado é submetido as etapas de redução por intermédio da britagem, a tendência é ele apresentar características mais lamelares.

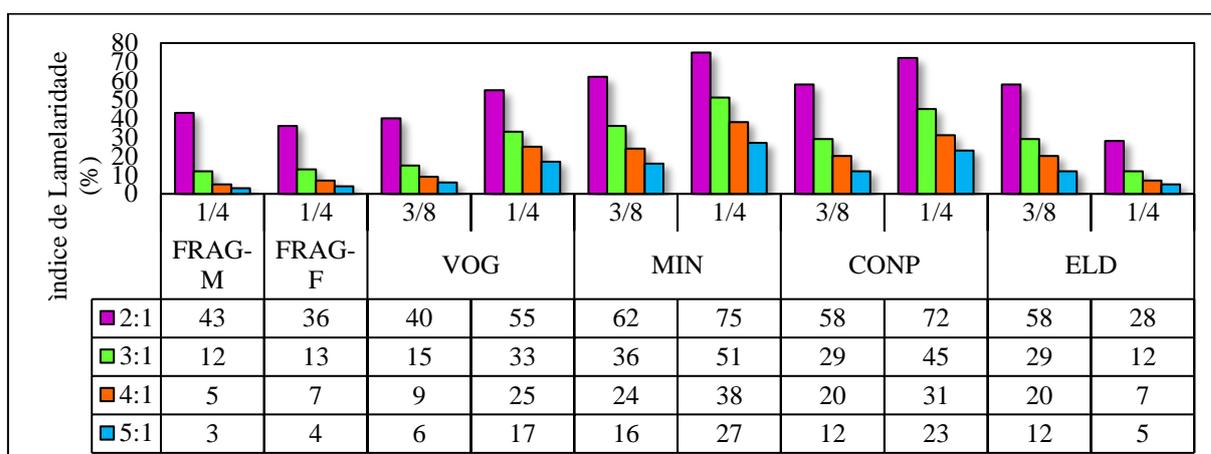
A Figura 4-38, ilustra os resultados do índice de lamelaridade avaliado por intermédio do paquímetro calípter.

Figura 4-38 - Avaliação do Índice de Lamelaridade – Superpave da Pilha ¾” separado por fração.



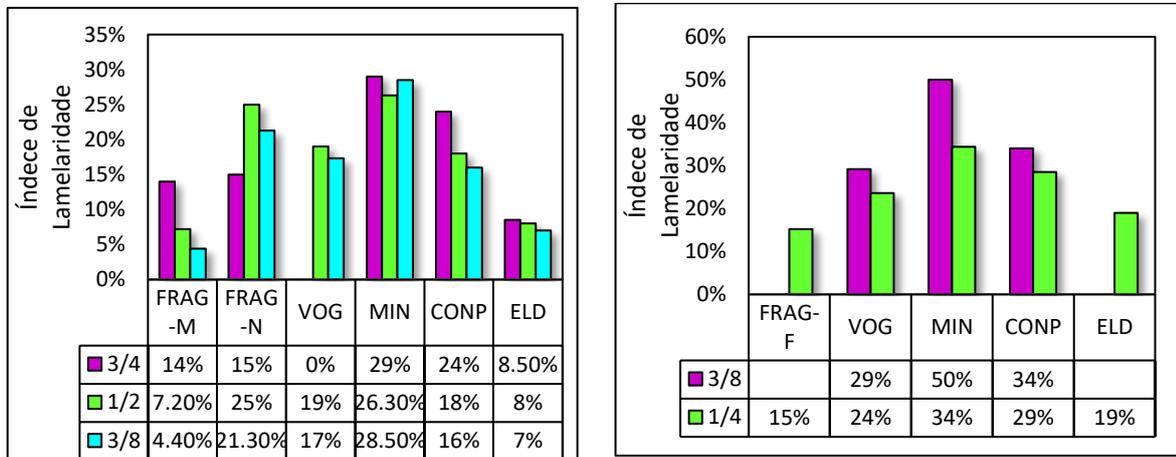
Conforme já discutido, espera-se que, a diminuição no tamanho das frações gere partículas mais lamelares. No entanto, essa observação não ocorre para a Pilha ¾”, nas jazidas MIN, CONP e ELD. Estas jazidas, apresentaram valores para a fração ¼” (6,3 mm) inferiores a ¾” (9,5 mm). No entanto, ao realizar a mesma análise, para a pilha ¾” (Figura 4-39), nota-se que apenas a jazida ELD resultou valores de lamelaridade inferiores para a fração ¼” (6,3 mm) em relação a ¾” (9,5 mm).

Figura 4-39 - Avaliação do Índice de Lamelaridade – Superpave da Pilha ¾” separado por fração.



A Figura 4-40 traz os resultados de lamelaridade avaliados por intermédio da placa do DAER, apresentando os dados separados por frações.

Figura 4-40 - Avaliação do Índice de Lamelaridade separado por fração, A) Pilha 3/4"; B) Pilha 3/8".



A) Pilha 3/4"

B) Pilha 3/8"

Observa-se que nem sempre avaliar a pilha através da média obtida entre as frações representativas torna-se o mais confiável, pois avaliando os dados apresentados na Figura 4-40, no geral, para a Pilha 3/4", os agregados retidos na peneira 12,5 mm (1/2) são mais lamelares, assim como, na pilha 3/8", os agregados retidos na peneira de 9,5 mm (3/8") mostraram ser mais lamelares em comparação aos agregados retidos na peneira de 6,3 mm (1/4).

4.2.3.3 Síntese das análises

A forma do agregado foi avaliada por diferentes normas quanto a forma, lamelaridade e angularidade do agregado miúdo, no qual cabe destacar alguns pontos importantes com base nos resultados obtidos.

Nos ensaios de índice de forma (paquímetro e crivo redutor), nota-se comportamento semelhante entre as amostras, a medida o tamanho dos agregados diminuem, maior é o índice de forma para o paquímetro e menor para o crivo. Ou seja, os resultados se relacionam, visto que, valores elevados nos paquímetros e inferiores no crivo refere-se a partículas mais angulares do que cúbicas.

As amostras pertencentes as pilhas 3/8" resultaram em agregados com forma mais lamelares tanto por intermédio da placa DAER quanto pelo paquímetro calíper. Além disso, de acordo com o limite estabelecido para o ensaio "índice de lamelaridade – Superpave" para a

relação 5:1, as jazidas VOG, MIN e CONP apresentaram valores superiores a 10%, inviabilizando seu uso na pavimentação.

No entanto, conforme discutido, Prowell et al (2005) que concluíram que seria mais coerente avaliar a relação 3:1, as jazidas VOG e CONP (ambas as pilhas) e MIN e ELD (pilha $\frac{3}{8}$ ”), estariam acima dos 20% sugeridos, assim como, as jazidas VOG, MIN e CONP (ambas as pilhas) e, ELD (pilha $\frac{3}{8}$ ”) estariam acima do limite de 5% para a relação 5:1. Diante dessas observações, nota-se que, avaliar as partículas através da proporção 3:1 permite caracterizar de modo mais realista as formas dos agregados.

O ensaio da angularidade do agregado miúdo, realizado de modo indireto através do índice de vazios do agregado não compactado, como apontado por outros autores, mostrou-se ser insatisfatório para avaliar a angularidade do agregado fino, conforme comprovado pelo ensaio de cisalhamento direto, neste caso, faz-se necessário cautela no uso do respectivo ensaio.

As normativas geralmente utilizam como resultado de um ensaio a compilação obtida entre as médias das frações ensaiadas para uma respectiva pilha. Assim, com base nas discussões apresentadas, os agregados foram avaliados de forma separada por fração e, conforme apresentado nos itens 4.2.3.2 e 4.2.4.2 , pode-se observar resultados bastante distintos, ao realizar os ensaios desta forma.

Portanto, o IF das jazidas nem sempre apresentam de fato a realidade. A mesma observação cabe à lamelaridade. Esperava-se que, à medida que ocorresse a diminuição do tamanho nominal das frações, os agregados tenderiam à forma mais lamelar, no entanto, frações $\frac{1}{2}$ ” (12,5 mm) para Pilha $\frac{3}{4}$ ” e frações $\frac{3}{8}$ ” (9,5 mm) para pilha $\frac{3}{8}$ ” apresentaram partículas mais lamelares. Desta forma, ressalta-se a importância em avaliar os agregados por fração e não por jazida.

4.2.4 Avaliação da forma do agregado através do PDI

A caracterização morfológica dos agregados por intermédio do PDI foi realizada utilizando o AIMS2 e foram empregadas as classificações de Al – Rousan (2004) e Ibiapina et al (2018). Inicialmente, a análise foi realizada de modo geral por jazida, na sequência separando por pilha e por fração, posteriormente em relação a achatada e alongada, finalizando com uma análise crítica do ensino.

4.2.4.1 Avaliação da forma do agregado

A Tabela 4-12, aborda um resumo dos resultados obtidos no ensaio, os parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) desta seção estão relacionados à distribuição granulométrica completa de cada jazida. Desta forma, a análise estatística consistiu na junção das três pilhas ($\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " e pó) para, num primeiro momento, avaliar a pedreira de modo geral.

Em relação ao parâmetro de forma, com exceção da jazida FRAG-M, as demais, apresentaram médias muito próximas entre si, e, tenderam a classificações diferentes de acordo com cada autor utilizado. Desta maneira, a pedreira FRAG-M apresenta forma semicircular, para os agregados miúdos, enquanto as demais variaram de semialongada (Al Rousan, 2004) a semicircular (Ibiapina et al, 2018). De acordo com as observações realizadas acerca da forma desses agregados, nota-se que a classificação atribuída por Ibiapina et al (2018) é mais condizente com os materiais analisados.

Já em relação a esfericidade e angularidade, não houve diferença entre as classificações conferidas pelos dois autores. No entanto, apenas a jazida FRAG-M apresentou esfericidade moderada, as demais resultam em baixa esfericidade. Todas as jazidas tiveram angularidade subarredondada. Neste caso, em especial, nota-se a importância de avaliar a angularidade separada ao menos em agregado graúdo e miúdo, pois houve divergência entre os dois resultados, agregados classificados com esfericidade moderada apresentaram angularidade igual aos agregados de baixa esfericidade.

Por fim, a textura superficial divergiu tanto em relação às classificações quanto, em relação às jazidas estudadas. Nota-se que, as jazidas de granito, foram classificadas de acordo com Ibiapina et al (2018), com textura macia. Em vista disso, faz-se necessário analisar também os agregados de acordo com as diferentes granulometrias produzidas pelas pedreiras em relação as pilhas.

Tabela 4-12 - Parâmetros estatístico e classificação dos agregados para todas as jazidas.

Parâmetros	Unidades e classificações	FRAG-M	FRAG-F	VOG	MIN	CONP	ELD
Forma 2D	m	7,86	7,86	8,40	8,59	8,8	8,79
	n	895	907	885	873	891	748
	DP	2,16	1,99	2,42	2,36	2,37	2,45
	Al-Rousan (2004)	Semicircular	Semicircular	Semialongado	Semialongado	Semialongado	Semialongado
	Ibiapina et al (2018)	Semicircular	Semicircular	Semicircular	Semicircular	Semicircular	Semicircular
Esfericidade (gráudo)	m	0,716	0,664	0,645	0,641	0,59	0,67
	n	171	99	149	191	144	149
	DP	0,099	0,085	0,107	0,106	0,11	0,11
	Al-Rousan (2004)	Esfericidade Moderada	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade
	Ibiapina et al (2018)	Esfericidade Moderada	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade
Angularidade (gráudo e miúdo)	m	3116,9	3244,1	3465,2	3440,1	3438,3	3568,7
	n	1067	1007	1037	1069	1038	901
	DP	1007,1	1027,9	123,1	1160,2	1106,3	1044,4
	Al-Rousan (2004)	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado
	Ibiapina et al (2018)	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado
Textura superficial (gráudo)	m	623,8	394,3	548,6	354,6	252,6	302,3
	n	172	100	139	192	145	149
	DP	129,9	109,4	242,6	126,3	103,2	107,7
	Al-Rousan (2004)	Alta Rugosidade	Rugosidade moderada	Alta Rugosidade	Rugosidade moderada	Macio	Baixa Rugosidade
	Ibiapina et al (2018)	Rugosidade Moderada	Macio	Rugosidade Moderada	Macio	Macio	Macio

Sendo: m = média; n = número de partículas; DP = desvio padrão

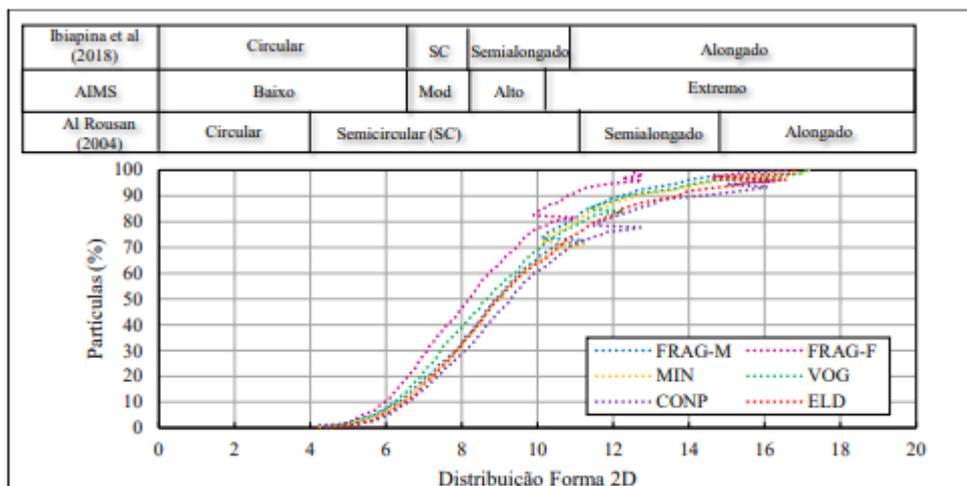
Por meio da representação gráfica é possível inferir como procede a distribuição de cada fração dentro da jazida. Portanto, a seguir, cada propriedade dos agregados será apresentada separadamente, com maior detalhamento, a fim de discutir as semelhanças e diferenças de cada jazida estudada.

- Forma 2D (agregados miúdos)

Conforme mencionado, a forma 2D é realizada apenas com o agregado miúdo. Os resultados apresentados pela respectiva análise comparam as partículas com a forma de um círculo (com valores próximos de zero), caso contrário, quanto maior o valor, mais alongada será a partícula. Os gráficos de avaliação da forma foram separados por fração e por jazida estão representados no Apêndice A₁. Neste tópico, em especial, os agregados avaliados referem-se somente aos agregados da Pilha Pó.

De acordo com a curva de distribuição da forma, todas as jazidas analisadas têm comportamento semelhante. Em outras palavras, este parâmetro, de acordo com o AIMS, varia de baixo a extremo, conforme apresentado na Figura 4-41, no entanto, as maiores concentrações são observadas no intervalo moderado a alto. Por sua vez, Al Rousan (2004) e Ibiapina et al (2018), sugerem que os agregados variam de semicircular a alongado e circular a alongado, respectivamente. Com maiores concentrações no campo semicircular para Al-Rousan (2004) e semicircular a semialongado para Ibiapina et al (2018).

Figura 4-41 - Média da Forma 2D separado por pedreira.

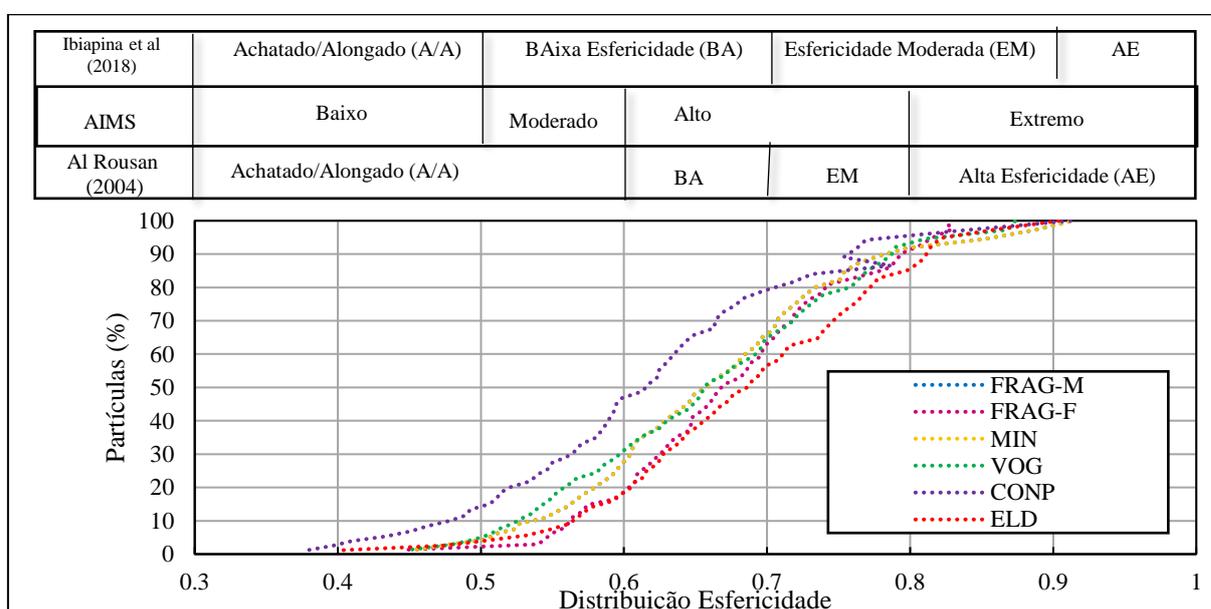


- Esfericidade (agregados graúdos)

A esfericidade do agregado graúdo busca avaliar o quanto o material analisado se aproxima de uma esfera, assim, quanto mais próximo de 1, mais esférico será o agregado. A Figura 4-42 apresenta a média da distribuição das partículas separada por jazida, enquanto, os gráficos da curva de esfericidade para cada jazida, separados por fração são apresentados no Apêndice A₂.

De acordo com a classificação do AIMS, os agregados apresentaram baixa a alta esfericidade, porém, com maior concentração no campo de moderado a alto. Conforme Al-Rousan (2004), variou de achatado/alongado a alta esfericidade, entretanto, sobressai no campo de achatado/alongado a baixa esfericidade. Enquanto isso, Ibiapina et al (2018) sugere agregados com esfericidade achatado/alongado a esfericidade moderada, com maior concentração para baixa esfericidade.

Figura 4-42 - Média da Esfericidade separado por pedreira.



No geral, observa-se comportamento semelhante entre as jazidas, com exceção da jazida CONP, cuja litologia, na análise petrográfica apresentou textura megaporfíritica, rochas com este tipo de textura tendem a originar fragmentos com um único mineral que no caso, são os feldspatos (são prismáticos e com clivagem em duas direções) o que interfere na esfericidade da pedra britada. Pode-se dizer então, que este tipo de textura pode ser influenciado na baixa esfericidade do agregado em comparação com as demais jazidas.

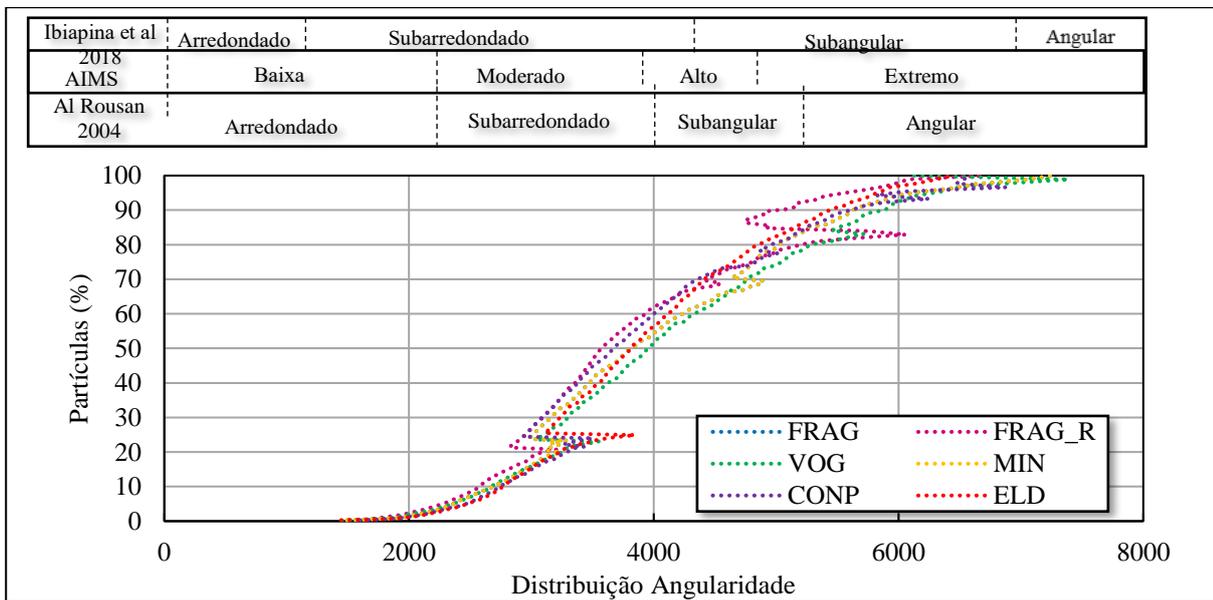
- Angularidade (graúdo e miúdo)

A angularidade foi avaliada para os agregados graúdos e miúdos. Esse parâmetro varia de 0 a 10, 000, a distribuição de angularidade dos agregados graúdos e miúdos separado por fração para todas as pedreiras são apresentadas no Apêndice A3.

Analisando a curva de distribuição da angularidade para cada jazida (Figura 4-43), nota-se que, no geral, as jazidas apresentam agregados com maior angularidade variando entre moderado a alto, de acordo com a classificação do AIMS, assim como, subarredondado a subangular para classificação proposta pelos autores Al Rousan (2004) e Ibiapina et al (2018).

No geral, as curvas se sobrepõem, indicando praticamente que não há diferença na angularidade para as diferentes litologias analisadas pois todas elas apresentam granulação grossa. Era de se esperara que a mineralogia influenciasse os resultados de angularidade, porém, os processos de britagem e rebitagem, como por exemplo a Jazida VOG, parecem ter “corrigido” essas diferenças.

Figura 4-43 - Média da Angularidade separado por pedreira.

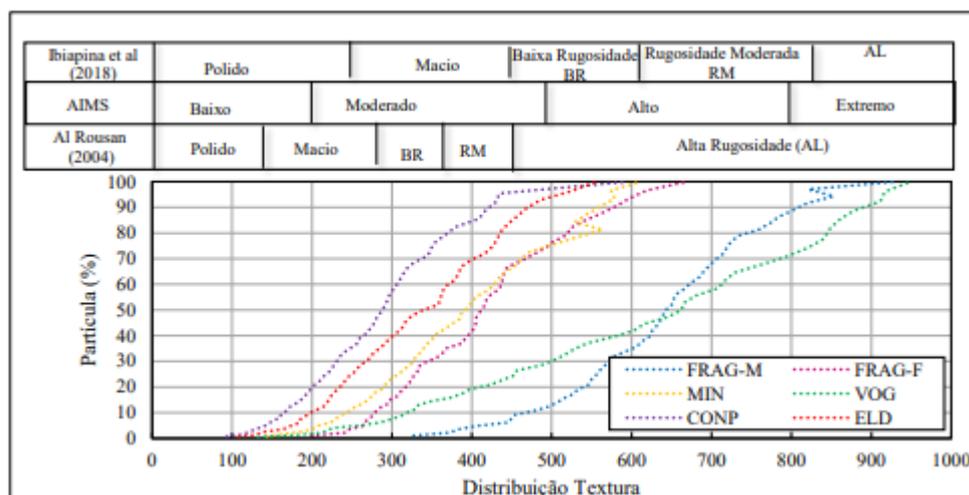


- Textura Superficial (graúdo)

A textura superficial do agregado é um dos fatores que influencia na aderência ligante-agregado no bom intertravamento deles. Na Figura 4-44, pode-se comparar através da curva cumulativa a textura superficial dos agregados entre as jazidas ensaiadas. A distribuição da

textura superficial separado por fração para todas as pedreiras são apresentadas no Apêndice A4.

Figura 4-44- Média da Textura separado por pedreira.



As jazidas FRAG-M e VOG apresentaram resultados extremamente diferente em comparação as demais jazidas, com textura variando entre alto e extremo, de acordo com a proposta sugerida pelo AIMS. Por sua vez, a classificação de Al-Rousan (2004) e Ibiapina et al., (2018) sugerem que os agregados destas duas jazidas apresentam textura variando de macio a alta rugosidade, entretanto, com maior concentração no campo de alta rugosidade e baixa a moderada rugosidade, respectivamente. Desta forma, o agregado mais rugoso, no geral, foram as rochas de origem metamórficas, VOG e FRAG-M por apresentarem uma textura mais fina (minerais menores) que as demais.

Os agregados de origem granítica (MIN, CONP e ELD) apresentaram rugosidade variando de polido a alta rugosidade. Entretanto, a classificação dependente do autor utilizado, de acordo com os critérios propostos pelo AIMS, varia de moderada à alto, por sua vez, para Al-Rousan (2004), tende de baixa rugosidade a alta e, por fim, Ibiapina et al., (2018), macio a baixa rugosidade.

Neste caso deve-se considerar a granulação da rocha e estado de alteração pois litologias de granulação mais fina e menos alteradas apresentam valores mais elevados de rugosidade do que as rochas, de granulação grossa, onde muitas vezes a rugosidade é avaliada considerando a superfície de um único mineral (pórfiro). Nota-se que, esse tipo de comportamento pode ter ocorrido para os agregados das jazidas ELD e CONP, rochas de origem graníticas que apresentam textura porfírica a megaporfírica, respectivamente,

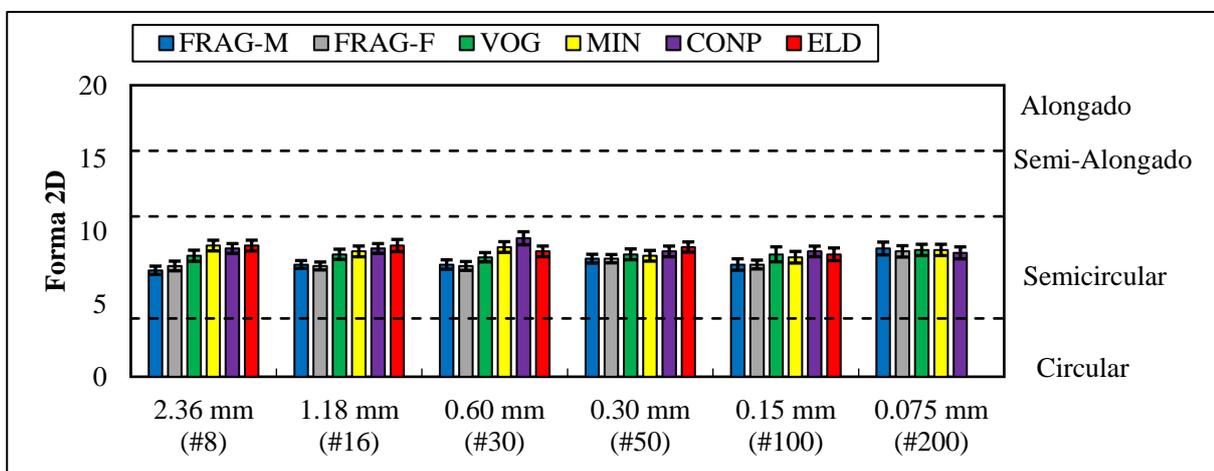
resultando agregado com textura menos rugosa em comparação as demais litologias estudadas.

4.2.4.2 Avaliação e caracterização da forma do agregado por meio do PDI separado por pilha e por fração

No item anterior (3.2.5.4) os resultados foram apresentados através da média para cada parâmetro analisado, sendo eles: forma 2D, esfericidade, angularidade e textura superficial. Uma vez que os agregados foram ensaiados com base na representatividade de cada fração em acordo com cada pilha, faz-se necessário analisar e caracterizar esses resultados de modo separado, por pilha, bem como, por fração. Assim, com o objetivo de comparação entre os agregados, a seguir são apresentados de forma gráfica os resultados médios de cada parâmetro analisado por fração. Ressalta-se que as barras de erro representam intervalos de confiança, com base no desvio padrão, na quantidade de partículas analisadas e utilizando o nível de significância (α) de 5%.

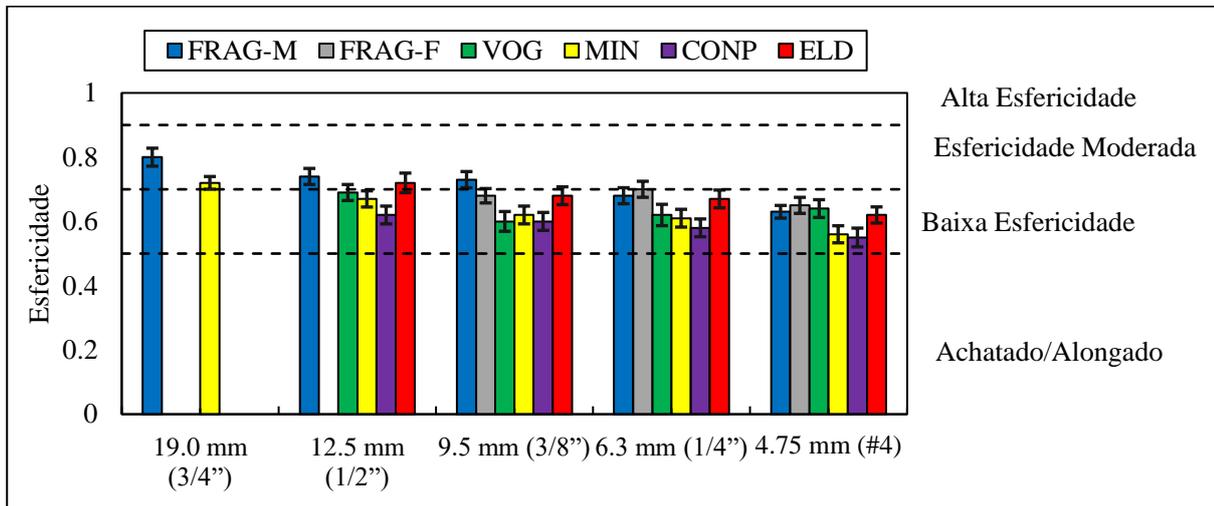
A Figura 4-45 apresenta as médias de esfericidade de cada material, por fração. Os agregados ensaiados apresentam classificação semicircular, independente da jazida analisada. De maneira geral, o agregado miúdo mais semicircular foi oriundo da pedreira CONP, referente a fração 0,60 mm. Nota-se ainda que, à medida que se reduz o tamanho das partículas, agregados de origem graníticas (MIN, CONP e ELD) apresentaram redução na forma, enquanto, agregados de origem metamórfica (FRAG-M, FRAG-F e VOG), tenderam a ser mais alongada.

Figura 4-45 - Comparação entre forma 2D média dos agregados por fração.



Na Figura 4-47 são apresentados as médias de esfericidade de cada jazida separado por fração.

Figura 4-47 - Comparação entre esfericidade média dos agregados por fração.

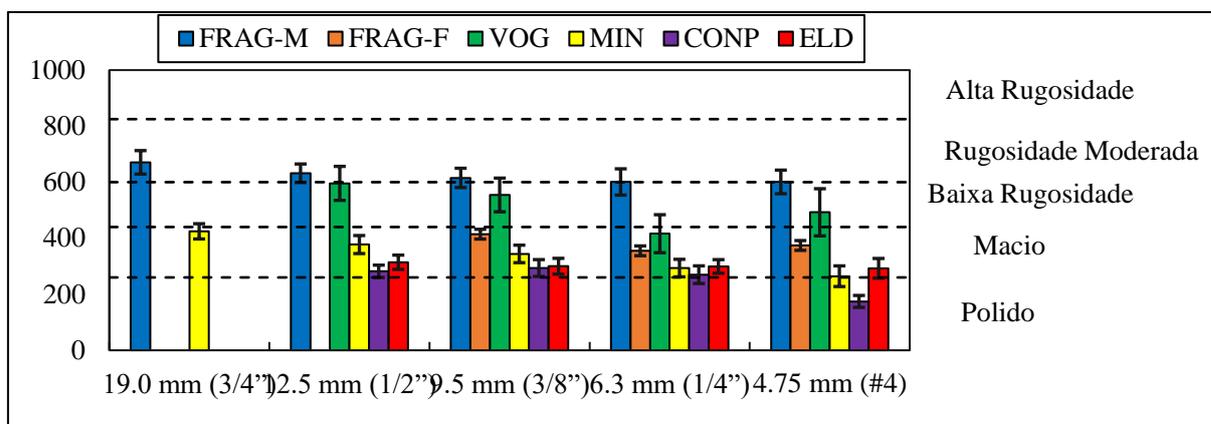


Nota-se uma tendência à medida que diminui o tamanho nominal dos grãos, a esfericidade também diminui. Contudo, a jazida VOG é exceção nesta observação, sendo que houve uma pequena diminuição entre as frações 12,5 e 9,5 mm, porém, a partir da fração 6,3 mm, observa-se, novamente uma pequena elevação.

As jazidas FRAG-M e MIN, apresentaram partículas com esfericidade moderada para a fração 19,0 mm. Este comportamento se manteve para a jazida FRAG-M nas frações 12,5 e 9,5 mm, assim como para a fração 9,5 mm na jazida ELD. De maneira geral, os agregados apresentaram comportamento de baixa esfericidade.

Por fim, na Figura 4-48 é apresentado as médias da textura de cada jazida por fração. No geral, as jazidas apresentaram rugosidade com predomínio no campo “macio”, embora em alguns casos seja observado baixa rugosidade. Ressalta se que todas as jazidas apresentam o mesmo comportamento, à medida diminui a fração, a rugosidade também diminui. Isto já era esperado, à medida que ocorre a redução da fração, significa que, maior será o polimento e, conseqüentemente, menor a rugosidade.

Figura 4-48 - Comparação entre textura superficial média dos agregados por fração.



Entretanto, é notória a influência da textura e composição mineralógica da rocha de origem neste ensaio, pois rochas com textura mais fina (FRAG) apresentam rugosidade mais elevada em comparação as rochas com textura grossa a porfírica (MIN e CONP, respectivamente).

No entanto, cabe ressaltar que, no caso de agregados classificados petrograficamente com textura fina, a interpretação por meio do AIMS ocorre para um conjunto formado por mais de um mineral, o que por ventura melhora o resultado de rugosidade. Já quando rochas mais grosseiras são submetidas ao ensaio, dependendo da fração, se avalia a superfície de um único mineral, que pode ser mais lisa ou polida.

A rugosidade da rocha é bastante importante na aderência entre o agregado e o ligante asfáltico, bem como na aderência entre agregado e pasta de cimento, no caso de concretos. Nos casos em que não são utilizados aglomerantes, por exemplo, em bases de pavimentos, a rugosidade pode intervir no bom intertravamento e, conseqüentemente, no atrito. Portanto, faz-se necessária a avaliação e seleção dos agregados em relação a rugosidade do agregado diante da obra a ser implantada.

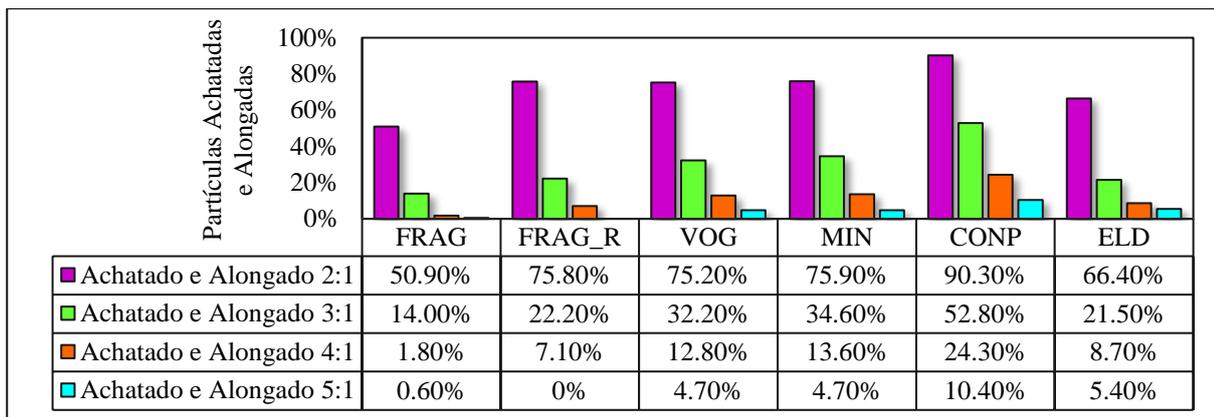
4.2.4.3 Avaliação das partículas achatadas e alongadas através do PDI

Assim como, a normativa ASTM D 4791, que permite averiguar a ocorrência de partículas planas ou alongadas, por intermédio do AIMS, também é possível inferir acerca dessas propriedades, em decorrência da obtenção da razão entre as dimensões do agregado. No Apêndice A5 são apresentadas as distribuições das partículas em relação às razões de achatamento e de alongamento, bem como as linhas que limitam as respectivas razões de

lamelaridade (i.e., razão entre a menor e a maior dimensão de um agregado, ou seja, comprimento e espessura), obtida por intermédio do AIMS.

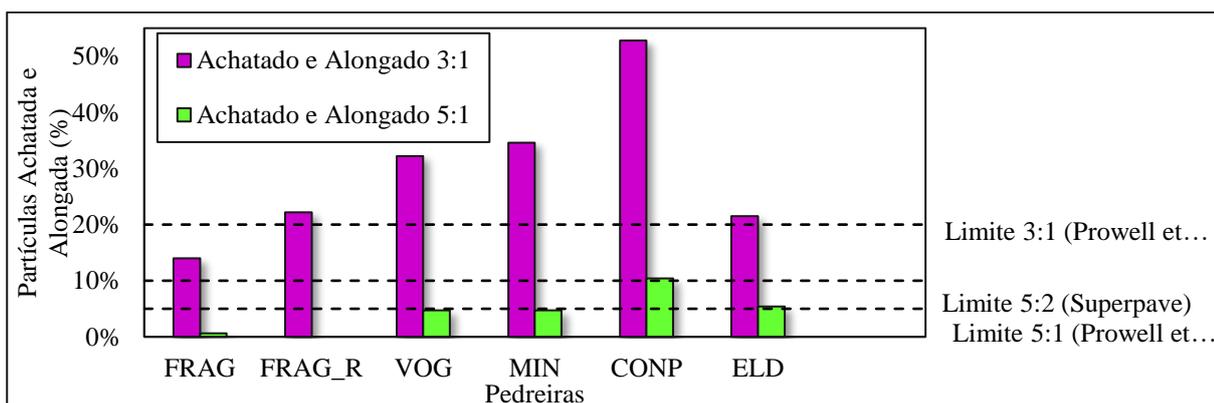
Na Figura 4-49 é apresentado os resultados obtidos da média entre as frações em relação a “achatado e alongado”. A jazida CONP possui agregados com partículas mais achatadas e alongadas em comparação com as demais.

Figura 4-49 - Porcentagem de partículas achatado e alongado pelo AIMS.



Conforme já discutido, as especificações Superpave recomendam como admissível para classificação achatado e alongado limite máximo de 10% na relação 5:1, no caso de aplicação de agregados na produção de misturas asfálticas (GOUVEIA e FERNANDES JR, 2002), no entanto, Cominsky et al (1994) sugerem adição da relação 3:1 na metodologia e, Prowell et al (2005) complementam como limite máximo de 5% para relação 5:1 e de 20% para relação 3:1. Na Figura 4-50 são apresentados apenas os valores para a relação 5:1 e 3:1 com a referência aos limites estipulado na Superpave e Prowell et al (2005).

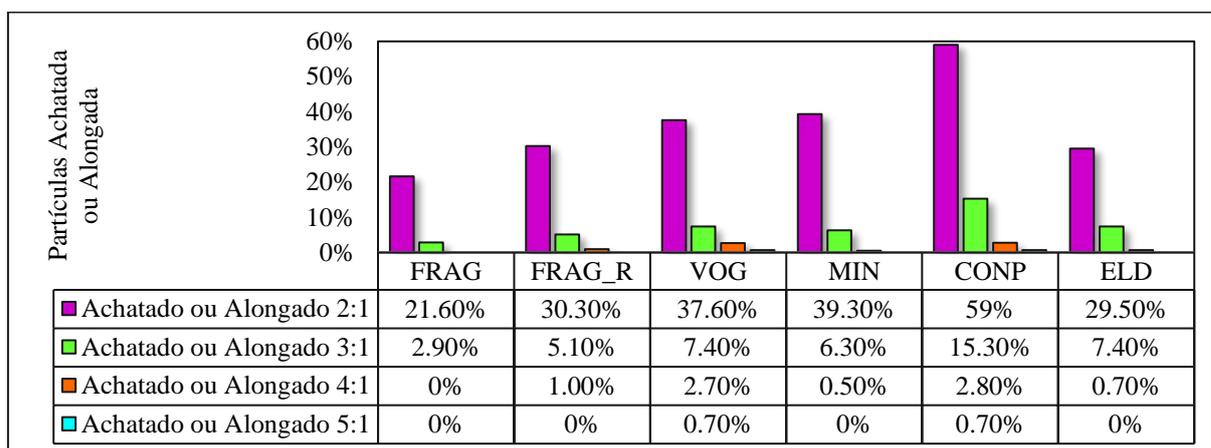
Figura 4-50 - Avaliação de agregados achatado e alongado para as relações 3:1 e 5:1.



Apenas a jazida CONP, para a relação 5:1, apresentou valor acima do limite proposto na classificação Superpave (i.e., limite estipulado 10%). Ao considerar a classificação de Powell et al., (2005) para a relação 5:1, as jazidas FRAG-M, VOG e MIN foram as únicas que apresentaram valor abaixo de 5%, enquanto, para a relação 3:1, apenas a jazida FRAG-M obteve agregados achatados e alongados abaixo de 20%.

Para a classificação “achatado ou alongado” apresentada na Figura 4-51, nota-se que, todas as jazidas apresentam valores abaixo dos limites proposto pela classificação Superpave (i.e., 5:1 máximo de 10%) e por Prowell et al (2005) (i.e., limite máximo de 20% e 5%, para as relações 3:1 e 5:1, respectivamente).

Figura 4-51 – Resultado “Achatado ou Alongado” pelo AIMS.

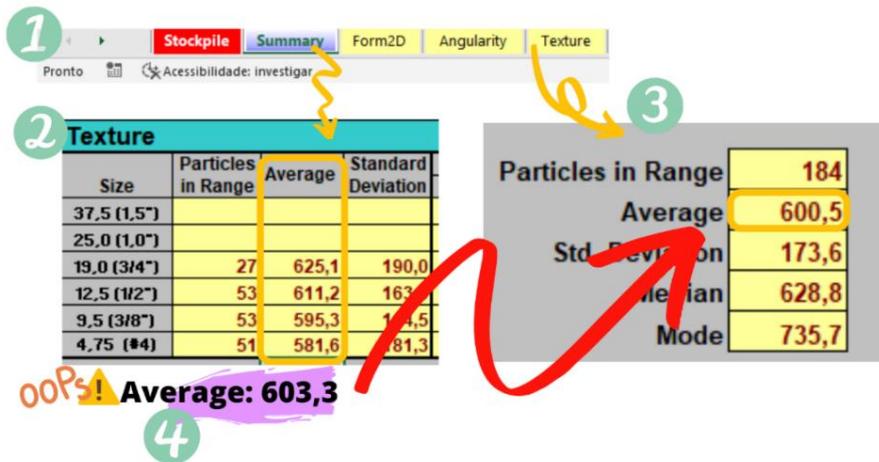


4.2.4.4 Análise Crítica do AIMS

O Processamento Digital de Imagens (PDI) tem sido uma ferramenta bastante utilizada para caracterização das propriedades de forma de agregados (forma, angularidade, esfericidade e textura superficial). Dentre as principais técnicas, a utilizada neste estudo trata-se do AIMS2, que foi realizado na COPPE, os resultados foram repassados por intermédio de uma planilha em formato *Excel* fornecida pelo próprio *software*.

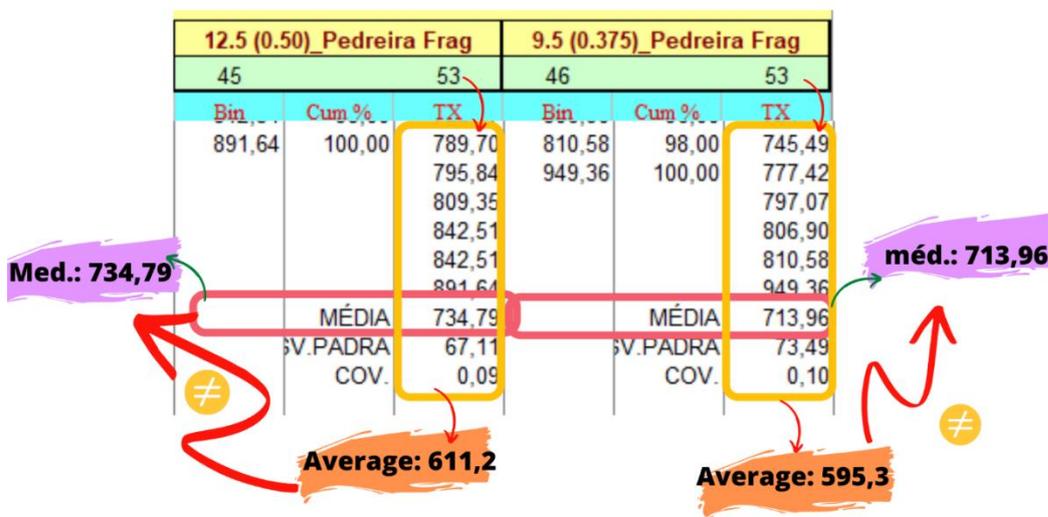
Entretanto, durante a preparação dos dados para realizar as análises, foi observado que a média por fração presente na aba *summary* (Figura 4-52 - 2), apresentava divergência com a média total entre todas as frações ensaiadas (Figura 4-52 - 3). Diante desta inconstância entre os dados, uma análise crítica foi realizada com todas as planilhas fornecidas pelo ensaio, sendo constatado um equívoco, que influenciam na média final de cada ensaio.

Figura 4-52 – Exemplificação das divergências entre a média do AIMS (3) e recalculado (4).



Por tratar-se de uma planilha toda programada disponibilizada pelo próprio *software*, nas abas separadas por ensaios: Forma2D, Angularidade, Textura e Esfericidade, conforme foi apresentado na Figura 4-52 – 1, foi diagnosticado falha na coluna selecionada para obter a média entre as partículas ensaiadas. Na Figura 4-53, pode ser observado que parâmetros estatísticos como: média, desvio padrão e coeficiente de variação calculados para serem inseridas em outra análise (Figura 4-52 – 3) estão sendo integrados no cálculo da média final do AIMS, esse fato foi constatado para todos os ensaios realizado nesta pesquisa.

Figura 4-53 – Exemplificação dos erros 1 e 2 encontrado na planilha do AIMS.



No presente capítulo é discutido o resultado gerado automaticamente pelo programa em comparação ao recalculado utilizando o próprio *Excel*. Além disso, foi aplicado o teste de

análise de variância (ANOVA) com objetivo de determinar se estatisticamente as médias diferem entre si.

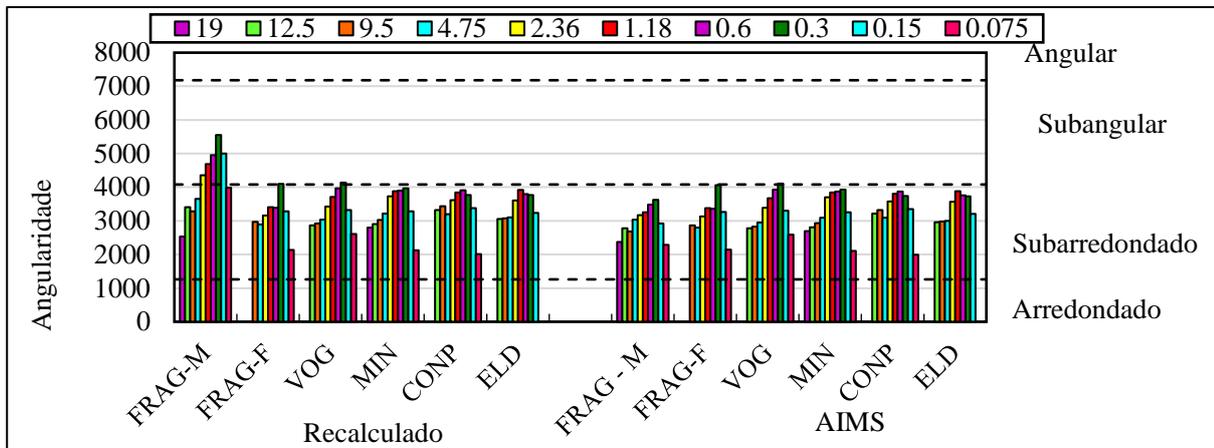
Na Tabela 4-13, são apresentados os resultados da média gerados pelo AIMS, assim como, o recalculado com base nos dados brutos do ensaio de angularidade. No geral, as médias obtidas pelo AIMS para angularidade tendem a ser subestimados (dados em negrito), ou seja, o valor apresentado é inferior os reais (recalculado), embora algumas frações e jazidas apresentem o oposto (dados em negrito com asteriscos), ou seja, a média do AIMS tende a ser maior.

Tabela 4-13 – Média do resultado AIMS e recalculado para o ensaio de angularidade.

Tamanho da partícula	Média	FRAG-M	FRAG-F	VOG	MIN	CONP	ELD
19,0 mm	REC.	2534,45			2795,27		
	AIMS	2370,3			2699,2		
12,5 mm	REC.	3403,23		2867,48	2901,78	3320,51	3053,89
	AIMS	2782,7		2776,8	2806,7	3215,6	2960,1
9,5 mm	REC.	3284,98	2966,05	2919,22	3029,06	3432,46	3072,00
	AIMS	2688,7	2869,7	2826	2927,8	3322,5	2975,8
4,75 mm	REC.	3653,23	2893,11	3039,43	3212,37	3197,48	3098,04
	AIMS	3033,6	2802,1	2947	3092,6	3090,2	3001,6
2,36 mm	REC.	4357,59	3157,25	3421,64	3731,95	3614,66	3607,60
	AIMS	3173,1	3126,8	3389,4	3696,5	3578,1	3571,8
1,18 mm	REC.	4688,44	3404,95	3710,91	3880,77	3844,97	3914,83
	AIMS	3254,3	3373,7	3676,9	3841,8	3809,6	3877,8
0,6 mm	REC.	4951,11	3385,92	3669,56*	3904,50	3909,95	3792,43
	AIMS	3478	3355,9	3930,1	3869,2	3872,3	3757,4
0,3 mm	REC.	5549,66	4097,97	4140,56	3970,24	3770,80	3765,92
	AIMS	3626,1	4060,3	4107,4	3930,9	3736,2	3732,4
0,15 mm	REC.	4998,78	3286,77	3323,09	3280,80	3377,40	3231,97
	AIMS	2921	3262,7	3301,2	3258,8	3350,8	3207,4
0,075 mm	REC.	3983,86	2137,81*	2608,91	2121,00	2012,33	
	AIMS	2287,1	2139,6	2586,8	2102,5	1991,9	

No geral, as diferenças nas médias apresentada pelo AIMS e recalculadas, não representaram alteração quanto classificação, permanecendo como subarredondado (Figura 4-54). Com exceção da jazida FRAG-M que, de acordo com os dados recalculados, entre as frações 2,36 e 0,15 mm, o material apresenta angularidade subangular, segundo classificação proposta por Ibiapina et al., (2020).

Figura 4-54 - Análise estatística para angularidade do ensaio AIMS.



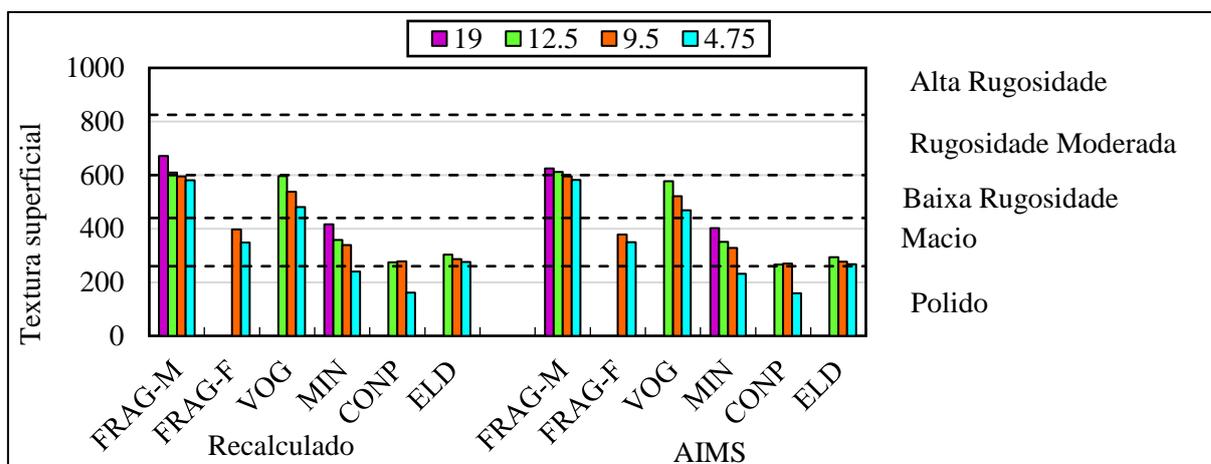
Na Tabela 4-14, são apresentados os resultados das médias geradas pelo AIMS, assim como, o recalculado com base nos dados brutos do ensaio de textura superficial.

Tabela 4-14 - Média do resultado AIMS e recalculado para o ensaio de textura superficial.

Tamanho da partícula	Parâmetros: média	FRAG-M	FRAG-F	VOG	MIN	CONP	ELD
19,0 mm	REC.	670,77			416,77		
	AIMS	625,1			402,3		
12,5 mm	REC.	609,08*		595,76	357,47	274,64	303,46
	AIMS	611,2*		577,5	351,1	265,8	293,7
9,5 mm	REC.	595,68	379,73	537,88	338,72	278,48	286,24
	AIMS	595,3	378	521,5	328,6	269,7	277,3
4,75 mm	REC.	581,22	348,11	481,10	240,12	160,89	275,48
	AIMS	581,6*	349,4*	469,2	231,9	159,6	267,4

De modo geral, a textura apresentada pelo AIMS tende a ser muito próxima do valor calculado ou levemente menor, com exceção apenas para as frações 12,5 mm e 4,75 mm, a jazida FRAG-M e, 4,75 mm para FRAG-F, onde os valores foram maiores. Embora haja divergência entre as médias (recalculada e AIMS), conforme pode ser observado na Figura 4-55, a classificação da textura sofreu pouca alteração, porém não o suficiente para uma nova reclassificação, no geral, o valor da textura acompanha o decréscimo do agregado, ou seja, à medida que a fração diminui menor é o valor da textura superficial.

Figura 4-55 - Análise estatística para textura superficial.



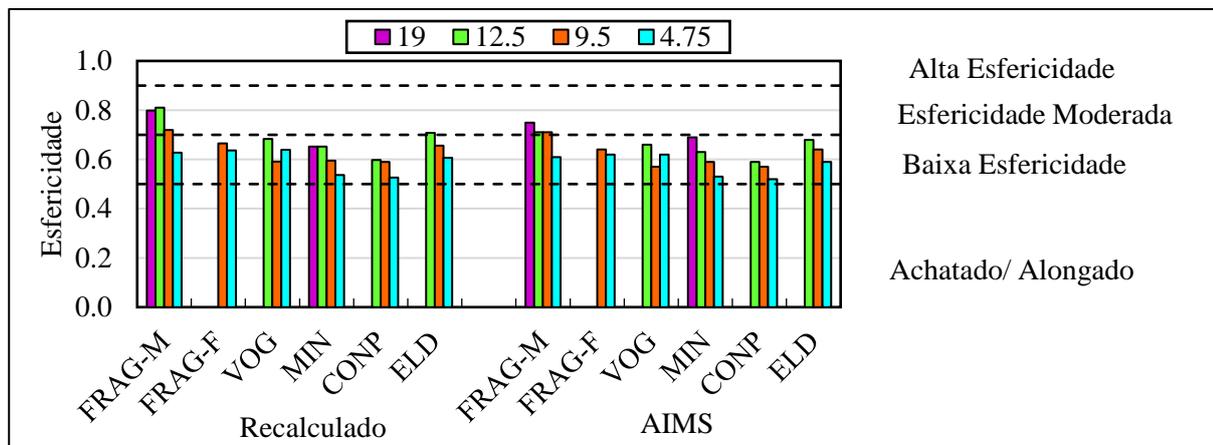
Na Tabela 4-15, são apresentados os resultados da média gerados pelo AIMS, assim como, o recalculado com base nos dados brutos do ensaio de esfericidade.

Tabela 4-15 - Média do resultado AIMS e recalculado para o ensaio de esfericidade.

Tamanho da partícula	Parâmetros: n° de partículas e média	FRAG-M	FRAG-F	VOG	MIN	CONP	ELD
19,0 mm	REC.	0,80			0,65		
	AIMS	0,75			0,69*		
12,5 mm	REC.	0,81		0,68	0,65	0,60	0,71
	AIMS	0,71		0,66	0,63	0,59	0,68
9,5 mm	REC.	0,72	0,66	0,59	0,60	0,59	0,66
	AIMS	0,71	0,64	0,57	0,59	0,57	0,64
4,75 mm	REC.	0,63	0,64	0,64	0,54	0,53	0,61
	AIMS	0,61	0,62	0,62	0,53	0,52	0,59

A média do AIMS para esfericidade resulta em valores subestimados, ou seja, com médias abaixo do real, com exceção apenas para a fração 19,0 mm da jazida MIN, que apresentou um resultado levemente maior. No geral, tanto para os dados calculados pelo AIMS, assim como, as médias recalculadas, os agregados apresentam esfericidade variando de baixa esfericidade a esfericidade moderada, de acordo com a classificação proposta por Ibiapina et al., (2020) (Figura 4-56). Entretanto, os agregados da jazida FRAG-M, para o tamanho de 19,0 mm até 12,5 mm apresentaram esfericidade maior, em comparação ao resultado do AIMS, que influenciou na classificação, ou seja, esfericidade moderada (recalculado) para baixa esfericidade (AIMS).

Figura 4-56 - Análise estatística para esfericidade do ensaio AIMS.



Por fim, na Tabela 4-16 são apresentados os resultados da média gerados pelo AIMS e recalculado com base nos dados brutos do ensaio de forma 2D.

Tabela 4-16 - Média do resultado AIMS e recalculado para o ensaio de forma 2D.

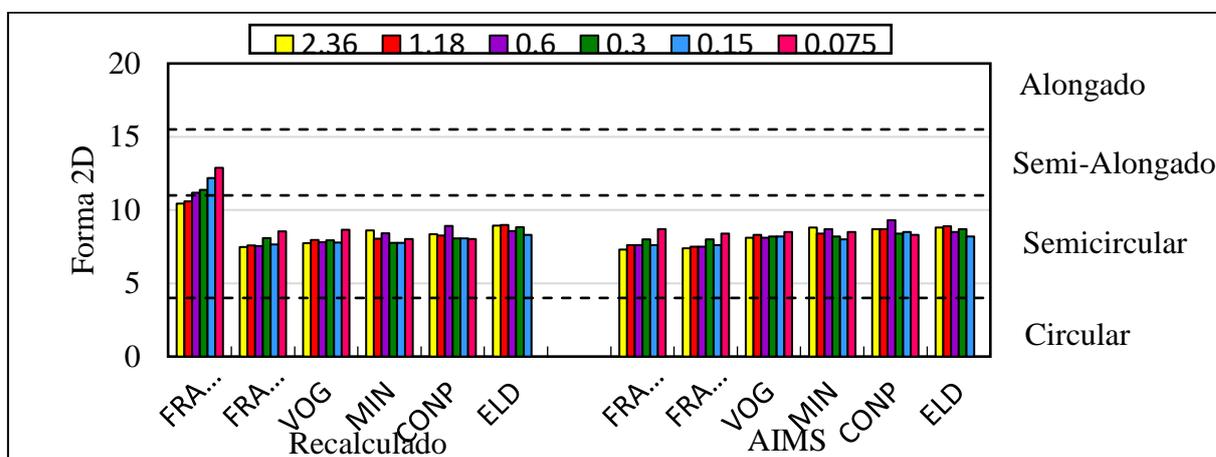
Tamanho da partícula	Parâmetros: nº de partículas e média	FRAG-M	FRAG-F	VOG	MIN	CONP	ELD
2,36 mm	REC.	10,44	7,48	7,74*	8,60*	8,36*	8,94
	AIMS	7,3	7,4	8,1	8,8	8,7	8,8
1,18 mm	REC.	10,59	7,59	7,96*	8,05*	8,27*	8,98
	AIMS	7,6	7,5	8,3	8,4	8,7	8,9
0,6 mm	REC.	11,19	7,54	7,81*	8,42*	8,91*	8,56
	AIMS	7,6	7,5	8,1	8,7	9,3	8,5
0,6 mm	REC.	11,38	8,1	7,93*	7,75*	8,07*	8,82
	AIMS	8	8,0	8,2	8,2	8,4	8,7
0,15 mm	REC.	12,19	7,7	7,78*	7,76*	8,07*	8,31
	AIMS	7,6	7,6	8,2	8,0	8,5	8,2
0,075 mm	REC.	12,89	8,55	8,66	8,02*	8,02*	
	AIMS	8,7	8,4	8,5	8,5	8,3	

No geral, para a forma 2D os agregados das jazidas FRAG-M, FRAG-F e ELD, os resultados das médias do AIMS foram menores do que os calculados, com exceção das jazidas VOG, MIN e CONP, onde a média apresentada é superior ao valor real (recalculado).

Analisando os resultados apresentado na Figura 4-57, de acordo com a classificação proposta por Ibiapina et al., (2020) nota-se que, para as médias apresentadas pelo AIMS, assim como pelo recalculado, apenas as frações entre 0,6 mm e 0,075 mm da jazida FRAG-M,

apresentaram diferença na classificação, passando de semicircular para semi-alongado, a demais, seguem com a classificação de forma 2D como semicircular.

Figura 4-57 - Análise estatística para forma 2D do ensaio AIMS.



Por meio da representação gráfica foi observado que a diferença existente entre a média do AIMS e a recalculada pouco afetou a classificação inicial. Entretanto, verificou-se, por meio do teste ANOVA, para todos os ensaios de forma (angularidade, textura superficial, esfericidade e forma 2D) que estatisticamente as médias apresentam diferença significativa (Tabela 4-17).

Tabela 4-17 – Resultados da análise estatística ANOVA

Tamanho (mm)	Angularidade	Textura	Esfericidade	Forma 2D
	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
19,0	1,0	0,87	0,95	np
12,5	0,18	0,94	0,40	np
9,5	0,16	0,89	1,0	np
4,75	0,08	0,96	0,63	np
2,36	0,26	np	np	0,44
1,18	0,22	np	np	0,56
0,6	0,26	np	np	0,47
0,3	0,25	np	np	0,48
0,15	0,24	np	np	0,43
0,075	0,38	np	np	0,45

np = Não aplicável

No geral, estatisticamente os resultados das médias dos dados recalculados não atenderam ao critério do teste ANOVA, ou seja, apresentaram p-valor superior a 0,05,

mostrando não existir diferença entre as médias. Salienta-se que, o erro possa a vir se agravar se os dados utilizados no cálculo não forem de fato o ensaiado, podendo mascarar os resultados.

Em vista aos resultados apresentados nesta análise crítica ao ensaio AIMS, tais fatos demonstram a importância do rigor metodológico na coleta, execução e no tratamento dos dados, pois conclusões e definições questionáveis podem vir ocorrer devido à incorreta obtenção dos resultados referente a média no AIMS2. Embora, no presente estudo a classificação tenha sido pouco afetada, caso o erro persista, é possível gerar interpretação errôneas quanto a forma do agregado mineral.

4.2.4.5 *Síntese das análises*

Foram realizados ensaios que permitiram avaliar a forma do agregado mineral por meio dos ensaios convencionais laboratoriais e processamento digital de imagem (PDI), sendo este último, foco no presente capítulo no qual cabe destacar alguns pontos importantes aos resultados obtidos.

O ensaio por intermédio do PDI, que vem sendo bastante empregado no âmbito acadêmico. No entanto, merece alguns destaques importantes, pois conforme foi observado e discutido, faz-se necessário cautela durante o preparo, execução e processamento dos dados, pois no presente estudo, as médias presentes nos relatórios divergiram em comparação ao valor real, em alguns casos, subestimando e outros superestimando.

Por conseguinte, nota-se que, por exemplo, a angularidade não mostrou diferença entre as cinco jazidas estudadas. Porém, ao avaliar os agregados miúdos por intermédio da lupa de mesa e o grão à vista desarmada, foram observadas diferenças entre as litologias. Além disso, embora os resultados apresentados para textura superficial variaram entre as jazidas, neste ensaio, deve-se ter como base a forma como o resultado é computado. Ou seja, a imagem refletida para rochas de granulação de média a grossa, muitas vezes, remete resultado com base em apenas uma face do mineral, ou seja, não apresenta de fato, o resultado de todo o agregado. Já para rochas de textura fina, é possível obter como resposta a avaliação de mais de um mineral, sendo um resultado mais representativo.

Portanto, o PDI é um ensaio bastante relevante que, ainda assim, necessita de atenção, visto que as vezes a classificação resultante pode não ser de fato a realidade, podendo acarretar problemas futuros aos projetos a serem empregados.

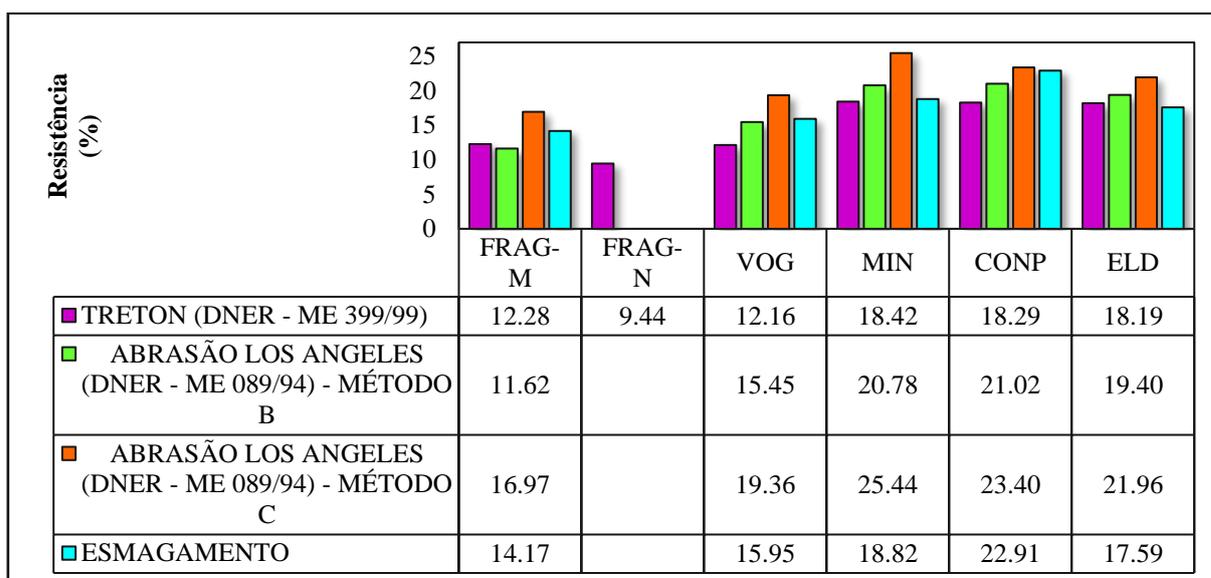
4.2.5 Resistência mecânica

Neste tópico, são apresentados os resultados dos ensaios de abrasão, Esmagamento e de choque (Treton), aos quais foram submetidos os agregados, e, o ensaio de Carga Pontual, feito com amostras de corpos irregulares.

4.2.5.1 Análise de resistência à degradação

A Figura 4-58 mostra os resultados de resistência mecânica. Os materiais ensaiados apresentaram baixo índice de perda de massa, comprovando o bom desempenho rochoso frente à condição imposta.

Figura 4-58 - Resultados dos ensaios de resistência.



Nota-se que os resultados entre as jazidas FRAG-M e VOG, rochas de origem metamórfica, são muito próximas, assim como, entre as jazidas MIN, CONP e ELD, de origem ígnea plutônica. Neste aspecto, observa-se a influência da origem litológica da rocha em relação a resistência do agregado.

O ensaio de impacto Treton, é utilizado para qualificar materiais para lastro. Neste ensaio, a queda sucessiva de um martelo simula situação próxima de carregamentos dinâmicos em ferrovias. A resistência das partículas submetidas à quebra por meio do ensaio de Resistência ao Choque (Treton) está relacionada principalmente a tenacidade de seus minerais, grau de alteração etc. O agregado biotita gnaisse (VOG) com maior quantidade de biotita em

comparação aos demais apresentou maior resistência. Esse fato pode ser explicado pela estrutura em forma de folhas flexíveis e elásticas da biotita (tenacidade classificada como elástico), que pode ser flexionada quando submetido ao choque, porém difícil de ser rompida, tornando-se mais resilientes. Por sua vez, agregados com maior presença de quartzo em relação aos outros, apresentou as maiores perdas de massa e, conseqüentemente, menor resistência (quanto a tenacidade o quartzo é quebradiço).

Por conseguinte, nos ensaios de Abrasão Los Angeles (ALA, método B) e Esmagamento (ESM), as pedreiras apresentaram semelhança na ordem de desgaste, ou seja, as jazidas com menor índice de desgaste em um ensaio, também apresentaram o mesmo comportamento no outro, neste caso, a sequência é crescente na seguinte ordem: FRAG-M (11,62% em ALA e 14,17% em Esmagamento), VOG (15,45 em ALA e 15,95% em Esmagamento), ELD (19,4% em ALA e 17,59% em Esmagamento); MIN (20,78% em ALA e 18,82% em Esmagamento) e, CONP (21,02% em ALA e 22,91% em Esmagamento).

Em relação ao ensaio ALA para o método C, a fração ensaiada é inferior ao método B, entretanto, a perda de massa foi superior ao método B, portanto, pode-se inferir que quanto menor a fração menor será a resistência. Os agregados oriundos das jazidas FRAG-M e VOG demonstram ser materiais mais resistentes, pois apresentam perda por Abrasão Los Angeles de 16,97% e 19,36%, respectivamente. Já os agregados das jazidas MIN, CONP e ELD apresentaram perda acima de 21%.

Entretanto, para ambos os ensaios, ALA e ESM, as maiores perdas de massa para a pedreira VOG (biotita gnaisse) em comparação a FRAG-M (granulito máfico), podem ser atribuídas à elevada presença de biotita, cujos grãos desprendem-se mais facilmente durante o desgaste em relação ao ensaio. Assim como, à elevada presença de quartzo com cataclase, nas rochas de origem ígnea plutônica (MIN, CONP e ELD) tendem a apresentar maior perda de massa devido a menor resistência da rocha com este tipo de textura. Desta forma, pode-se inferir que as rochas graníticas tenderam a ser mais quebradiças em comparação às demais litologias estudadas devido ao tipo de minerais constituintes que são frágeis, o tamanho dos grãos (pórfiros), presença de textura cataclástica e alteração, o que de fato, corrobora com as observações apontadas por Mahmoud (2005).

A presença de pórfiro e megapórfiro descrito na análise petrográfica para a rocha monzogranito pórfiro (CONP) influenciou na perda de massa superior para o método B no ensaio ALA, entretanto, no método C, para esse tipo de rocha, o tamanho da fração britada é do

tamanho do mineral (pórfiro), que de certo modo, reduziu a perda de massa e consequentemente, apresentou maior resistência em comparação a jazida MIN.

Na Tabela 4-18, é apresentado um resumo com os principais limites estabelecidos pelos órgãos viário em relação a aplicação do agregado.

Tabela 4-18 - Limites estabelecidos pelos órgãos viários e ferroviário para os ensaios de resistência mecânica.

Especificações das normativas dos ensaios mecânicos		
Abração Los Angeles“ALA”	Perda do Choque Treton	Resistência ao Esmagamento – “ESM”
$\leq 55\%$ (DNIT ES 30/03) $\leq 50\%$ (DNIT ES 31/06) $\leq 50\%$ (DNIT EM 37/97) $\leq 50\%$ (DNIT ES 152/10) $\leq 40\%$ (DAER ES-P 16/91) $\leq 40\%$ (DAER ES-P 15/91)	25% (NBR 5564, 2014)	$\leq 65\%$ (DNIT EM 37/97) – Sujeito a desgaste superficial $\leq 55\%$ (DNIT EM 37/97) – demais concretos

Observa-se que, para os ensaios ALA e ESM, todas as jazidas apresentam amostras que são utilizáveis para a pavimentação, segundo as normativas em vigor, que exigem valores abaixo de 40% a 50% para ALA e 55% a 65% para ESM. As amostras também atenderam o pressuposto para utilização em obras ferroviárias, conforme apresentado no ensaio de tenacidade – Treton, com valores inferiores a 25%.

De modo geral a jazida FRAG-M apresentou os melhores desempenhos nos ensaios, ALA e ESM, seguida pela pedra VOG. Já as jazidas CONP, MIN e ELD tiveram desempenho inferior. Dentre estas, a jazida ELD deteve melhor desempenho.

Pode se concluir, por meio dos ensaios ALA, ESM e Treton, que, quanto maior a granulometria dos minerais constituintes da rocha, maior o desgastaste. Isso significa que, as amostras que apresentaram uma textura mais grossa tenderam a uma perda relativa superior, fato este já mencionado nos trabalhos de Back (2018) e Remédio (2019). Assim, pode-se inferir que o resultado obtido no ensaio de ALA resulta de uma combinação de características que o agregado apresenta, entre elas: tamanho dos minerais, tenacidade, dureza e estado de alteração.

4.2.5.1.1 Avaliação da degradação

Os ensaios mecânicos são métodos empíricos que expressam a resistência contra fragmentação. Avaliar as propriedades que podem interferir para o bom desempenho é o que motivou as análises que serão apresentadas neste tópico.

Alguns autores analisaram a alteração da forma sofrida antes e após os ensaios mecânicos. Dentre eles, cabe citar Bessa et al., (2011), Araújo (2014) e Trotta (2020), que avaliaram a forma por meio do PDI e, as principais alterações relacionadas a angularidade e esfericidade, Trotta (2020) complementa a avaliação com a interpretação da distribuição granulométrica após os ensaios, notando que, está varia com a degradação sofrida, associada a litologia da rocha.

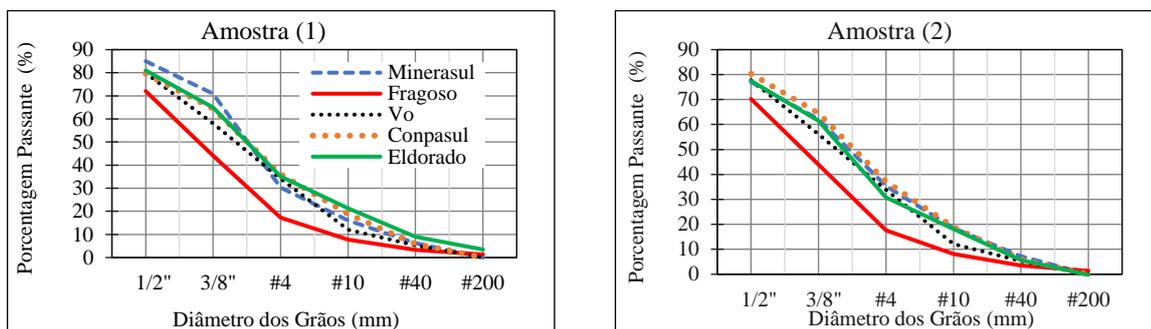
No entanto, devido a limitação existente ao uso do PDI através do AIMS, nesta pesquisa, a avaliação da forma, como meio de verificar a sua influência ou não nos ensaios mecânicos foi realizada através dos ensaios laboratoriais, com uso de métodos tradicionais, sendo eles: crivo redutor (que permite classificar a forma do agregado) e índice de lamelaridade.

Inicialmente são apresentados os dados obtidos na análise granulométrica após os ensaios de Abrasão Los Angeles e Esmagamento, com o propósito de verificar a perda sofrida em relação a massa inicial dos ensaios. Na sequência, são discutidas as análises obtidas com os resultados de forma, posteriormente, os dados referentes a análise estatística.

- Abrasão Los Angeles

Na Figura 4-59 são apresentados os resultados referentes a análise granulométrica após o ensaio de ALA e as curvas granulométricas.

Figura 4-59 - Curva granulométrica após ensaio ALA.



Os resultados obtidos do ensaio ALA mostram que há uma alteração na distribuição granulométrica após o ensaio. De forma geral, as litologias com maior resistência apresentaram menor degradação, conforme pode ser observado na jazida FRAG-M, que obteve maior porcentagem de material graúdo preservado (comparado com a massa inicial), em ambas as

amostragens. Já as litologias graníticas, MIN, CONP e ELD, que apresentaram resistência inferior, têm maior porcentagem de material fino, associado à facilidade na quebra das partículas.

A Tabela 4-19 reúne os resultados do ensaio de ALA, valores relacionados às características iniciais e finais do agregado, como o índice de forma e lamelaridade, características obtidas nas análises petrográficas.

Tabela 4-19 - Resultados do ensaio de resistência – ALA e características das amostras.

Amostra	Jazida	Resultado ALA (a)	Características Iniciais		Características Finais		Análise Petrográfica	
			IL (b)	IF (c)	IL (d)	IF (e)	Granulação (f)*	Alteração (g)**
AM 01	FRAG-M	11,46	26,16	0,94	15,09	0,81	10	1
	VOG	15,22	37,44	0,86	22,45	0,91	15	1
	MIN	21,17	51,08	0,84	21,1	0,87	15	1
	CONP	20,96	50,5	0,71	28,12	0,92	20	2
	ELD	19,44	19,95	0,91	11,43	0,92	15	2
AM 02	FRAG-M	11,78	14,87	0,87	16,96	0,87	10	1
	VOG	15,67	30,2	0,77	25,18	0,93	15	1
	MIN	20,38	34,25	0,74	20,6	0,96	15	1
	CONP	21,09	55,24	0,74	27,36	0,89	20	2
	ELD	19,36	16,86	0,9	9,94	0,96	15	2

* granulação: fina (5); média (10); grossa (15); muito grossa e/ou porfirítica (20),

** Alteração: Não alterada (1); pouco alterada (2); alterada (3); extremamente alterada (4).

Diversos fatores devem ser considerados na análise, o principal trata-se da limitação existente ao utilizar as normativas brasileiras que, por meio de ensaios laboratoriais, permitem avaliar a forma do agregado. Essa avaliação se restringe apenas aos agregados graúdos (ie., frações ½” e ¾”), assim, após o ensaio, não foi possível avaliar a forma dos agregados miúdos gerados.

A análise dos dados mostrou que, no geral, a degradação induzida pelo ALA levou à redução da lamelaridade (IL) e aumento no índice de forma (IF). As análises mostraram que os valores de IF diminuíram em torno de 40%, embora os resultados variem com a jazida e a fração granulométrica. As jazidas CONP e MIN obtiveram redução nos valores de IF acima de 20%.

Esses resultados são coerentes com o tipo de ensaio, visto que, ao longo das 500 rotações, o agregado é submetido ao processo de quebra, polimento e abrasão. Conforme

destacado por Bessa (2012), a Abrasão Los Angeles está relacionada com a perda da angularidade dos agregados. Portanto, a diminuição da lamelaridade implica um aumento do IF, ressaltando-se que, quanto mais próximo de 1, mais cúbica é a forma do agregado. As alterações significativas ocorreram nas amostras das jazidas MIN e CONP, para ambas as amostragens, além de apresentaram os piores resultados no ensaio.

A Tabela 4-20 traz a matriz de correlação entre as variáveis presentes na Tabela 4-19, para fornecer uma visão geral de possíveis relações.

Tabela 4-20 - Matriz de correlações dos resultados do ensaio de resistência ALA.

Parâmetros	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
ALA (a)	1						
IL (b)	0,58	1					
IF (c)	-0,54	-0,68	1				
IL (d)	0,26	0,81	-0,85	1			
IF (e)	0,56	-0,08	-0,41	0,01	1		
Granulação (f)	0,86	0,69	-0,70	0,56	0,56	1	
Alteração (g)	0,58	0,11	-0,13	-0,08	0,35	0,61	1

Com base nos resultados apresentados, o ensaio de ALA mostrou maior coeficiente de correlação para a variável granulação, seguida pelas demais variáveis, índice de forma (IF) e lamelaridade (IL) inicial e grau de alteração da rocha. Nota-se que a lamelaridade inicial (b) mostrou-se mais expressiva em comparação ao índice de forma (c). No entanto, após o ensaio, a lamelaridade (d) apresentou baixa correlação, enquanto o índice de forma (e) continuou apresentando correlação com ALA.

Ao contrário do que se poderia esperar, as propriedades relacionadas a forma (lamelaridade e IF), isoladas, pouco explicam os resultados do ensaio ALA. Diversos fatores devem ser considerados na análise, o principal trata-se da limitação existente ao utilizar as normas brasileiras, pois os ensaios laboratoriais permitem avaliar a forma do agregado apenas para uma faixa granulométrica específica (retido em peneira 6,3 mm). Assim, a avaliação, se restringiu apenas aos agregados graúdos (ie., frações $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{8}$ "") e após o ensaio, não foi possível avaliar a forma dos agregados miúdos gerados.

De posse dos resultados foram realizadas as análises de regressão linear simples, com um nível de confiança de 95%, com a finalidade de propor um modelo matemático capaz de explicar a variável dependente ALA através de variáveis independentes. A primeira relação avaliada, nomeada como regressão A, consistiu em utilizar o ensaio ALA como variável dependente e as variáveis granulação e alteração como independentes. A Tabela 4-21 e Tabela 4-22 apresentam as informações resultantes das regressões lineares.

Tabela 4-21 - Estatística de Regressão ALA.

R múltiplo	R ²	R ² ajustado	Erro padrão	ANOVA: F de significância
0,97	0,94	0,92	1,08	6,09 * 10 ⁻⁵

Tabela 4-22 - Equação de regressão ALA.

Parâmetros estatísticos	Granulação (f)	Alteração (g)
Coefficientes	0,79	-1,71
Estatística t	8.23	-1,70
Valor – P	7,58 * 10 ⁻⁵	0,13
Equação	ALA = -6,27 + 0,80 * Granulação -1,71 * Alteração	

O modelo matemático apresentado, resultada num valor de significância bastante satisfatório (F de significância de 0,02, menor que 0,05). No entanto, ao avaliar separadamente os valores de p de cada variável independente, nota-se que a granulação apresenta maior significância que a variável alteração. Por conseguinte, decidiu-se avaliar, por intermédio de uma regressão linear simples, apenas a granulação como variável independente mantendo a resistência ALA como variável dependente (regressão B), conforme resultados apresentados nas Tabela 4-23 e Tabela 4-24.

Tabela 4-23 - Estatística da regressão B.

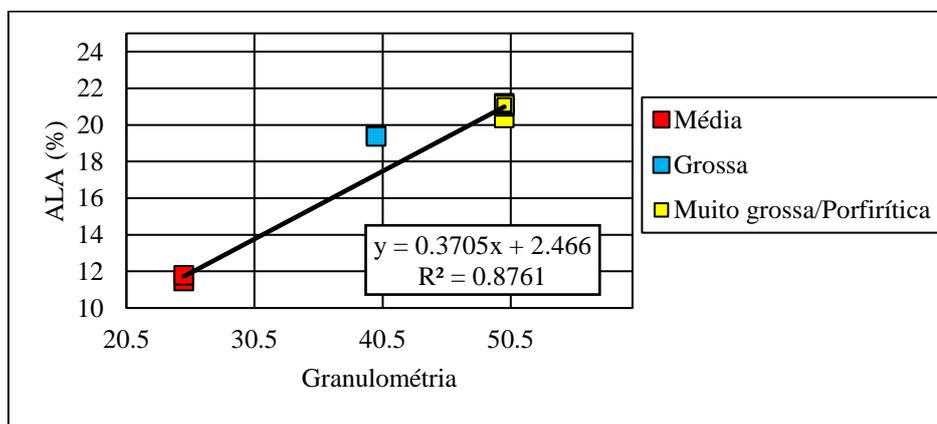
R múltiplo	R ²	R ² ajustado	Erro padrão	ANOVA: F de significância
0,95	0,91	0,90	1,20	1,72 * 10 ⁻⁵

Tabela 4-24 - Equação de regressão B.

Parâmetros estatísticos	Granulação (f)
Coefficientes	0,67
Estatística t	9,08
Valor – P	1,72 * 10 ⁻⁵
Equação	ALA = -4,74 + 0,68 * Granulação

A regressão B apresentou valor de significância inferior a 0,05, neste caso, o modelo matemático tem grande relevância. Para definir qual o melhor modelo matemático, foram comparadas as regressões A e B. Neste caso, faz-se necessário o uso do critério de seleção AIC, desenvolvido por Akaike (1973), através do qual admite-se a existência de um modelo “real” desconhecido que descreve os dados, e tenta-se escolher, dentre um grupo de modelos avaliados, o que minimiza a divergência. Neste critério, o menor valor de AIC corresponde ao melhor modelo a ser utilizado. Dessa forma, ao realizar essa análise no programa R, a regressão A apresentou valor de 57,40, enquanto a regressão B resultou em 48,94, portanto, pode-se afirmar que, a regressão B é o melhor modelo. Na Figura 4-60 é representado o gráfico de regressão linear simples obtido pelo modelo B.

Figura 4-60 - Gráfico da regressão linear com o modelo matemático gerado pela regressão B.



Por fim, na regressão C, buscou-se avaliar a influência da forma (IF e IL) como pressuposto em gerar um modelo matemático que fosse capaz de ter relação com o desempenho mecânico ALA, pois, conforme apresentando na matriz de regressão, ambos obtiveram correlação acima de 0,5. Nas Tabela 4-25 e Tabela 4-26 são apresentados os resultados obtidos com a análise estatística.

Tabela 4-25 - Estatística da regressão C.

R múltiplo	R ²	R ² ajustado	Erro padrão	ANOVA: F de significância
0,613	0,376	0,20	3,41	0,190

Tabela 4-26 - Equação de regressão C.

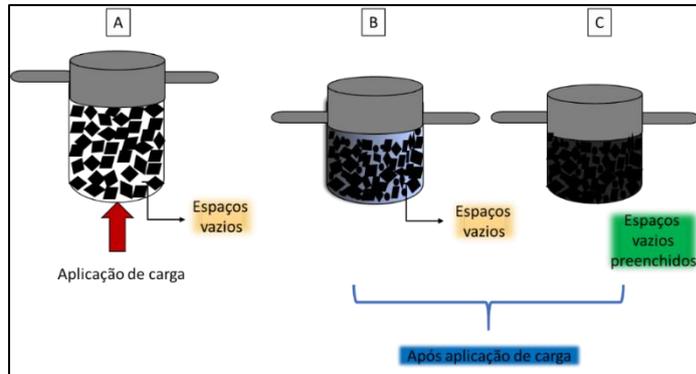
Parâmetros	IL (inicial)	IF (inicial)
Coefficientes	0,10	-12,88
Estatística t	0,97	-0,68
Valor – P	0,366	0,519
Equação	$ALA = 24,9 + 0,10 * IL - 12,88 * IF$	

As variáveis independentes IF e IL não apresentaram um modelo matemático significativo (p -valor > 0,05) que permita de fato, explicar a variável dependente ALA. Desta forma, compreende-se que embora no ensaio o agregado sofra mudança de forma, essa característica sozinha não explica o desempenho do material em relação a abrasão.

- Esmagamento

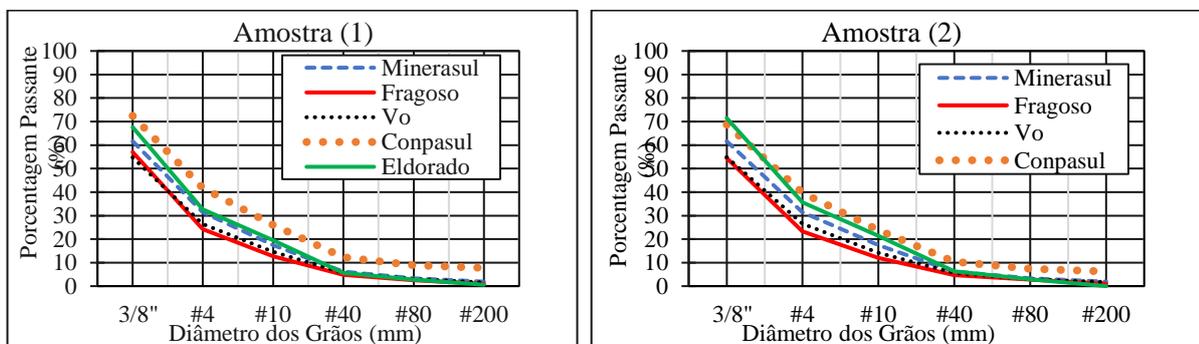
Antes de avaliar os resultados obtidos por intermédio do ensaio de Esmagamento, faz-se necessário observar alguns fatores previamente da aplicação da carga. Diferentemente do ensaio anterior, neste, a existência da forma implica para o bom intertravamento entre os agregados, que conseqüentemente, apresentam um certo índice de vazios. No final do ensaio, os espaços vazios passam a ser ocupados pelo material quebrado durante o ensaio. A Figura 4-61 ilustra as etapas do ensaio de Esmagamento.

Figura 4-61 - Ilustração do procedimento do ensaio de Esmagamento, A) antes do ensaio; B) resultado após a aplicação da carga e com espaços vazios entre os agregados, e, C) resultado após a aplicação da carga, com espaços vazios preenchidos por agregado fino.



Na Figura 4-61-A, é retratada a influência da forma do agregado para o bom intertravamento e, conseqüentemente, para a geração dos espaços vazios. Na sequência, são apresentados dois exemplos possíveis da etapa final do ensaio. No primeiro caso (Figura 4-61 B), após a aplicação da carga, ainda pode ser observada a influência da forma, pois, embora o agregado sofra quebra e conseqüente, geração de material fino, ainda assim, há espaços vazios. No segundo caso (Figura 4-61 C), o agregado sofreu quebra significativa e, conseqüentemente, partículas menores preencheram todos os espaços existentes entre os agregados. Ressalta-se que, ao reduzir a quantidade de vazios, em decorrência da aplicação da carga e conseqüente, quebra dos agregados, pressupõe-se que a amostra terá uma composição mais homogênea, com material fino preenchendo os vazios, conforme apresentando na Figura 4-61 C. Diante do exposto, a Figura 4-62 ilustra as curvas granulométricas obtidas após o ensaio de Esmagamento.

Figura 4-62 - Curva granulométrica após ensaio de Esmagamento.



Analisando a perda do material em relação à massa inicial utilizada (i.e., levando em consideração a porcentagem de material retido na peneira de 9,5 mm), detectou-se que, as jazidas FRAG-M e VOG apresentam maior porcentagem de material preservado. Já as rochas graníticas, assim como no ensaio ALA, detêm maiores porcentagens em material fino. Portanto, de forma geral, as litologias com maior resistência apresentaram menor degradação (FRAG-M e VOG), o oposto também é verdadeiro, ou seja, maior degradação resultou em elevada perda de material.

Na Tabela 4-27 são apresentados os resultados antes e após o ensaio de Esmagamento. Conforme já mencionado anteriormente, existem limitações na avaliação de forma e lamelaridade, portanto, os resultados apresentados após o ensaio correspondem somente aqueles retidos na peneira de 9,5 mm (fração $\frac{3}{8}$ ").

Tabela 4-27 - Resultados do ensaio de resistência – Esmagamento e características das amostras.

Amostra	Jazida	ESM (a)	Características Iniciais			Características Finais			Análise Petrográfica	
			IL (b)	IF (c)	Vazios (d)	IL (e)	IF (f)	Vazios (g)	Granulação (h)*	Alteração (i)**
AM 01	FRAG-M	14,7	6,8	0,9	51,13	2,22	0,47	16,6	10	1
	VOG	16,2	14,5	0,7	52,87	3,51	0,45	14,8	15	1
	MIN	18,7	15,2	0,8	52,61	3,98	0,46	18,22	15	1
	CONP	23,6	12,31	0,8	52,29	3,65	0,95	14,84	20	2
	ELD	17,4	25,7	0,6	55,33	9,96	0,89	15,51	15	2
AM 02	FRAG-M	13,6	6,5	0,9	50,9	2,23	0,49	17,16	10	1
	VOG	15,9	14,2	0,7	52,83	4,00	0,45	14,69	15	1
	MIN	18,9	12,6	0,8	52,22	5,11	0,47	16,8	15	1
	CONP	22,2	10,7	0,8	51,97	3,95	0,95	15,37	20	2
	ELD	17,8	22,9	0,6	54,65	7,76	0,93	14,33	15	2

*Granulação: fina (5); média (10); grossa (15); muito grossa e/ou porfirítica (20),

** Alteração: Não alterada (1); pouco alterada (2); alterada (3); extremamente alterada (4).

Verifica-se que todas as jazidas apresentaram perda de vazios, uma vez que, durante o processo de degradação das amostras, as partículas sofrem quebra, devido ao acúmulo de dano sofrido durante a aplicação de carga. Em relação à forma, nota-se que, cada litologia apresentou comportamento diferente. As jazidas FRAG-M, VOG e MIN apresentaram redução no IF, porém, as jazidas CONP e ELD apresentaram aumento na cubicidade das partículas em relação

a forma inicial. Por sua vez, nos ensaios de lamelaridade, todas as jazidas exibiram redução na porcentagem de partículas lamelares.

Vale ressaltar que, a pedreira CONP obteve o menor índice de vazios, no entanto, deteve maior IF seguido pelo valor mais elevado na perda de lamelaridade. Subtende-se que, após a aplicação da carga, além da quebra, a fração $\frac{3}{8}$ " (9,5 mm) tendeu a uma forma mais cúbica, podendo associar bom intertravamento dos agregados, além de ter os espaços vazios preenchidos pelo material fino da degradação. Por outro lado, a jazida FRAG-M apresentou menor alteração na lamelaridade, porém, maior queda no IF, portanto, pressupõe-se que, a degradação sofrida pelo agregado após a aplicação da carga, pode ter acarretado o desempenho do intertravamento do material.

A Tabela 4-28 resulta na matriz de correlação entre as variáveis presentes na Tabela 4-27.

Tabela 4-28 - Matriz de correlações dos resultados do ensaio de resistência ALA.

Parâmetros	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
ESM (a)	1								
IL (b)	0,13	1							
IF (c)	-0,08	-0,94	1						
Vazios (d)	0,12	0,99	-0,96	1					
IL (e)	0,14	0,94	-0,84	0,94	1				
IF (f)	0,66	0,46	-0,42	0,48	0,54	1			
Vazios (g)	-0,24	-0,40	0,64	-0,47	-0,33	-0,53	1		
Granulação (h)	0,88	0,35	-0,24	0,30	0,35	0,49	-0,00	1	
Alteração (i)	0,65	0,53	-0,48	0,54	0,58	0,99	-0,54	0,49	1

Observa-se que a resistência ao ensaio de Esmagamento está atrelada aos dados obtidos por intermédio de análise petrográfica, mineralogia, granulação dos minerais (textura da rocha) e alteração, semelhante ao ensaio ALA. Ao contrário do que se esperava, as propriedades relacionadas à forma inicial (lamelaridade e índice de forma), isoladas, assim como índice de vazio, não foram suficientes para explicar os resultados do ensaio. No entanto, a correlação entre as variáveis forma e índice de vazios, é bastante significativa.

Com base na correlação, foram realizadas análises de regressões lineares, com um nível de confiança de 95%, utilizando as variáveis que indicaram melhores coeficientes de correlação. A regressão nomeada por A tem como variável dependente ALA, e como variáveis independentes a granulação e alteração. A Tabela 4-29 e a Tabela 4-30 mostram os resultados obtidos.

Tabela 4-29 - Estatística da regressão A.

R múltiplo	R ²	R ² ajustado	Erro padrão	ANOVA: F de significância
0,912	0,83	0,79	1,45	0,002

Tabela 4-30 - Equação de regressão A.

Parâmetros estatísticos	Granulação (d)	Alteração (e)
Coefficientes	0,38	1,71
Estatística t	4,18	1,59
Valor – P	0,004	0,155
Modelo	ALA = 2,65 + 0,38 * Granulação + 1,71 * Alteração	

Na regressão multivariada A, os dados apresentam um modelo matemático que apresenta uma grande significância (p-valor < 0,05). No entanto, a variável granulação apresenta mais significância em comparação à variável textura. Neste caso, optou-se por realizar uma regressão simples apenas com a variável granulação (regressão B). A Tabela 4-31 e a Tabela 4-32 ilustram os resultados estatísticos obtidos.

Tabela 4-31 - Estatística da regressão B.

R múltiplo	R ²	R ² ajustado	Erro padrão	ANOVA: F de significância
0,88	0,77	0,74	1,58	0,0008

Tabela 4-32 - Equação de regressão B.

Parâmetros estatísticos	Textura (j)
Coefficientes	0,45
Estatística t	5,21
Valor – P	0,0008
Modelo	ALA = 2,65 + 0,45 * Granulação

A regressão B apresentou valor de significância (valor -p < 0,05), neste caso, 77% da variável granulação consegue explicar a variável dependente, ESM. Porém, faz-se necessária a

verificação de qual modelo matemático melhor representa o ensaio de degradação ESM. Assim, confrontando os valores de AIC, observa-se que, a regressão A resultou num valor de 40,27, por sua vez, a regressão B obteve 41,36, portanto, o melhor modelo consiste em fazer uso dos dados apresentados na regressão A, empregando as duas variáveis independentes, granulação e alteração.

4.2.5.1.2 Síntese das análises

Para os diferentes ensaios de avaliação da resistência mecânica dos agregados, todas as jazidas apresentaram resultados que permitem a sua aplicação para fins de pavimentação. Por conseguinte, nota-se que as jazidas FRAG-M e VOG apresentam os melhores resultados em comparação às jazidas de origem graníticas, MIN, CONP e ELD.

Na avaliação aplicada com propósito de verificar as propriedades que interferem na resistência mecânica, nota-se que, independente do ensaio (ALA ou ESM) a textura da rocha apresentou grande influência, resultado que corrobora com observações já mencionadas nos trabalhos desenvolvidos por Kazi e Al- Mansour (1980), Alves (2014), Nagali et al (2016), Remédio (2017), Back (2018) e Curtis (2019). Desta forma, foram gerados dois modelos matemáticos com nível de confiança de 95% para o ensaio de ESM que permitiram associar a resistência mecânica das rochas analisadas às suas propriedades petrográficas, granulação (textura) e alteração.

Por fim, em relação a alteração sofrida na forma entre os ensaios de resistência mecânica, foi constatado que os agregados após ALA apresentaram forma mais cúbica, porém, no Esmagamento, por induzir a quebra das partículas através da compressão, houve diminuição no IF. Além disso, nota-se que o ensaio Esmagamento, gera maior perda de material em relação ao seu peso inicial, por conseguinte, apresenta maior porcentagem de finos.

4.2.6 Compressão Puntiforme (Uniaxial)

O ensaio de carga pontual é um método empírico utilizado para estimar a resistência à compressão das rochas. Os valores correspondentes ao respectivo ensaio, obtidos nas condições seca ao ar e saturada, juntamente com a razão entre ambas as condições, estão apresentados na Tabela 4-33. O valor da resistência a compressão puntiforme, foi obtido por meio da média

aritmética dos dados, desprezando os dois valores superiores e inferiores para cada condição de ensaio, conforme ISRM (1985).

Tabela 4-33 - Resultado da compressão puntiforme calculado conforme normativa ISRM (1985).

Jazida	Is (50) seco	Is (50) saturado	Is (50) Sat / Is (50) Seco
FRAG-M	6,91	6,89	0,99
VOG	10,48	9,32	0,88
MIN	10,60	10,26	0,97
CONP	3,81	3,39	0,89
ELD	3,40	3,21	0,94

Como pode ser constatado, os fragmentos na condição seca ao ar obtiveram resistências mecânicas superiores aos fragmentos na condição saturada. No entanto, a pouca diferença entre os resultados, conforme apresentado na relação Is (50) sat/ Is (50) seco, pode ser justificada pela não saturação apropriada dos fragmentos irregulares (Figura 4-63).

Figura 4-63 - Amostra submetida ao ensaio de Carga Pontual após 30 dias de saturação.



A) Amostras ELD



B) Amostra da jazida CONP



C) Amostra da jazida FRAG-M

As jazidas ELD e CONP, embora sejam rochas de origem graníticas, com grande concentração de minerais de alta dureza como quartzo e feldspatos, apresentaram valores bastante inferiores em relação às demais jazidas. De acordo com a análise petrográfica, foi apontado processos de alteração para essas jazidas, portanto, a baixa resistência em comparação às demais jazidas, está em acordo com o observado em campo e confirmado em laboratório, através da descrição petrográfica. Contribuem para isso a textura cataclástica que representam

uma “fraqueza” da rocha associada a fraturas e quebras dos minerais constituintes, conforme pode ser observado pelos valores inferiores entre as jazidas FRAG-M, CONP e ELD.

Assim como nos ensaios de resistência a ALA, ESM e Treton, a resistência a carga pontual é influenciada pela textura e pela estrutura da rocha. Rochas de grão fino, médio ou grosseiro, de um mesmo tipo petrográfico, possuem resistência crescente, respectivamente. Desta forma, Lamaguti (2001), argumenta que rochas equigranulares são mais resistentes do que as rochas inequigranulares ou porfíricas. De fato, a jazida CONP, de textura porfírica, apresentou desempenho mecânico inferior às jazidas FRAG-M, VOG e MIN, porém, a jazida ELD, mostrou o pior resultado em comparação as demais. Neste caso, além da textura e estrutura da rocha, o grau de alteração é relevante a ser avaliado.

Para Arnold (1993), as rochas de origem vulcânica, apresentam um valor aceitável da razão I_s (50) após imersão e o I_s (50) seco ao ar, num valor de 0,7. De acordo com os estudos realizados, rochas que atendem essa relação apresentam como indicativo um material com esqueleto mineral capaz de resistir às forças internas em decorrência da expansão dos argilo-minerais. A presença de água pode ocasionar a expansão desses minerais e, conseqüentemente, levar a expansão e degradação da rocha. No entanto, para as rochas plutônicas não foi encontrado até o presente momento nenhum trabalho sobre esta temática.

De acordo com os estudos de Deere (1966) e Bieniawski (1984), é possível classificar o resultado de compressão puntiforme das amostras na condição seca ao ar variando entre “extremamente alto” a “extremamente baixo”, conforme apresentado na Tabela 4-34.

Tabela 4-34 - Classificação para compressão puntiforme.

Classificação	Deere (1966)	Bieniawski (1984)
Extremamente alto	$I_s > 10$ Mpa	$I_s > 8$ Mpa
Alto	$I_s = 5 - 10$ Mpa	$I_s = 4 - 8$ Mpa
Médio	$I_s = 2,5 - 5$ Mpa	$I_s = 2 - 4$ Mpa
Baixo	$I_s = 1,25 - 2,5$ Mpa	$I_s = 1 - 2$ Mpa
Extremamente Baixo	$I_s < 1,25$ MPa	$I_s < 1$ Mpa

Fonte: adaptado de Palmström, 1995.

Assim as jazidas VOG e MIN foram classificadas como “extremamente alto”, seguida pela FRAG-M, com “alta resistência”, e as demais, CONP e ELD, no intervalo de “média resistência”, de acordo com os critérios estabelecidos por Deere (1966).

Para a realização do ensaio puntiforme há a exigência de amostras de forma tabular. Nas amostras VOG e MIN, por apresentarem grande quantidade de biotita, a forma tabular é

representada pela orientação destes minerais e a carga do ensaio é aplicada perpendicular a este “pacote” de biotitas, o que explicaria a maior resistência para este tipo de material.

4.2.6.1 Análise estatística: Compressão Puntiforme (uniaxial)

Conforme apresentado na metodologia e ressaltado no item anterior (4.2.6), a obtenção do resultado de compressão puntiforme (uniaxial) leva em consideração a média aritmética desconsiderando os dois valores superiores e inferiores. Partindo desta observação o objetivo do presente item consistiu em verificar se, de fato, do ponto de vista estatístico, há influência dos valores extremos superiores e inferiores no índice de resistência da carga pontual final, assim como, se esses dados podem ser considerados outliers, isto é, valores individuais atípicos que distorcem os valores de tendência central e de dispersão.

Na Tabela 4-35 são apresentados os resultados do teste Shapiro – Wilk (S-W) com grau de confiança de 95% (nível de significância (α) de 5%), com objetivo de verificar se os dados estudados apresentam uma distribuição normal, pré-requisito para empregar o teste t de *Student*.

Tabela 4-35 - Resultado do teste Shapiro – Wilk (S-W).

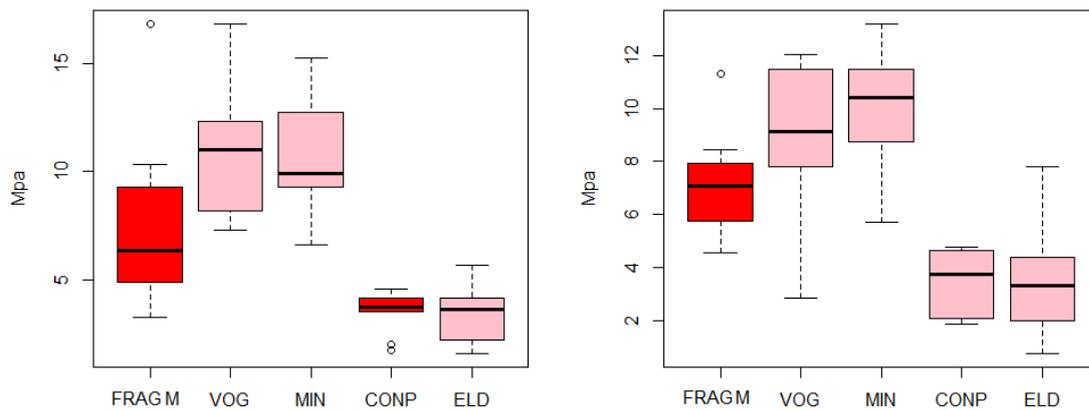
Valores utilizados	Condição da amostra	Jazida	Média	Mediana	Desvio padrão	Valor máximo	Valor mínimo	Teste de Shapiro Wilk (p-valor)
Desconsiderando valores superiores e inferiores	Seca ao ar	FRAG -M	6,91	6,36	1,73	9,27	4,9	0,420
		VOG	10,48	11	1,78	12,33	8,17	0,224
		MIN	10,59	9,91	1,45	12,75	9,27	0,106
		CONP	3,81	3,75	0,28	4,17	3,52	0,196
		ELD	3,53	3,61	1,35	5,68	1,58	0,870
	Imersão por 30 dias	FRAG -M	6,89	7,09	0,89	7,94	5,73	0,476
		VOG	9,31	9,11	1,33	11,47	7,79	0,624
		MIN	10,26	10,41	0,97	11,47	8,74	0,883
		CONP	3,39	3,73	1,02	4,65	2,08	0,320
		ELD	3,22	3,28	1,07	4,37	1,98	0,172
Com todos os dados	Seca ao ar	FRAG -M	7,60	6,36	3,97	16,85	3,27	0,128
		VOG	11,05	11	3,44	16,85	7,28	0,200
		MIN	10,66	9,91	2,67	15,29	6,60	0,887
		CONP	3,55	3,75	0,95	4,56	1,76	0,039*
		ELD	3,39	3,61	1,21	5,68	1,58	0,757
	Imersão por 30 dias	FRAG -M	7,04	7,09	1,98	11,30	4,56	0,498
		VOG	8,94	9,11	2,75	12,03	2,82	0,244
		MIN	10,03	10,41	2,10	13,20	5,72	0,836
		CONP	3,37	3,73	1,2	4,78	1,84	0,055
		ELD	3,50	3,28	2,07	7,81	0,74	0,551

*não apresenta distribuição normal

Nota se que, apenas a pedreira CONP na condição seca ao ar rejeitou o teste de normalidade Ho ($\text{sig} < 0,05$), já para condição saturada, todas as jazidas apresentam distribuição normal. Para a avaliação dos dados utilizou-se os gráficos de *Boxplot* (Figura 4-64), para as duas condições das amostras: (seca ao ar e saturada), com o propósito de verificar a ocorrência de *outliers* e visualização da distribuição dos dados.

A jazida FRAG-M apresentou *outliers* superior nas duas condições ensaiadas, conforme apresentando na Figura 4-64, através do *boxplot* em vermelho para ambas as condições, seca ao ar e saturada. Em adição, a jazida CONP obteve *outliers* inferior apenas na primeira condição, conforme ressaltado na Figura 4-64 A, com *boxplot* em vermelho.

Figura 4-64 - Gráficos de Boxplot para o ensaio de carga pontual na condição a) seca ao ar e b) saturada.



Na Tabela 4-36 são apresentados os valores de *outliers*, assim como, os valores máximos e mínimos descartados do cálculo na média aritmética, para as jazidas FRAG-M e CONP, conforme ISRM (1985).

Tabela 4-36 - Valores de *outliers* em comparação com os superiores e inferiores.

Parâmetros	Condição Seca ao ar		Condição Saturada
	FRAG	VOG	FRAG
Outliers	4,9	4,17	11,30*
Outliers	-	3,52	-
Valor máximo (1)**	16,85	4,56	11,30*
Valor máximo (2)**	10,35	4,39	8,44
Valor mínimo (1)**	3,27	1,76	4,78
Valor mínimo (2)**	4,07	2,00	4,56

Valores a serem descartados, com base na análise estatística

Valores que devem ser descartados, conforme ISRM (1985)

*valor considerado *outliers* com base na análise estatística; **valores considerados superiores e inferiores, dentro das 20 amostras ensaiadas, que foram descartados no cálculo final do índice de carga pontual.

Com exceção da FRAG-M (condição saturada), os *outliers* divergem dos valores descartados no cálculo de índice de carga pontual, conforme requerido na norma ISRM (1985). Portanto, considerando um grau de confiança de 95%, conclui-se que, os valores descartados para obtenção do resultado de resistência mecânica, não são considerados de fato *outliers*, com exceção da jazida FRAG-M, conforme discutido acima.

Diante do exposto, antes de aplicar o teste *t de Student*, foram descartados do banco de dados os valores apontados como outliers. Na Tabela 4-37, são apresentados os resultados do respectivo teste.

Tabela 4-37 - Resultado obtido com o teste *t de Student*.

Parâmetros	Seca ao ar					Imersão por 30 dias				
	FRAG-M	VOG	MIN	CONP	ELD	FRAG-M	VOG	MIN	CONP	ELD
t	0,64	0,44	0,06	-0,83	-0,22	0,21	-0,36	-0,28	-0,04	0,37
df	11,54	13,86	13,95	8,33	9,76	13,35	13,66	13,47	12,10	13,86
p-value/*	0,53	0,67	0,95	0,42	0,83	0,87	0,72	0,78	0,97	0,72

*se $p \leq 0,05$, rejeita-se H_0 (aceita a hipótese alternativa);

* se $p > 0,05$, não se rejeita H_0 (aceita a hipótese nula)

Observa-se que, em todos os casos analisados, a hipótese nula não é rejeitada ($p > 0,05$). Por conseguinte, com um nível de confiança de 95%, não há diferença em descartar os valores superiores e inferiores para aferir a resistência a compressão da rocha e, sim, apenas os valores considerados de fato *outliers*. Portanto, na Tabela 4-38, são apresentados os novos valores da

resistência a compressão puntiforme, calculados após a análise estatística, comparando com os valores calculados conforme normativa ISRM (1985).

Tabela 4-38 - Resistência a compressão puntiforme conforme ISRM (1985) e após análise estatística dos dados.

Parâmetros	Jazidas	Is(50) – Seco	Is(50) – Sat	Is(50) – Seco/ Is(50) - Sat
Conforme ASTM (1985)	FRAG-M	6,91	6,89	1
	VOG	10,48	9,32	0,88
	MIN	10,6	10,26	0,97
	CONP	3,81	3,39	0,89
	ELD	3,4	3,21	0,94
Após análise estatística	FRAG-M	7,9	6,56	0,83
	VOG	11,05	8,94	0,81
	MIN	10,66	10,03	0,94
	CONP	3,48	3,37	0,97
	ELD	3,39	3,5	1,03

De acordo com os resultados apresentados, nota-se que, em alguns casos, fazer o uso da média aritmética de acordo com normativa ISRM (1985) pode estar gerando subestimação ou superestimação. Conforme pode ser constatado nas jazidas FRAG-M, VOG e MIN, na condição seca ao ar, os dados calculados seguindo a norma são menores que o valor real (subestimativa). Já com os resultados de CONP e ELD (condição seca ao ar), os dados calculados seguindo a norma são superiores ao valor real, ou seja, temos a superestimação. Para a condição saturada, as jazidas FRAG-M, VOG, MIN e CONP apresentam subestimação e apenas ELD superestimação, fato que, posteriormente, reflete na relação $Is_{(50) \text{ sat}} / Is_{(50) \text{ seco}}$, ou seja, as jazidas FRAG-M, VOG, MIN apresentam subestimação e as jazidas CONP e ELD superestimação.

4.2.6.2 Síntese da Análise

As rochas na condição saturada apresentaram menor resistência a compressão puntiforme do que as secas ao ar. No entanto, essa relação só foi possível em virtude do tempo de saturação empregado no estudo ter sido superior ao previsto na norma ISRM (1985), quando comparados ao de Back (2018). Portanto, o tempo de saturação antes da realização do ensaio é um fator a ser questionado e deve considerar o tipo de rocha.

Além disso, a não existência de um parâmetro aceitável para a relação $Is(50) \text{ sat}/Is(50) \text{ seco}$ para as rochas plutônicas torna difícil avaliar e caracterizar se os dados apresentados foram satisfatórios ou não.

Por fim, na análise estatística empregada, foi constatado que os valores superiores e inferiores descartados conforme ISRM (1985), no geral, não são de fato *outliers*, e, desta forma, não acarretam problema no resultado dos dados. Assim, a avaliação dos dados por meio da análise estatística, foi importante como critério de verificação em relação aos dados a serem de fato descartados, com objetivo de não gerar subestimação ou superestimação em relação a resistência da rocha.

4.2.7 Equivalente de Areia

Por intermédio do ensaio de equivalente de areia (E.A), é possível obter o teor de argila presente na fração de agregados passantes na peneira 4,75 mm em relação a “Pilha Pó”. Ressalta-se que a presença de materiais deletérios é um fator que interfere nos resultados. Em outras palavras, esse tipo de material sofre interferência na presença de vegetação, partículas leves, torrões de argila, camada de argila aderida às partículas de agregados e, algumas vezes, excesso de poeira resultante da operação de britagem.

Por conseguinte, através deste ensaio é possível avaliar a qualidade do agregado de acordo com as observações apresentadas acima. No entanto, é necessário que este se enquadre dentro do valor mínimo requerido pelas normativas em vigor, tanto do DAER quanto do DNIT, conforme Tabela 4-39.

Tabela 4-39 - Resultados obtidos para E.A (%) e valores estabelecidos nas especificações do DAER e DNIT.

Pedreira	Equivalente de Areia (%)	Especificações
FRAG-M	57	$\geq 50\%$ (DAER ES-P 16/91) $\geq 55\%$ (DNIT ES 31/06) $\geq 55\%$ (DNIT ES 152/10)
FRAG-F	84	
VOG	70	
MIN	74	
CONP	79	
ELD	81	

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4-39, todas as amostragens analisadas estão em acordo com os valores mínimos exigidos pelas normativas do DAER e DNIT. No entanto, observa-se a importância em avaliar e caracterizar as jazidas frente ao avanço de lavra. Destaca-se o valor referente a jazida FRAG-M, que embora tenha apresentado resultado dentro das especificações, foi inferior à litologia FRAG -F, material em contato com a FRAG-M. Neste

caso, especificamente, apesar da atual frente de lavra ocorrer em acordo ao corpo FRAG-M, não seria o mais recomendável a ser utilizado diante deste ensaio, e sim, o FRAG -F.

Ressalta-se que, através dos resultados obtidos de equivalente de areia, todos os agregados ensaiados, atendem aos requisitos desta propriedade em consenso com o indicado por pesquisadores do Superpave (SHRP), em função do nível do tráfego, conforme mostra a Tabela 4-40.

Tabela 4-40 - Valor mínimo exigido em percentagem de equivalente de areia para Superpave.

N (x10 ⁶) Repetições do eixo padrão	Equivalente de areia, mínimo, %
< 0,3	40
< 1	40
< 3	40
< 10	45
< 30	45
< 100	50
≥ 100	50

Fonte: Adaptado de Bernucci (2007)

4.2.8 Durabilidade e sanidade

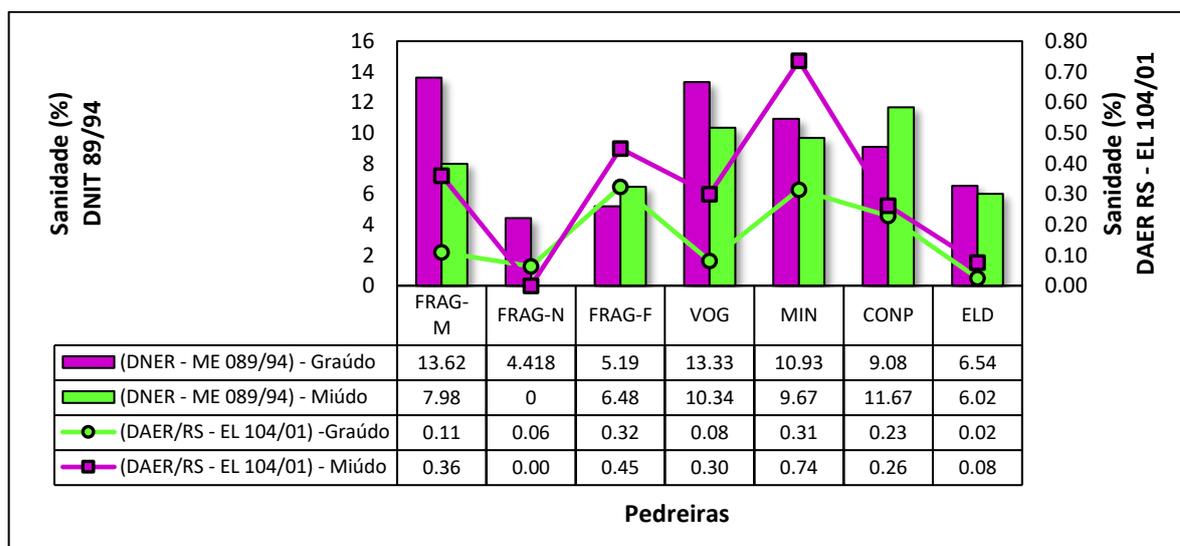
Tendo como objetivo, a avaliação da durabilidade e sanidade, conforme apresentado na metodologia, buscou-se ensaiar as normativas DAER e DNIT em virtude da diferença na execução e nos cálculos para obtenção do resultado. O resultado para a norma DAER – EL 104/01 leva-se em consideração um fator de ponderação pré estabelecido, além disso, o resultado final é expresso através da média da amostra do agregado graúdo e miúdo, multiplicada por 0,55 e 0,45, respectivamente. Já para a norma DNER 89/94 o fator de ponderação está relacionado com a granulação do material ensaiado, e o resultado é obtido através da soma das frações graúdas e miúdas.

As especificações vigentes para os ensaios de acordo com as duas normas estão apresentadas de forma resumida na Tabela 4-41, trazendo os principais limites estabelecidos pelos órgãos viários. Na Figura 4-65 são apresentados os resultados obtidos para as duas normas.

Tabela 4-41 - Limites estabelecidos pelos órgãos viários nos ensaios de sanidade.

DAER	DNIT
≤ 10% (DAER ES-P 15/91)	≤ 12% (DNIT ES 31/06)
≤ 10% (DAER ES-P 08/91)	≤ 20% (DNIT ES 152/10 – Na)
≤ 10% (DAER ES-P 16/91)	≤ 30% (DNIT ES 152/10 – Mg)

Figura 4-65 - Resultado do ensaio de sanidade pela norma DAER / RS – EL 104/01 e DNIT 89/94 classificados em agregados graúdos e miúdos.



Os valores obtidos em relação a normativa DAER foram extremamente inferiores ao DNIT, tanto para os agregados graúdos quanto para os miúdos. Isto ocorre, pois, a avaliação pela norma do DAER é realizada com base no material retido na peneira inferior ao utilizado no ensaio inicial, assim, a porcentagem de perda será inferior ao ensaio do DNIT.

As jazidas FRAG-M e VOG apresentaram perda por sanidade do graúdo superiores em relação as demais jazidas (MIN, CONP e ELD), com valores de 13,62% e 13,33%, respectivamente. Na análise petrográfica, foi observado a textura cataclástica para a rocha granulito máficos (FRAG-M), que influenciou na absorção de água pode também ter influenciado na perda da sanidade do material. A textura cataclástica é mais presente no agregado graúdo, pois conforme observado na absorção por fração, à medida que reduz o tamanho do agregado, menor é a absorção, assim como, foi menor a perda por sanidade do miúdo (7,98%).

A elevada presença de biotita na rocha biotita gnaisse (VOG) pode ter influenciado na perda de sanidade do material tanto do gráudo quanto do miúdo, devido a clivagem perfeita deste mineral. O hábito lamelar deste mineral facilitou a penetração do fluido entre as lamelas (folhas) do mineral e durante as etapas de secagem e umedecimento deste ensaio proporcionou sua maior perda.

Desta forma, as duas jazidas mencionadas (FRAG-M e VOG) apresentaram valores acima do limite de 12% conforme proposto pela normativa DNIT – ES 31/06 (pavimentos flexíveis – concreto asfáltico), inviabilizando seu uso para tais obras, enquanto as demais pedreiras (MIN, CONP e ELD) mantiveram-se dentro das especificações.

Ressalta-se que, pelo resultado apresentado na absorção do agregado do sienogranito da pedreira ELD esperava-se comportamento diferente, devido aos elevados índices de absorção obtido no ensaio, entretanto, observa-se o oposto em relação a sanidade. O processo físico associado a este ensaio, ou seja, a entrada do fluido na etapa de umedecimento e secagem, que simula o processo de gelo e degelo, não foi suficiente para gerar esforços físicos ao agregado. As microfraturas observadas em lâminas, são em sua grande maioria fechadas, dificultando a entrada do fluido, e por isso originado baixo de perda.

As jazidas VOG, FRAG-M e ELD foram caracterizadas em pesquisas realizadas anteriormente. Aqui, ressalta-se a importância da avaliação do material pétreo ao longo do avanço de lavra, pois conforme apresentado no trabalho desenvolvido por Meurer (2015), a jazida VOG obteve perdas por sanidade inferiores à esta pesquisa, com valores de 7,11% e 1,95%, para os materiais gráudos e miúdos, respectivamente. Porém, diferente do apresentado pela autora, atualmente não foi observado quebra das partículas após a finalização do ensaio.

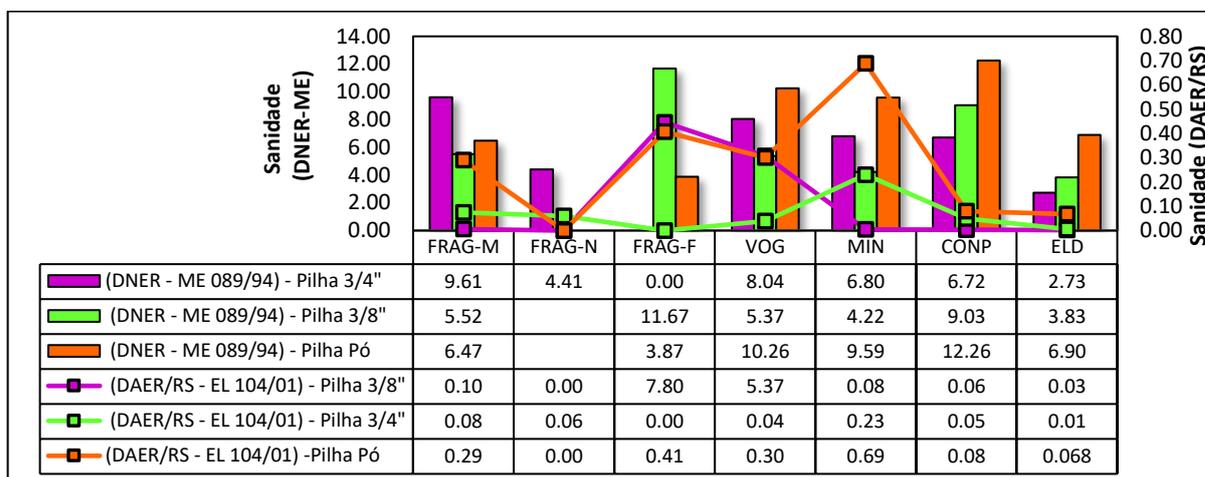
A jazida Fragoso (FRAG-M) disponibilizou resultados laboratoriais, como forma de controle realizado pela própria pedreira. Nota-se que, para o ensaio de sanidade, foi submetido ao material passante $\frac{3}{4}$ " e retido $\frac{1}{2}$ " e passante $\frac{1}{2}$ " e retido $\frac{3}{8}$ ", resultando perda de 3,35%, valor inferior ao obtido na presente pesquisa. Por fim, Boeira (2014) caracterizou a jazida de Eldorado (ELD) tendo obtido resultados inferiores para os agregados gráudos e miúdos em comparação ao encontrado nesta pesquisa, iguais a 0,64% e 1,52%, respectivamente.

4.2.8.1 Avaliação da sanidade por pilha

Embora o resultado do ensaio de sanidade seja sempre apresentado em relação “Gráudo e miúdo” conforme discutido no item 4.2.8 e representado na Figura 4-65, nesta pesquisa buscou-se avaliar também o material conforme coletado por pilha, ou seja, o resultado

apresentado na Figura 4-66 refere-se a representatividade das frações referente as pilhas $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ e pó, ambos em relação às duas normativas ensaiadas (DAER E DNIT).

Figura 4-66 - Resultado do ensaio de sanidade separado por fração para as normas DAER e DNER.



Ao analisar o resultado de sanidade separado por pilha, nota-se que, apenas o agregado da jazida CONP para a pilha pó apresenta valor acima de 12%, conforme limite estabelecido na norma em vigor do DNIT – ES 31/06.

Assim, diferente da conclusão apresentada no item 4.2.8 para separação graúda, na avaliação individual por pilhas, as jazidas FRAG-M e VOG não apresentaram valores que inviabilizam sua utilização. Para a jazida CONP, os resultados dos agregados miúdos encontram-se dentro dos valores exigidos pelas normas, porém, no entanto, na avaliação por pilha, o material da pilha pó encontra-se acima do limite proposto e desta forma seria impróprio para o uso na pavimentação.

4.2.8.2 Síntese das análises

O ensaio de sanidade realizado pela norma DAER apresenta valores extremamente inferiores ao realizado pela metodologia DNIT. Nota-se que, a alta discrepância nos dados se dá pela perda inferior a primeira norma, pois, conforme descrito no procedimento, é realizado o cálculo com base no material peneirado na fração adjacente ao ensaiado inicialmente.

Embora a avaliação tenha sido realizada conforme a norma, separando os agregados graúdos e miúdo, viu-se a importância de realizar os cálculos finais com base no material de cada pilha, pois, conforme discutido, obtêm-se melhor conhecimento a respeito da resistência

a durabilidade do agregado, tendo em vista que, geralmente, os agregados são utilizados de acordo com a representatividade da pilha. Nesse sentido, das cinco jazidas estudadas, apenas os materiais referentes a pilhas pó da jazida CONP, demonstra valor acima de 12%, limite estabelecido conforme DNIT – ES 31/06.

4.2.9 Adesividade

O ensaio normalizado pelo DNER-ME 078/94 utilizando o ligante convencional 50/70, permite de modo qualitativo avaliar a relação entre o betume e o agregado. Compreende-se por satisfatório o material que, após a submissão dos procedimentos descritos na metodologia, permite que o betume molhe totalmente a rocha, ou seja, não fique visível nenhum ponto do material original.

Foram realizados ensaios de adesividade para as cinco jazidas estudadas. Na Tabela 4-42 são expressos os resultados e, como pode-se observar, após as 72 horas a 40°C em água destilada, todas as rochas ensaiadas apresentaram maior afinidade a água, ou seja, resultou no descolamento das películas betuminosas, caracterizando-se assim, como adesividade não satisfatória.

Tabela 4-42 - Resultados do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso.

Jazida	Classificação Rochosa	Acidez da Rocha	Adesividade	Grau de descolamento
FRAG-M	Granulítico diorítico	Intermediária	Não satisfatória	Menor descolamento  Maior descolamento
VOG	Biotita Gnaiss	-	Não satisfatória	
ELD	Sienogranito	Ácida	Não satisfatória	
MIN	Sienogranito	Ácida	Não satisfatória	
CONP	Monzogranito Porfírico	Ácida	Não satisfatória	

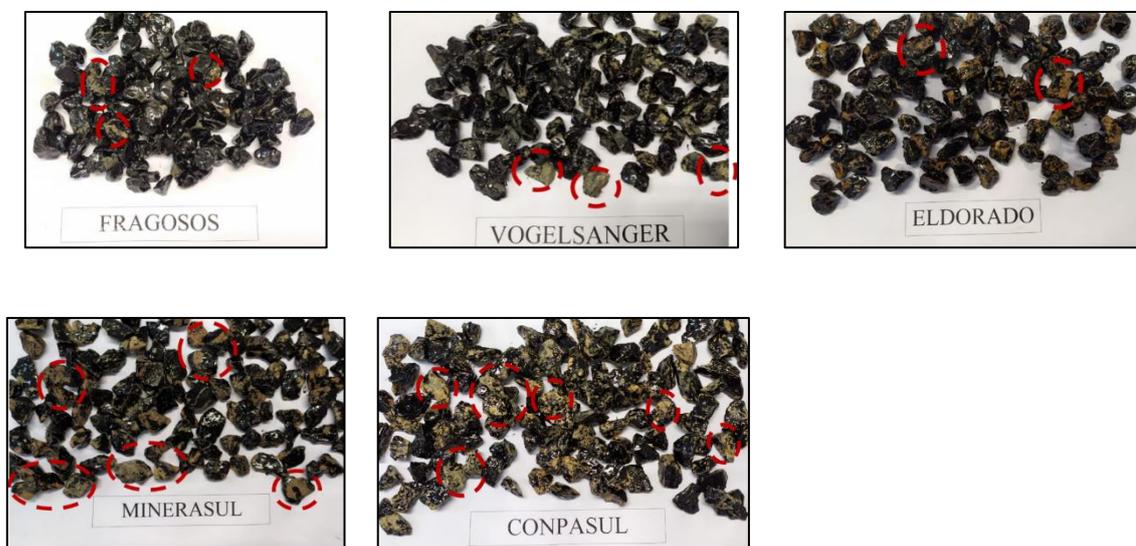
Embora todas as amostragens tenham repelido o ligante 50/70, é notório que esse tipo de comportamento variou de acordo com a litologia, por conseguinte, à mineralogia atrelada a origem rochosa. De acordo com alguns estudos, a remoção do ligante está subordinado a composição química do mesmo, bem como do mineral, além da sua textura superficial (rugosidade) (TOMPKINS 1972, HARTLEY 1974; IBRAHIM et al., 1998; SMITH & COLLIS, 2001; HEFER & LITTLE, 2005; BAGAMPADDE et al., 2006; ABOQUADIS e AL-SHWEILY, 2007; BRANDONI 2019).

Ainda que os resultados do ensaio de adesividade tenham sido totalmente não satisfatórios, aplicou-se a metodologia de classificação numérico visual, conforme proposto no trabalho de Brondani (2019) e abordado no item 2.4.6 . Na Tabela 4-43 são apresentados os dados em acordo com o ranking estabelecido por Brondani (2019) e a Figura 4-67, apresenta as amostras de acordo com a qualidade do resultado do ensaio propriamente dito, elencando do melhor para o pior.

Tabela 4-43 - Classificação da adesividade numérico visual.

Jazida	Adesividade	Adesividade visual CAP 50/70	Índice
FRAG-M	Não satisfatório	Boa	30
VOG	Não satisfatório	Boa	25
ELD	Não satisfatório	Ruim	20
MIN	Não satisfatório	Ruim	15
CONP	Não satisfatório	Muito Ruim	10

Figura 4-67 - Agregados pós ensaio de adesividade de acordo com ranking proposto por Brondani (2019), destacando no círculo em vermelho, os pontos mais críticos.



Embora todas as rochas tenham sido classificadas como não satisfatórias, a ligação betume/agregado variou entre as litologias. Nota-se que, as pedreiras FRAG-M e VOG apresentaram maior aderência em comparação, por exemplo, a CONP, que repeliu boa parte do ligante. Essa interação está relacionada com o teor de sílica da rocha matriz. Conforme apresentado na análise petrográfica, a jazida FRAG-M explora agregados composta por rocha básica grande porcentagem de minerais máficos, e pouco quartzo, o que justifica uma melhor relação em comparação as demais.

Apesar de a jazida VOG ser de origem gnaissíca, com bandas intercaladas entre minerais máficos e felsícos, as bandas claras são compostas por minerais mais “ricos em sílica” que repelem o betume. No processo de britagem, foi observado que, alguns agregados, apresentaram maior porcentagem de minerais máficos em relação aos félsícos, conforme pode ser observado na Figura 4-67, agregados com maior descolamento do ligante apresentaram composição totalmente ou quase por complemento de minerais félsícos (maior porcentagem de quartzo).

A textura do agregado e o grau de alteração dos minerais constituintes da rocha, são dois fatores que também interferem na adesividade. Conforme discutido por Ceratti e Reis (2011) e Gouveia (2002), em adição aos estudos realizados por Kim et al (1992), misturas asfálticas compostas por agregados de superfície polida apresentam menor força de adesividade em comparação aos agregados rugosos.

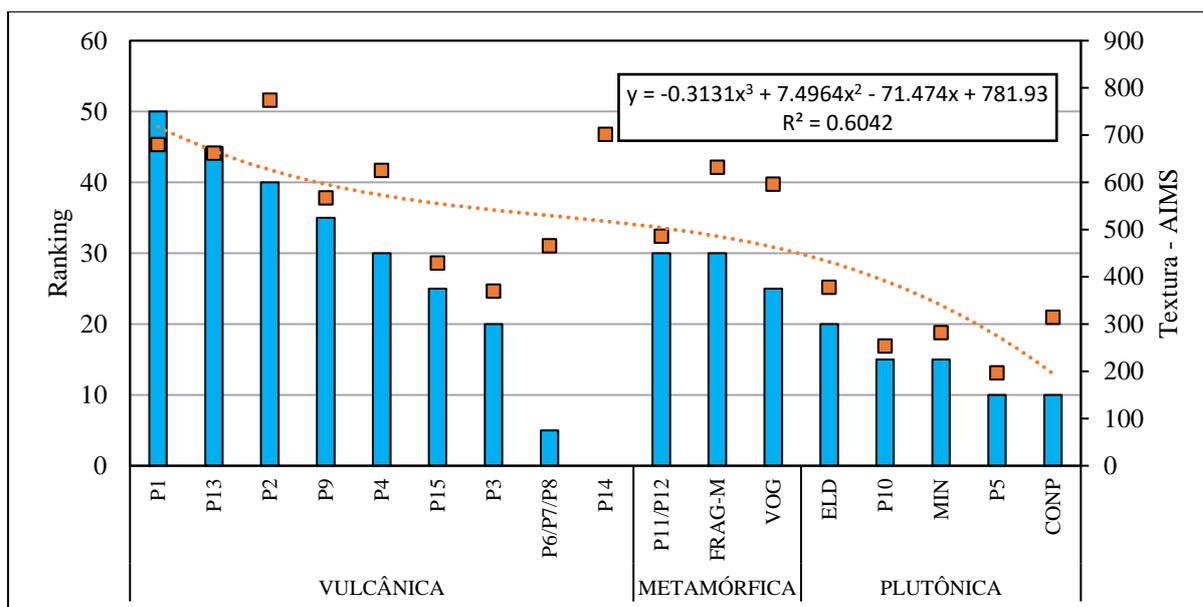
No estudo de Brondani (2019), as rochas de texturas finas (fanerítica muito fina a fina) e microporfíricas que apresentaram valores de AIMS correspondentes a textura muito rugosa, apresentaram, no geral, resultados mais satisfatórios de adesividade, em comparação as rochas de textura fanerítica média a garssa, com textura macia.

Face a esse panorama, procurou-se estabelecer uma relação entre adesividade e propriedade da textura superficial do agregado. Para isso, associaram-se os valores obtidos na textura superficial, através do AIMS, e o grau de alteração mineralógica descrita através da análise petrográfica com os resultados de adesividade.

A jazida FRAG-M, foi classificada com granulação média e apresentou valor de textura de 631,8, sendo caracterizada de acordo com Ibiapini et al (2018) como Rugosidade Moderada. Já os agregados das pedreiras MIN, CONP e ELD foram descritos com variação de granulação de grossa a muito grossa/porfírica, e apresentaram valores de textura 377,4, 281,9 e 314,2, respectivamente, o que permite classificá-las como macias.

A Figura 4-68 traz a relação polinomial entre acidez das rochas, classificação da adesividade visual CAP 50/70 e textura superficial da amostra por intermédio do AIMS, para as amostras desta pesquisa e do estudo de Brondani (2019).

Figura 4-68 - Relação entre acidez das rochas, classificação da adesividade visual CAP 50/70 e textura superficial da amostra por intermédio do AIMS.



Analisando os dados de Brondani (2019) e os da presente pesquisa, nota-se que, a textura obtida pelo ensaio AIMS, apresenta uma certa relação com a adesividade de acordo com a litologia da rocha. Ou seja, no geral, rochas vulcânicas tendem apresentar maior valor de textura (refreindo-se a rugosidade da superfície do agregado), assim como, melhor adesividade. Embora, nota-se que, para algumas rochas (P6/P7/P8 e P14) esse fato não ocorre. Por conseguinte, as rochas metamórficas apresentaram maiores valores textura, assim como, melhor adesividade e por fim, rochas plutônicas, no geral, tendem apresentar textura inferior as demais litologias, bem como, maior perda de adesividade.

Rochas alteradas apresentam adesividades inferiores, conforme dito por Frazão (2002), porém, nota-se que, as rochas da jazida ELD demonstraram adesividade superior às jazidas MIN e CONP, embora, tenha sido evidenciado tratar-se de uma rocha com presença de minerais em processo de alteração. Neste aspecto, pode-se inferir que o agregado submetido ao ensaio resulta de material da porção sã da jazida, ou do interior da rocha, consistindo, em material cujo aspecto de alteração é pouco expressivo.

Por fim, embora algumas amostras tenham resultado em pouco descolamento da película de ligante, é necessário o uso de dope ou de ligante modificado para que esses materiais não sofram descolamento de película do ligante sobre os agregados e, por consequência, não interfira na sua aplicação na mistura asfáltica.

4.2.9.1 *Síntese das análises*

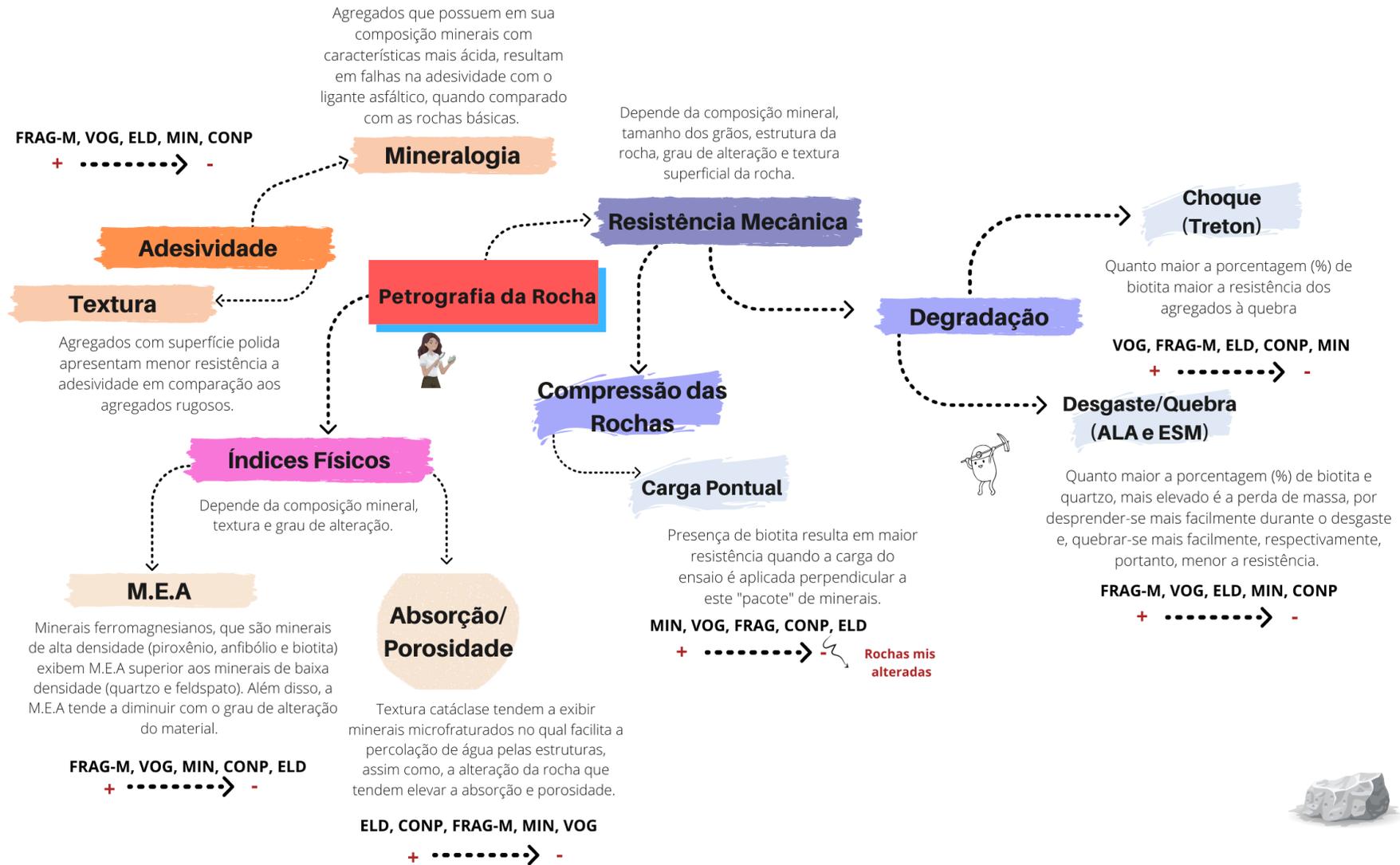
A avaliação das propriedades do agregado mineral com relação a adesividade é de grande importância para compreender o desempenho desse tipo de material no revestimento asfáltico. Nesse sentido, os resultados obtidos neste ensaio são de consenso com as discussões da literatura, pois a remoção do ligante está associado com as características geológicas. Desta forma, rochas com características mais básicas e com superfície polida tende a apresentar menor resistência a adesividade em comparação aos agregados básicos e superfície rugosa.

Em vista disso, embora as cinco pedreiras estudadas apresentaram resultados insatisfatórios, tornando-se impróprio para uso na pavimentação, o ranking utilizado como critério de verificação do comportamento do descolamento da película de ligante, permitiu avaliar que, a rocha granulito máficos, presente na jazida FRAG-M, composto majoritariamente por minerais com características mais básicas e rugosidade moderada, apresentou melhor resultado, seguido pela biotita gnaisses (VOG), ambas de origem metamórficas, porém, com composições mineralógicas diferentes que repercute no resultado dos ensaios. Enquanto, as três rochas de origem graníticas (ELD, MIN e CONP), com composição ácida e textura superficial macia, apresentaram maior deslocamento do ligante.

4.2.10 **Diagrama resumo**

Na Figura 4-69 é apresentado um diagrama que resume os principais resultados obtidos nesta pesquisa levando em consideração a influência mineralógica no desempenho tecnológico.

Figura 4-69 - Fluxograma com as principais relações obtidas na análise petrográfica em relação aos demais ensaios de caracterização.



4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Finalizada as caracterizações e análises em campo e laboratório e estando de posse dos resultados, propriedades mineralógicas, físicas e de resistência mecânica, deu-se procedimento com aplicação da análise estatística.

Com o propósito de obter uma análise que, estatisticamente, permita mensurar padrões acerca da heterogeneidade das rochas ígneas e metamórficas, para as variáveis de caracterização física e mecânica, optou-se por adicionar aos resultados da autora, dados laboratoriais obtidos por estudos realizados dentro do grupo de pesquisa GEPPASV, assim como trabalhos presentes na literatura.

Desta forma, o banco de dados utilizado contém resultados dos estudos obtidos por: Fiorentini (2002), que caracterizou as rochas ígneas vulcânicas ácidas e básicas da formação Serra Geral; Ribeiro (2006), que estudou e avaliou rochas ígneas plutônicas e metamórficas do estado do RJ; Boeira (2014), que caracterizou rochas ígneas, metamórficas, do estado do RS para posteriormente introduzir nos estudos de misturas asfálticas; Paiva (2017), que estudou as rochas ígneas vulcânicas da porção central do RS; Back (2018), que avaliou rochas ígneas vulcânicas, plutônicas e hipoabissais e rochas metamórficas, também situadas no RS; Remédio (2017) que caracterizou rochas localizadas no estado de São Paulo, com o objetivo principal de avaliar os agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade; Curtis (2019), que caracterizou rochas de uma jazida da Intrusão de Limeira, SP (Formação Serra Geral); Trotta (2020), que caracterizou jazidas localizadas nos estados de Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais; e, por fim, os trabalhos de Gouveia (2002) e Rodrigues (2019) que caracterizaram os agregados com o objetivo de avaliar a veracidade do ensaio de angularidade do agregado fino.

As amostras que compõem o banco de dados incluem rochas ígneas de origem vulcânica, de composição básica e ácida, rochas plutônicas, ácida e intermediária, bem como rochas metamórficas. Todos os dados utilizados para a análise encontram-se identificados no ANEXO A.

Inicialmente, foram realizadas análises de correlação entre as diversas variáveis obtidas nos ensaios de caracterização dos agregados e blocos de rochas. Foram elaboradas correlações com todas as rochas, e, posteriormente, separando as litologias ígneas e metamórficas, pois, conforme discutido por Spence (1974) e Fiorentini (2002), grupos de mesma classificação petrográfica convencional com semelhante composição mineralógica pode apresentar um padrão de comportamento mais definido.

Todas as matrizes e coeficientes de correlação estão inseridos no APÊNDICE B. Foi realizada primeiramente regressão linear simples e, na sequência, regressão multivariada.

4.3.1 Análise de correlação

De posse dos dados apresentados na matriz de correlação, fazem-se necessárias as observações apresentadas a seguir. Embora o banco de dados utilizado consista na análise realizada por diferentes autores, nem sempre foi possível obter informações acerca de todas as variáveis. Isto é, cada autor buscou, com base no seu objetivo, efetuar os ensaios que lhe fossem pertinentes. Diante deste fato, a matriz de correlação foi estabelecida levando-se em consideração esse critério. Portanto, a matriz de correlação do conjunto de rochas foi montada com os trabalhos desenvolvidos no GEPPASV, sendo eles: Paiva (2017), Back (2018), Rodrigues (2019) e os resultados desta pesquisa.

Para a validação da correlação, tomou-se como referência o critério estabelecido por Hinkle (2003), conforme apresentado na Tabela 4-44. Na respectiva pesquisa, tomou-se como critério para efetuar as análises de regressão, no mínimo, correlações que apresentaram “correlação moderada” ($\geq 0,50$).

Tabela 4-44 - Parâmetros de correlação.

Valor Absoluto r	Interpretação
$0,00 \leq 0,30$	Correlação desprezível
$0,30 \leq 0,50$	Correlação fraca
$0,50 \leq 0,70$	Correlação moderada
$0,70 \leq 0,90$	Correlação forte
$0,90 \leq 1$	Correlação Muito forte
$r=1,00$	Correlação perfeita

Adaptado: Hinkle, 2003.

Por conseguinte, gerou-se outras três matrizes de correlações com base nas litologias, sendo elas: rochas ígneas vulcânica e plutônicas e rochas metamórficas. Diferente do estudo desenvolvidos por Back (2018), na presente pesquisa, o baixo número de amostras de rochas vulcânicas (ácidas e básicas) e rochas plutônicas intermediárias, não permitiu a análise desses subgrupos, a fim de não apresentar análises equivocadas.

Além disso, visto que os estudos realizados no GEPPASV apresentam um banco de dados carente de rochas metamórficas, neste caso, a matriz contou apenas com as variáveis significativas existente, com base em todos os trabalhos utilizado.

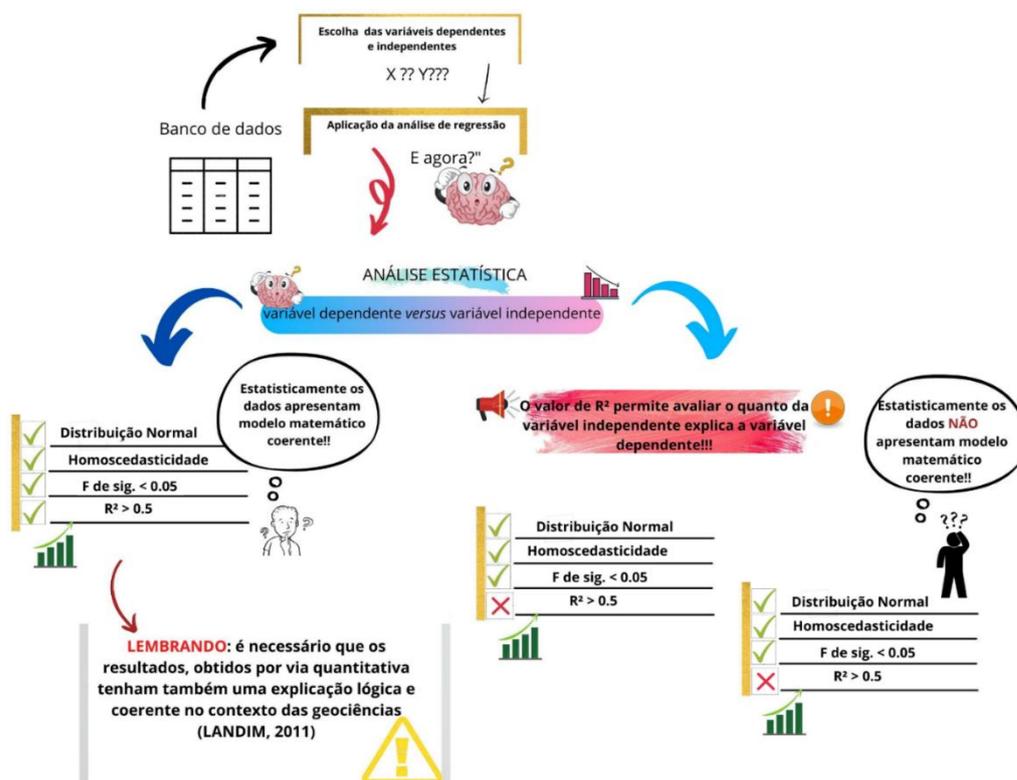
Quanto aos resultados das análises, embora algumas variáveis tenham apresentado correlações estatísticas entre si, é necessário ter sempre em mente que os resultados, obtidos por via quantitativa devem ter também uma explicação lógica e coerente no contexto das geociências (LANDIM, 2011). Com base nas quatro matrizes geradas, entende-se que, do ponto de vista geológico-geotécnico, certas correlações não são de fato coerentes.

Portanto, a seguir serão apresentadas as regressões lineares simples e na sequência as regressões multivariadas, com base nos dados considerados relevantes obtidos nas matrizes de correlação (APÊNDICE B).

4.3.2 Análise de regressão

Conforme discutido na revisão e apresentado na metodologia, ao realizar a análise de regressão existem alguns pré-requisitos a serem obtidos que permitem avaliar a relevância ou não da regressão. Portanto, para exemplificar essa informação, todas as regressões foram avaliadas conforme esquema ilustrativo apresentado na Figura 4-70.

Figura 4-70 - Diagrama explicativo para avaliação da regressão.



4.3.3 Análise de regressão linear simples

Antes de realizar as análises de regressão, foram aplicados os testes de normalidade, homogeneidade e verificação da presença de *outliers*, como critério para aplicar a análise correta. Foram geradas as regressões lineares que, do ponto de vista geológico-geotécnico, apresentaram de fato significância.

4.3.3.1 Características mecânicas

Neste tópico, buscou-se analisar modelos matemáticos que permitam obter o resultado de um ensaio mecânico com base em outro. Para isso, foram utilizados os resultados apresentados nos seguintes trabalhos: Fiorentini (2002), Ribeiro (2006), Pinheiro (2009), Boeira (2014), Meurer (2015), Paiva (2017), Remédio (2017), Back (2018), Faccin (2018), Curtis (2019) e Trotta (2020).

4.3.3.1.1 Abrasão Los Angeles

Neste tópico foram definidas as seguintes hipóteses:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência do Esmagamento/Treton/Is(50) seco/ Is(50) sat sobre ALA/Esmagamento/Treton;
 - $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência da variáveis Esmagamento/Treton/Is(50) seco/ Is(50) sat sobre ALA.
- ALA versus Esmagamento

A Tabela 4-45 resume os resultados estatísticos obtidos entre os ensaios de resistência mecânica Abrasão Los Angeles (ALA) e Esmagamento (ESM). As Figura 4-71 e a Figura 4-72 apresentam os gráficos de regressão.

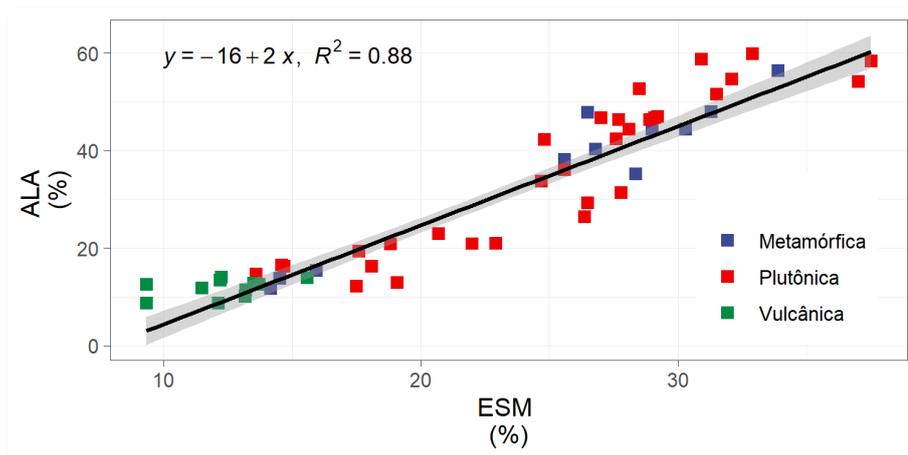
Tabela 4-45 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,88	0,18	0,83	0,94
F de significância (ANOVA)*	2,2 x 10 ⁻¹⁶	0,16	1,95x10 ⁻⁵	4,65 x 10 ⁻⁸

*Considera significativo quando o valor F de significância for < 0,05

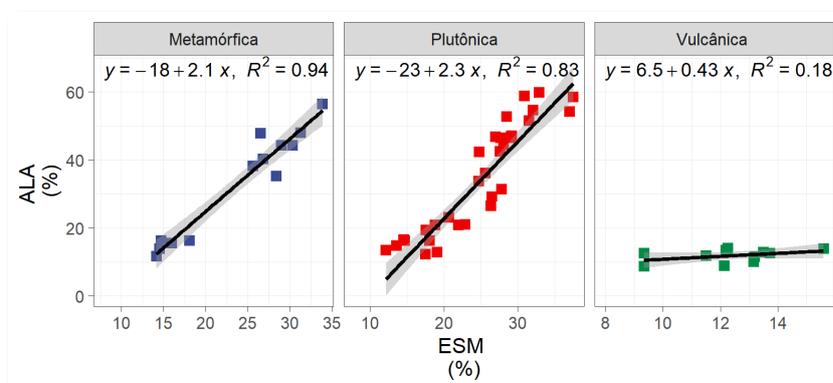
De posse dos resultados apresentados, pode-se verificar que os modelos formados pelo “conjunto de rochas”, rochas plutônicas e rochas metamórficas, apresentam valor de F de significância extremamente baixo, portanto, subentende-se que a regressão é boa. Estatisticamente, o conjunto de rochas apresenta um modelo que comprova que a variável Esmagamento tem influência significativa (88%) sobre a ALA. Já para o modelo referente às rochas metamórficas, a variável Esmagamento apresenta influência significativa de 94% sobre a variável ALA. Por fim, o modelo das rochas plutônicas, assume que 83% da variável Esmagamento consegue explicar a variável ALA.

Figura 4-71 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs ESM (%) referente ao conjunto de rochas.



Embora no presente estudo as rochas vulcânicas não apresentem correlação plausível com ALA, tanto em relação ao valor de R², como no teste F de significância (com valor acima de 0,05), Paiva (2017), ao estudar um conjunto de rochas dessa mesma litologia, obteve correlação forte (R² 0,67).

Figura 4-72 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs ESM (%) separado por litologia.



- ALA versus Treton

A Tabela 4-45 resume os dados estatísticos obtidos entre os ensaios de resistência mecânica Abrasão Los Angeles (ALA) e Treton.

Tabela 4-46 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,38	0,28	0,09	0,52
F de significância (ANOVA)*	4,10 x 10 ⁻⁹	0,008	0,00	0,00

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Analisando os dados estatísticos apresentados, conclui-se que todas as avaliações atenderam o teste F de significância. Portanto, para o Conjunto de Rochas, o modelo gerado, comprova que a variável TRET tem influência sobre ALA de 38% medidos pelo R². No entanto, examinando por litologia, as rochas metamórficas detêm influência de 52%, seguida pelas rochas vulcânicas com 28% e, por fim, as rochas plutônicas, com 11%.

Por conseguinte, pode-se inferir que, com 95% de confiabilidade, todos os modelos gerados com o banco de dados do presente estudo, apresentam correlação positiva entre os ensaios de ALA e Treton (Figura 4-73 e Figura 4-74).

Figura 4-73 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Treton (%) referente ao conjunto de rochas.

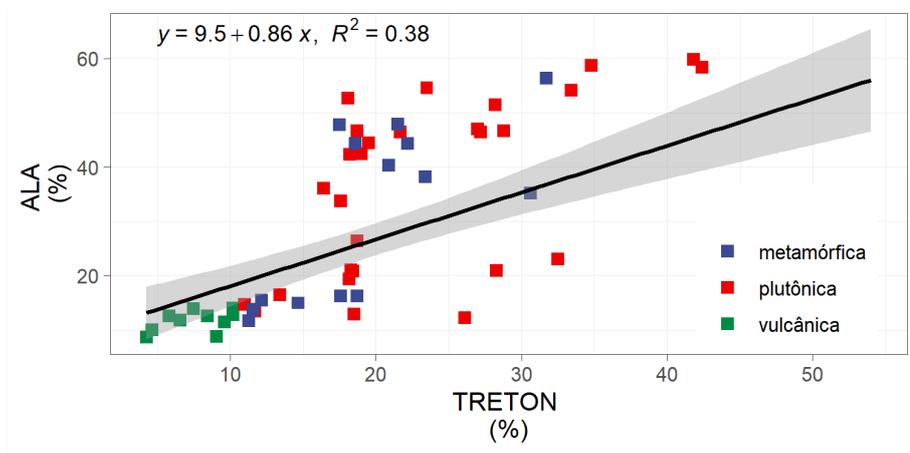
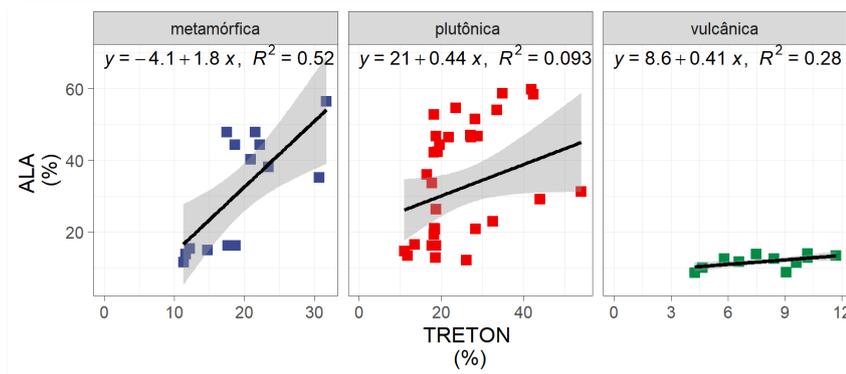


Figura 4-74 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Treton (%) separado por litologia.



Outros autores obtiveram resultados positivos para essa mesma relação. Dentre eles, cabe descartar o trabalho desenvolvido por Harthi (1997), com rochas vulcânicas, metamórficas e sedimentares. Este autor encontrou uma correlação moderada, com R^2 de 0,68, Paiva (2017), ao caracterizar as rochas vulcânicas ácidas e básicas do Estado do Rio Grande do Sul, também encontrou uma correlação linear forte entre as variáveis, com um R^2 de 0,94.

- ALA versus Is(50) seco

A Tabela 4-47 apresenta a avaliação entre o desgaste de Los Angeles (ALA) e a resistência à Carga Pontual (Is(50)) para condição seca.

Tabela 4-47 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,11	0,46	0,2	0,38
F de significância (ANOVA)	0,65	0,04	0,77	0,31

*Considerado significante quando o valor F de significância for < 0,05

Observa-se que, as rochas vulcânicas foram a única litologia que atendeu ao teste imposto (F de significância igual a 0,05), no entanto, o modelo matemático deve ser avaliado com cautela, pois o número de dados utilizados pode interferir na análise. Neste item, cabe destacar os estudos desenvolvidos por Irfan (1994), Al-Harthi (2001) e Back (2018). Irfan (1994) desenvolveu relações empíricas lineares entre o índice de Is versus ALA. As correlações se mostraram moderadas, com valores de R² 0,54. Por sua vez, Al – Harthi (2001) avaliou mais de 110 amostras de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas e, estatisticamente, os agregados estudados indicaram grau de correlação relativamente alto (R² 0,86) mostrando que, à medida que o índice IS(50) aumenta, o valor de Treton diminui.

Já Back (2018) avaliou rochas de origem ígneas, tanto vulcânicas quanto plutônicas e metamórficas, no entanto, em seu estudo, a melhor correlação foi obtida com as rochas ígneas ácidas e básicas, com R² de 0,89 e 0,54, respectivamente. Portanto, embora este estudo não tenha apresentado correlação significativa entre as amostras, nota-se que, pode haver correlação entre essas variáveis, conforme encontrado nos trabalhos dos autores mencionados.

As Figura 4-75 e Figura 4-76 apresentam os gráficos de correlação referente ao conjunto de rochas e separado por litologia, respectivamente.

Figura 4-75 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Is(50) Seco (MPa) referente ao conjunto de rochas.

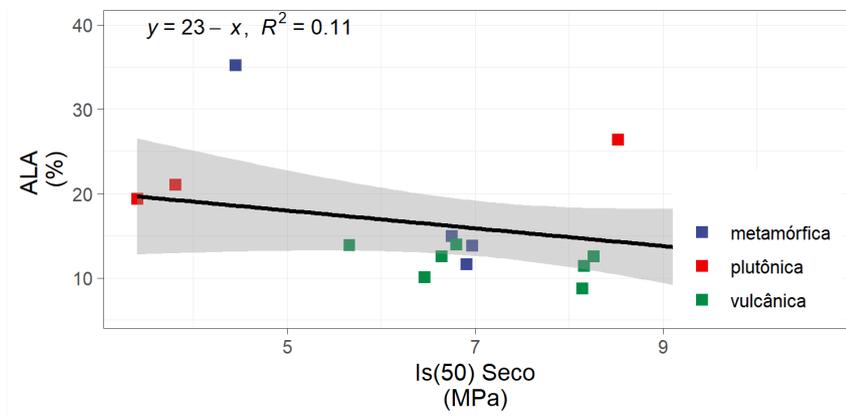
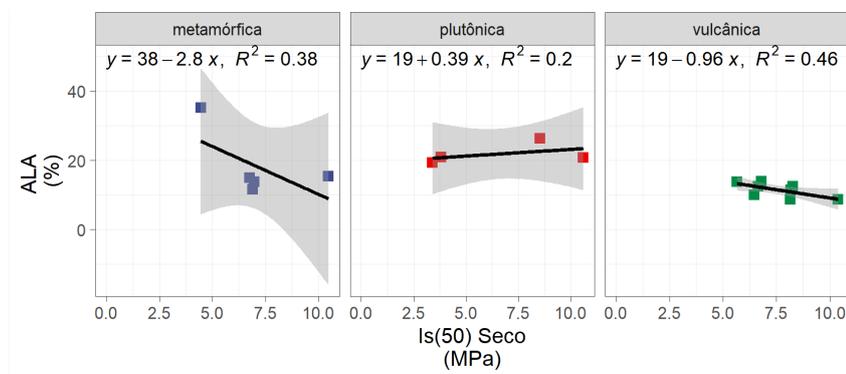


Figura 4-76 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Is(50) Seco (MPa) separado por litologia.



4.3.3.1.2 Esmagamento

Para este tópico foram definidas as seguintes hipóteses:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência do Treton/Is(50) seco/ Is(50) sat sobre Esmagamento
- $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência da variáveis Treton/Is(50) seco/ Is(50) sat sobre Esmagamento

- Esmagamento versus Treton

Os resultados apresentados na Tabela 4-48 referem-se às correlações lineares entre os parâmetros de Esmagamento e Treton.

Tabela 4-48 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,50	0,16	0,27	0,63
F de significância (ANOVA)*	1,23 x 10 ⁻¹⁰	0,19	0,00	0,00

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Com base nos resultados apresentados, para o banco de dados utilizados, apenas as rochas vulcânicas não atenderam os testes estabelecidos como critério de validação da correlação. No entanto, Paiva (2017) em seu estudo, obteve para as rochas vulcânicas correlação moderada (R² 0,68). Já Harthi (1197) em pesquisa, obteve para o conjunto de rochas, uma correlação forte (R² 0,72), enquanto, neste estudo, os dados também apresentaram correlação, porém uma correlação fraca (R² 0,49). A rochas metamórficas apresentaram a melhor relação, mostrando que, 63% da variável independente (Treton) esclarece a variável dependente (Esmagamento).

A Figura 4-77 e Figura 4-78 ilustram as regressões para o conjunto de rocha e separado por litologia, respectivamente.

Figura 4-77 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Treton (%) referente ao conjunto de rochas.

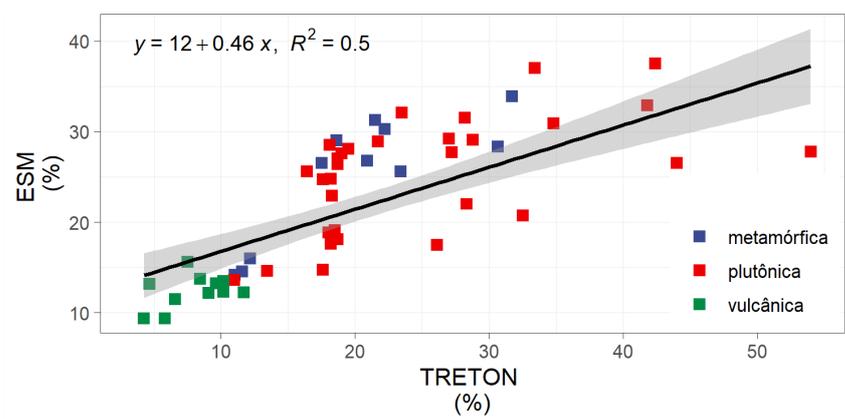
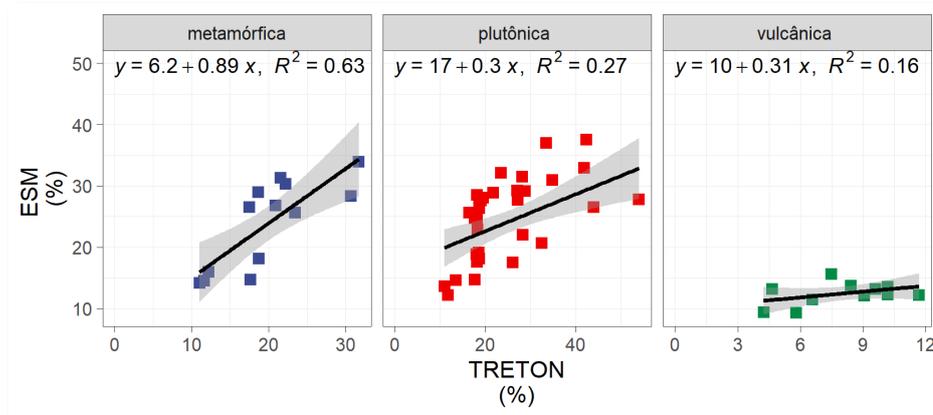


Figura 4-78 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Treton separado por litologia.



- Esmagamento versus Is(50) seco

Na Tabela 4-49 são apresentados os resultados estatísticos obtidos entre a correlação Esmagamento e Is (50) seco.

Tabela 4-49 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R^2	0,06	0,52	0,01	0,00
F de significância (ANOVA)	0,22	0,02	0,73	0,69

*Considerado significativo quando o valor F de significância for $< 0,05$

Pode-se afirmar que, estatisticamente, apenas as rochas vulcânicas rejeitam a hipótese nula, ou seja, a variável independente (Is(50) seca) explica 52% da variável dependente (Esmagamento). Por conseguinte, ao correlacionar todo o conjunto de rochas, a correlação é extremamente insignificante. De certo modo, o presente resultado é o oposto do apresentado por Harthi (2001). Embora o autor tenha efetuado correlação logarítmica, o valor obtido permitiu classificar a correlação muito forte ($R^2 0,91$).

A Figura 4-79 e Figura 4-80 ilustram as regressões para o conjunto de rocha e separado por litologia, respectivamente.

Figura 4-79 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Is(50) Seco – (Mpa) referente as rochas.

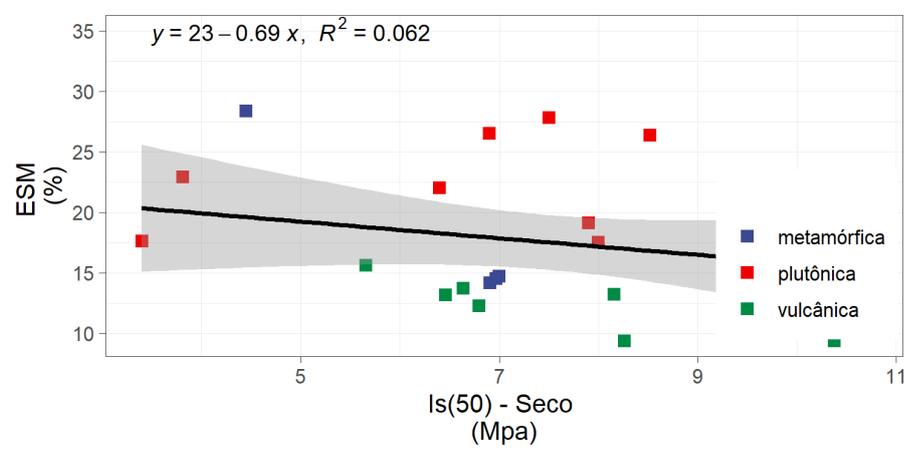
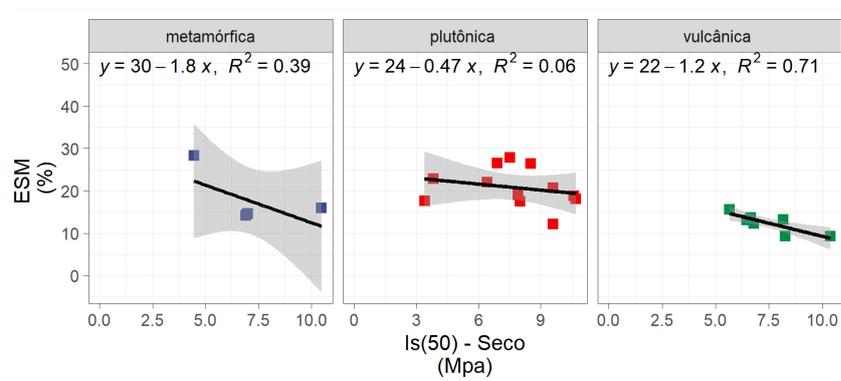


Figura 4-80 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Is(50) Seco – (Mpa) separado por litologia.



- Esmagamento versus Is(50) sat

A Tabela 4-50, apresenta os resultados obtidos na análise estatística entre os ensaios Esmagamento e Is(50) sat.

Tabela 4-50 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,006	0,52	0,013	0,24
F de significância (ANOVA)	0,70	0,03	0,72	0,52

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

A análise dos dados estatísticos apresentados, permite inferir que, com 95% de confiabilidade, apenas as rochas vulcânicas apresentaram relação entre as variáveis independentes (Is(50) sat) e dependentes (Esmagamento). Com o conjunto de amostras analisadas na presente pesquisa, 52% da variável dependente pode ser explicada pela variável independente. Analisando o gráfico da respectiva regressão (Figura 4-82), é coerente a correlação ser negativa, tendo em vista que, rochas na condição saturada tendem a apresentar valor de resistência menor.

Figura 4-81 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Is(50) Saturado – (Mpa) referente as rochas.

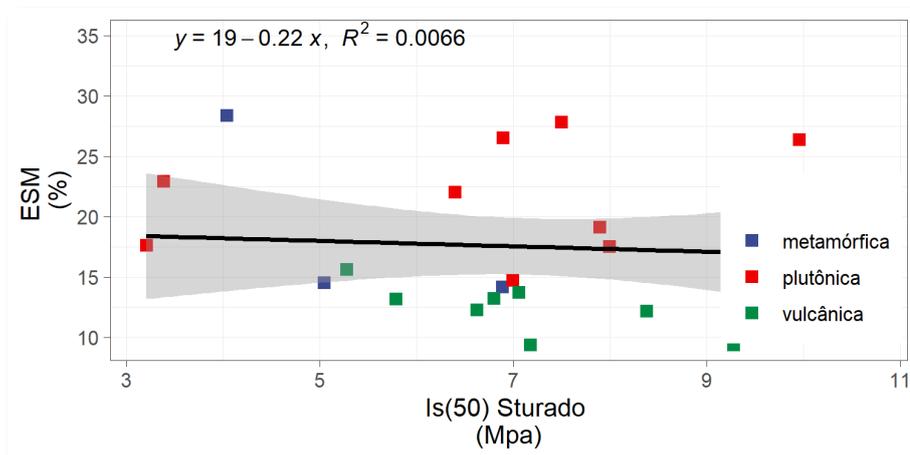
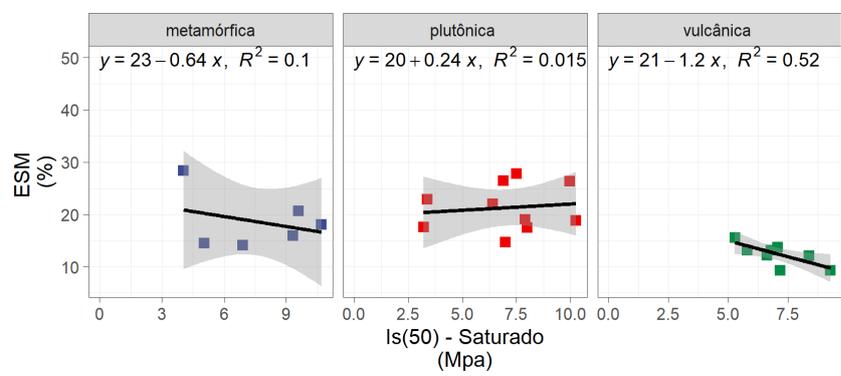


Figura 4-82 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Is(50) Saturado – (Mpa) referente as rochas.



4.3.3.1.3 Síntese das análises

Nessa etapa deste estudo, o número de dados utilizados variou de acordo com cada análise. Foram considerados os modelos matemáticos que apresentaram valor de significância inferior a 0,05, pois, conforme discutido na revisão, o valor de R^2 apenas permite inferir o quanto da variável independente analisada consegue explicar a variável dependente do modelo.

Assim, para o conjunto de amostras analisadas, pode-se concluir que o ensaio de Abrasão Los Angeles apresenta forte significância entre os ensaios de Esmagamento (i.e., conjunto de rochas, rochas plutônicas e rochas metamórficas) e Treton (i.e., conjunto de rochas e todas as litologias avaliadas separadamente). Para o ensaio de Esmagamento, há significância entre o ensaio Treton, apenas para o conjunto de rochas, e entre Is(50) seco e sat, somente para as litologias vulcânicas. Por fim, os ensaios ALA não apresentaram relação significativas com Is(50) seco ou sat, assim como, Treton, no entanto, optou-se por não apresentar seus resultados devido a falta de relação estatística existente com o conjunto de dados utilizados.

4.3.3.2 Características mecânicas versus índices físicos

No que diz respeito às propriedades físicas, procurou-se avaliar a influência da absorção da rocha em relação ao desempenho mecânico rochoso, de modo que à partir da determinação de um dado parâmetro, se pudesse inferir ou prever com razoável segurança o outro. Deste modo, foram utilizados os resultados apresentados nos seguintes trabalhos: Fiorentini (2002), Ribeiro (2006), Pinheiro (2009), Paiva (2017), Remédio (2017), Back (2018), Curtis (2019),

Ceccato (2021). A seguir serão apresentados os resultados obtidos referente a essa análise, tendo com as seguintes hipóteses estabelecidas:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência da variável $ABS(\frac{3}{4})$ e/ ou $ABS(\frac{3}{8})$ sobre ALA e/ou Esmagamento ou Treton;
- $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência da variáveis $ABS(\frac{3}{4})$ e/ ou $ABS(\frac{3}{8})$ sobre ALA e/ou Esmagamento ou Treton;

4.3.3.2.1 Abrasão Los Angeles

A avaliação da influência da absorção do ensaio ALA foi verificada para as pilhas $\frac{3}{4}$ e $\frac{3}{8}$. A Tabela 4-51 apresenta os resultados obtidos para a Pilha $\frac{3}{4}$.

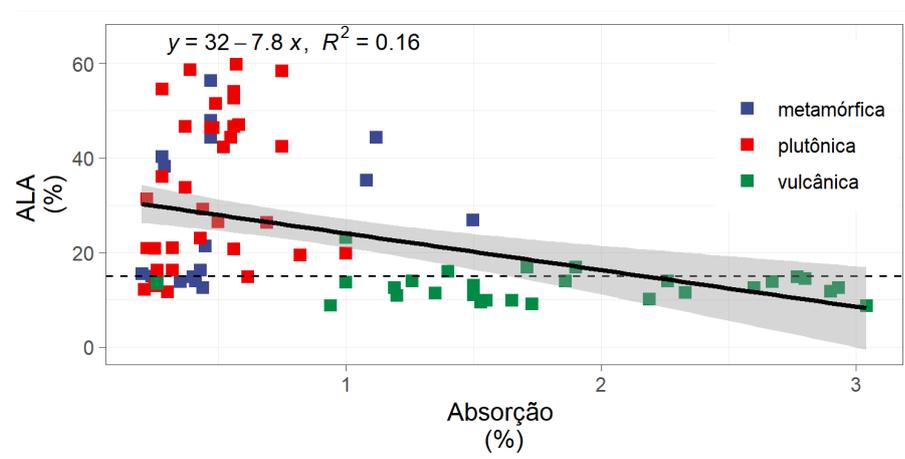
Tabela 4-51 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R^2	0,20	0,013	0,047	0,08
F de significância (ANOVA)*	$2,88 \times 10^{-5}$	0,561	0,22	0,244

*Considerado significativo quando o valor F de significância for $< 0,05$

Estatisticamente, apenas o “conjunto de rochas” (Figura 4-83) atendeu os pré-requisitos impostos na avaliação da regressão, portanto, pode-se afirmar que, nesta análise deve-se rejeitar a hipótese nula e aceitar a hipótese alternativa, sendo que há influência de 20% da variável $ABS(\frac{3}{4})$ sobre ALA.

Figura 4-83 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.



Na Tabela 4-52 são apresentados os resultados estatísticos sobre a influência da absorção referente à pilha $\frac{3}{8}$ " no desempenho mecânica ALA.

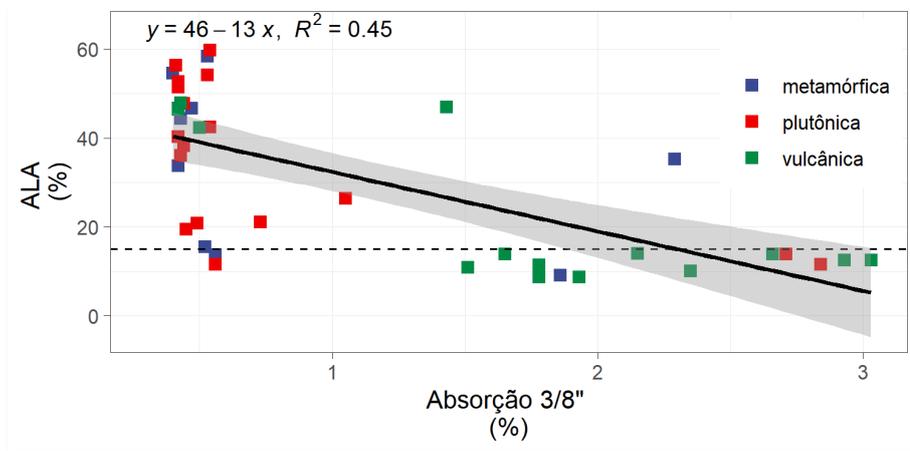
Tabela 4-52 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,49	0,016	0,145	0,14
F de significância (ANOVA)*	7,55 x 10 ⁻⁸	0,675	0,08	0,27

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Para o conjunto de dados analisados por litologia, não foi encontrada influência estatística da variável ABS ($\frac{3}{8}$ " sobre ALA. Por outro lado, na avaliação do "conjunto de rochas" com 95% de confiabilidade, há influência da variável ABS ($\frac{3}{8}$ " sobre ALA. Por conseguinte, o modelo apresenta que 45% da variável independente (ABS $\frac{3}{8}$ " consegue descrever a variável dependente (ALA) (Figura 4-84).

Figura 4-84 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.



Observa-se que ambos os modelos sugerem uma correlação negativa. Embora o gráfico aponte que, as maiores absorções para as rochas vulcânicas resultem em valores de ALA inferiores às plutônicas, para este ensaio, valores inferiores correspondem a agregados com uma boa resistência mecânica. Porém, esperava-se o oposto, ou seja, uma correlação positiva. Uma vez que é consenso na literatura que a absorção influencia na resistência mecânica, conforme discutido por Macedo, Brasileiro e Ferreira (1988), que afirma que quanto menor a absorção menor é o desgaste por Abrasão Los Angeles.

Kazi e Zuhdi (1980) argumentam que o valor de ALA aumenta linearmente com a absorção. Os autores estudaram uma grande variedade de rochas ígneas e concluíram que as perdas no ensaio ALA são tanto maiores quanto maior a granularidade dos constituintes do agregado e quanto maior a absorção. Como observado por esses autores e constatado com os dados do presente estudo, para rochas de granulação fina rochas vulcânicas, o valor de ALA é geralmente inferior a 15%, conforme apresentando pela linha tracejada na Figura 4-83 e na Figura 4-84.

Em seu estudo com rochas de origem vulcânicas básicas, Arnold (1993) obteve na condição alterada, uma correlação forte positiva, com um R^2 de 0,81, No entanto, no estudo realizado por Back (2018), a correlação expressa entre ALA vs Absorção apresentou valores negativos rochas ígneas com R^2 -0,79, rochas ácidas e básicas com R^2 -0,65 e conjunto de rochas com R^2 -0,54. Entretanto, conforme apresentado nas Figura 4-85 e Figura 4-86, com os dados

utilizados neste estudo, não se observa relação entre ALA vs Absorção separado por litologia para ambas as frações $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ ".

Figura 4-85 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Absorção (%) separado por litologia.

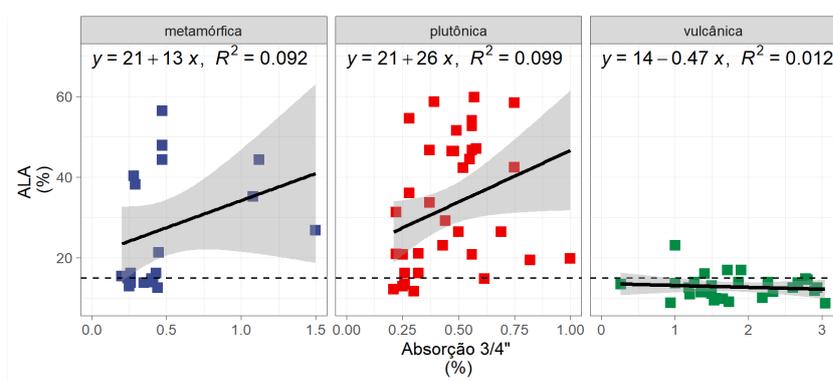
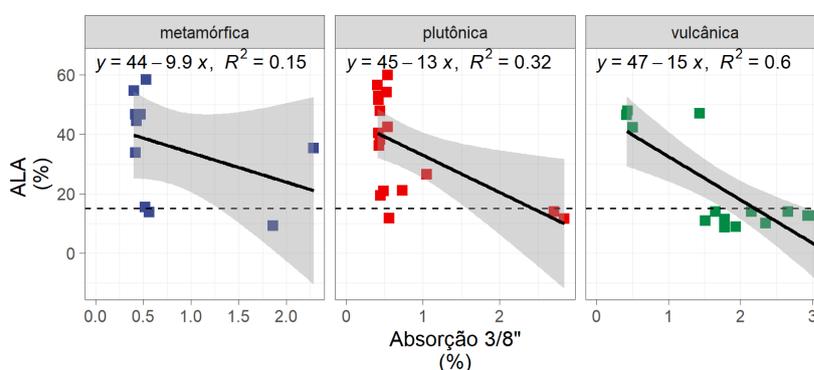


Figura 4-86 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Absorção (%) referente as rochas.



Embora seja apontado por diversos autores a influência da absorção na queda da resistência do agregado, para o ensaio ALA nota-se que o fator preponderante é a granulação, pois, neste caso, quanto maior a granulação dos constituintes, maior o desgaste. Portanto, rochas cuja mineralogia é identificável à vista desarmada tendem a apresentar perdas relativamente grandes no ensaio de Abrasão Los Angeles (SANTOS, 1990).

4.3.3.2.2 Esmagamento

Na Tabela 4-53 são expressos os valores da relação entre o ensaio de Esmagamento e absorção.

Tabela 4-53 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,47	0,24	0,012	0,007
F de significância (ANOVA)*	9,65 x 10 ⁻⁷	0,004	0,07	0,11

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

No geral, o conjunto de rochas e rochas vulcânicas, apresentam relação entre ABS (3/8”) e Esmagamento, porém, assim como no ensaio ALA, a correlação é negativa. Por conseguinte, para o “conjunto de rochas” a variável independente explica 47% da variável dependente, para as rochas vulcânicas, a relação é explicada por 24%. Salienta-se ainda que, inesperadamente, a correlação se mostrou negativa, em outras palavras, à medida que a absorção aumenta, o valor da resistência diminui. De certo modo, esperava-se o oposto, pois rochas na condição saturada tendem a apresentar resistência inferior à condição seca ao ar.

Diante disso, a Figura 4-87 ilustra o gráfico de regressão linear do conjunto de rochas e na Figura 4-88 é apresentado o resultado separado por litologia.

Figura 4-87 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.

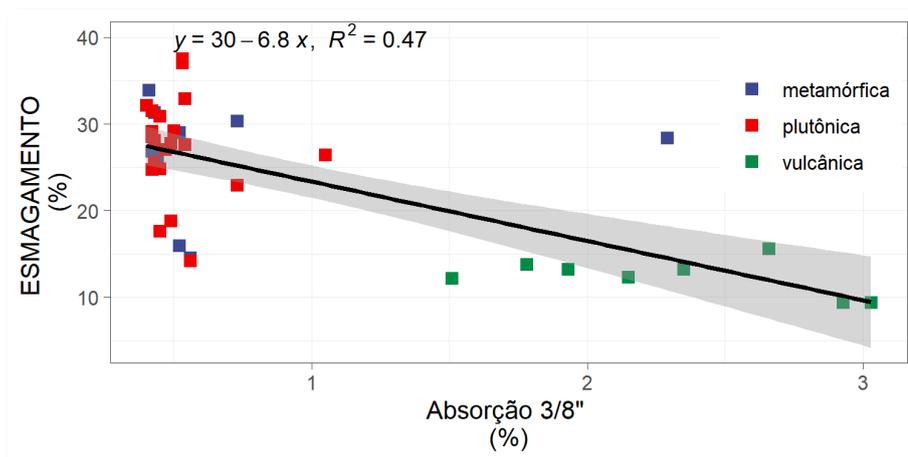
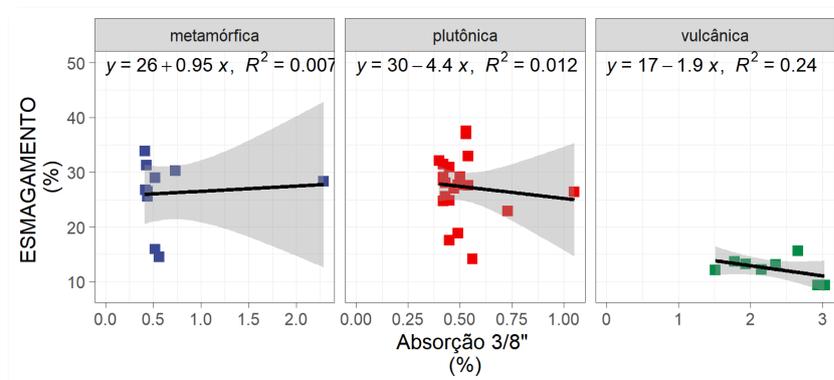


Figura 4-88 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Absorção (%) separado por litologia.



4.3.3.2.3 Treton

A Tabela 4-54 resume as análises estatísticas aplicadas a absorção referente a Pilha 3/4" e o ensaio de resistência Treton e nas Figura 4-89 e Figura 4-90 são expressos os gráficos com os modelos matemáticos.

Tabela 4-54 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,20	0,67	0,07	0,34
F de significância (ANOVA)	0,0019	0,025	0,145	0,614

*Considerado significante quando o valor F de significância for < 0,05

Nota-se que no geral, apenas as rochas de origem plutônicas não apresentaram correlação entre as variáveis absorção e Treton. No entanto, as litologias metamórficas e vulcânicas, cujas rochas apresentaram as maiores relações, apresentam correlações diferentes. Para o conjunto de dados utilizado nesta pesquisa, as rochas vulcânicas apresentaram correlação negativa, ou seja, à medida que a absorção aumenta, o valor do Treton diminui, entretanto, quanto menor o valor, melhor a resistência do material, fato este não condizente com a realidade. Por sua vez, as rochas metamórficas apresentaram o oposto, à medida que a absorção aumenta o valor de Treton aumenta, porém, a resistência diminui.

Figura 4-89 - Gráfico de regressão linear entre Treton (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.

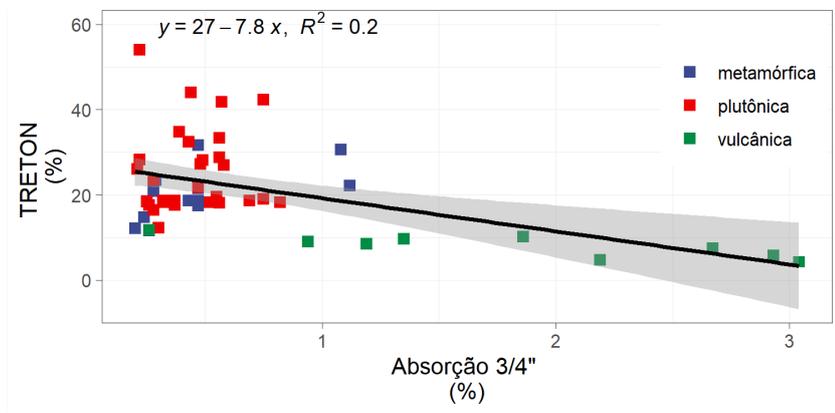
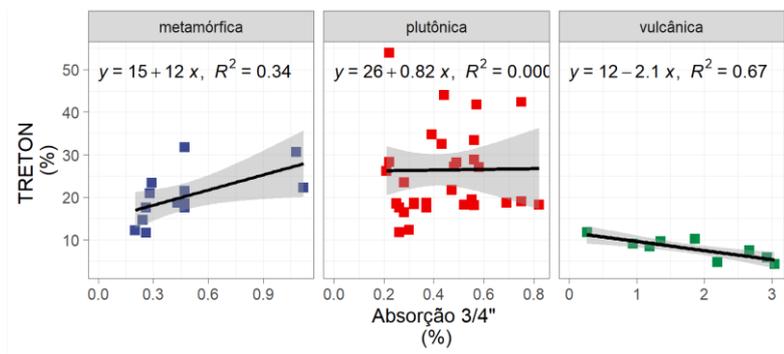


Figura 4-90 - Gráfico de regressão linear entre Treton (%) vs Absorção (%) separado por litologia.



4.3.3.2.4 Is(50) seco

A Tabela 4-55 apresenta os resultados estatístico obtidos na relação Is(50)seco e absorção.

Tabela 4-55 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,03	0,32	0,16	0,54
F de significância (ANOVA)*	0,22	0,02	0,21	0,15

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Conforme pode ser observado, apenas a litologia composta por rochas vulcânicas apresentou, estatisticamente, correlação significativa, sendo negativa, ou seja, o aumento da absorção acarreta a diminuição da resistência mecânica. Porém, a variável absorção só explica 32% da variável $Is(50)_{seco}$.

A Figura 4-91 e Figura 4-92 apresentam os gráficos gerados nessa regressão linear.

Figura 4-91 - Gráfico de regressão linear entre $Is(50)_{seco}$ (Mpa) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.

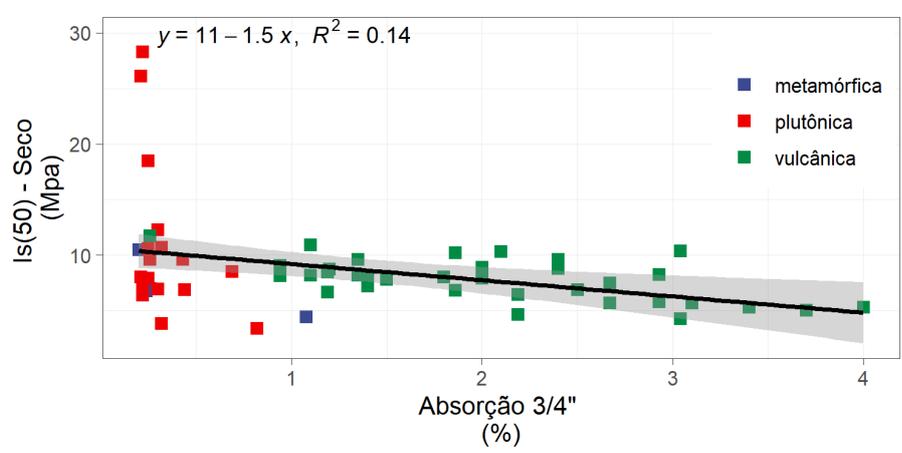
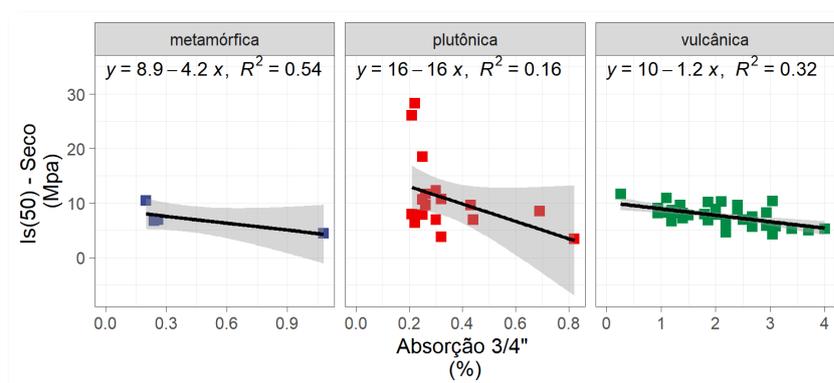


Figura 4-92 - Gráfico de regressão linear $Is(50)_{seco}$ (Mpa) vs Absorção (%) separado por litologia.



Por intermédio do resultado estatístico, pode-se avaliar ainda a influência do tempo de saturação utilizado no ensaio com o viés em avaliar a resistência mecânica com o material submetido na pior situação, ou seja, saturado em água. Nesse sentido, os dados corroboram para a avaliação realizada anteriormente e discutida no item 4.2.6.1, ou seja, as rochas plutônicas e

metamórficas, apresentam absorção inferior às vulcânicas, portanto, ao submeter essas litologias a saturação, conforme ISRM (1985) por 72 horas, provavelmente o material não apresentará resistência inferior à condição seca ao ar, pois o tempo utilizado não é suficiente para que, esse tipo de material sature e influencie na resistência da amostra.

4.3.3.3 Características mecânicas versus durabilidade

Em vista dos agregados utilizados nos ensaios de resistência mecânica apresentarem material graúdo, a análise da influência da durabilidade apresentada a seguir refere-se apenas a sanidade obtida em relação a essa faixa granulométrica. Além disso, neste tópico foram utilizados os resultados apresentados nos seguintes trabalhos: Fiorentini (2002), Ribeiro (2006), Pinheiro (2009), Boeira (2014), Meurer (2015), Paiva (2017), Remédio (2017), Back (2018), Faccin (2018), Curtis (2019), Ceccato (2021). A seguir serão apresentados os resultados obtidos referente a essa análise, tendo como as seguintes hipóteses estabelecidas:

Por conseguinte, as hipóteses estabelecidas foram:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência da variável SANIDADE GRAÚDO sobre ALA;
- $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência da variáveis SANIDADE GRAÚDO sobre ALA.

4.3.3.3.1 Abrasão Los Angeles

A Tabela 4-56 traz os resultados estatísticos obtidos na relação entre ALA e sanidade do agregado graúdo.

Tabela 4-56 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R^2	0,164	0,000	0,048	0,46
F de significância (ANOVA)*	0,0064	0,93	0,544	0,02

*Considerado significativo quando o valor F de significância for $< 0,05$

De acordo com os resultados estatísticos, apenas o “conjunto de rochas” e as rochas metamórficas, rejeitaram a hipótese nula. Assim a variável independente explica 16% da variável dependente para o modelo gerado pelo conjunto de rochas. Para, as rochas metamórficas, a variável sanidade tem influência de 46% sobre a ALA. Como pode ser averiguado pela Figura 4-93 e Figura 4-94, à medida que a sanidade aumenta, maior é a perda de resistência no ensaio ALA, tanto para o conjunto de rochas, como para as rochas metamórficas.

Figura 4-93 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Sanidade (%) referente ao conjunto de rochas.

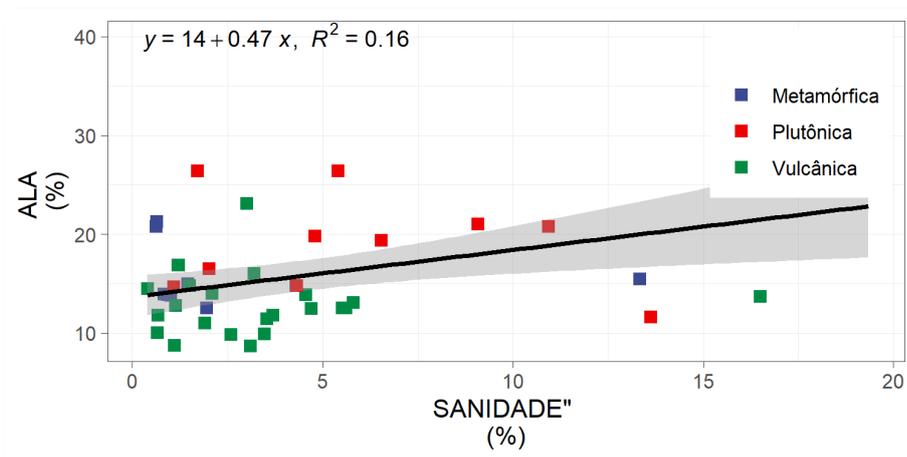
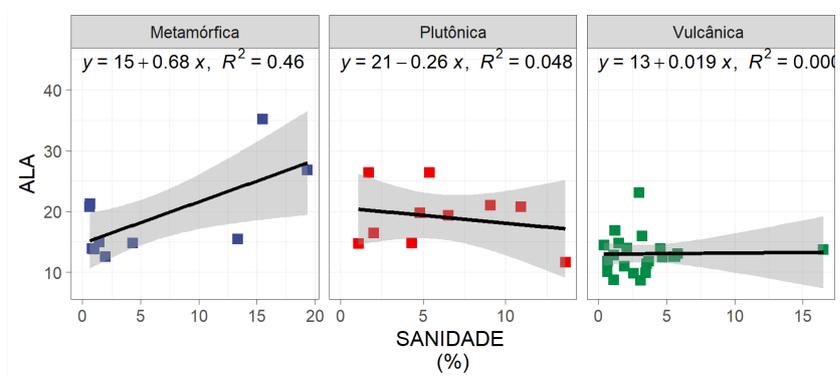


Figura 4-94 - Gráfico de regressão linear entre ALA (%) vs Sanidade (%) separado por litologia.



4.3.3.3.2 Esmagamento

Na Tabela 4-57 são apresentados os resultados oriundos da análise estatística empregada entre o ensaio de Esmagamento e sanidade.

Tabela 4-57 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,24	0,026	0,72	0,24
F de significância (ANOVA)	0,029	0,663	0,06	0,51

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Apenas o conjunto de rochas apresentou relação significativa entre Esmagamento e sanidade. Porém, apenas 24% da variável independente (sanidade) consegue explicar a variável dependente (Esmagamento). A Figura 4-95 e Figura 4-96 apresentam os gráficos obtidos na análise.

Figura 4-95 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Sanidade (%) referente ao conjunto de rochas.

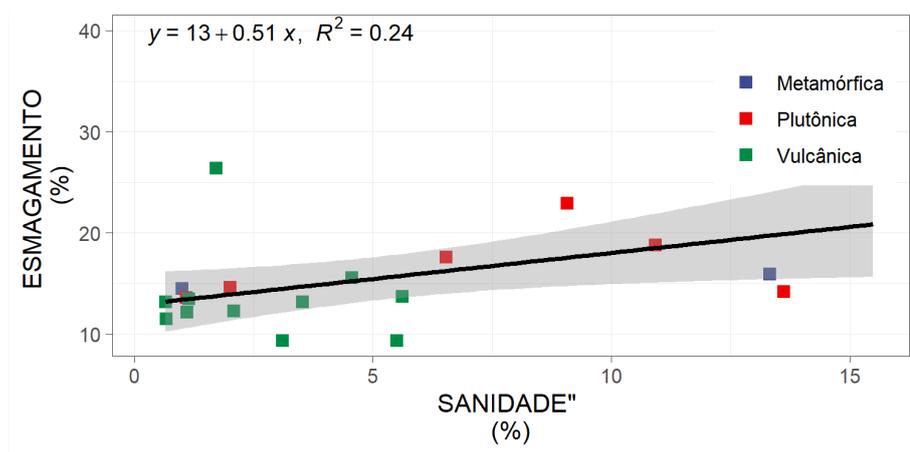
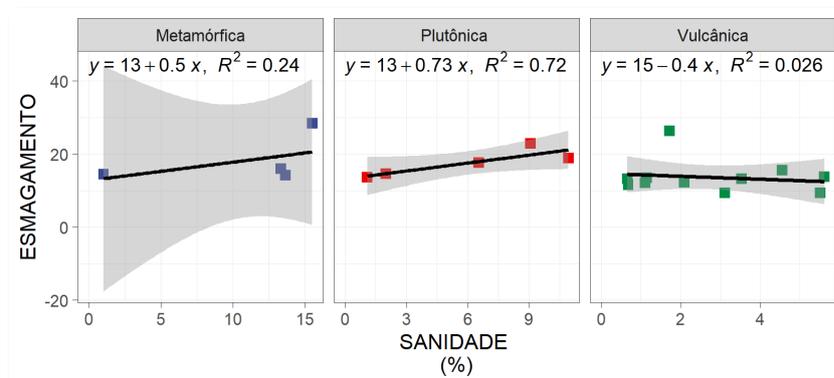


Figura 4-96 - Gráfico de regressão linear entre ESM (%) vs Sanidade (%) separado por litologia.



4.3.3.3.3 Treton

Na Tabela 4-58 são apresentados os resultados estatísticos obtidos entre os ensaios de Treton e sanidade.

Tabela 4-58 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,34	0,00	0,42	0,21
F de significância (ANOVA)*	0,0068	0,70	0,16	0,44

*Considerado significante quando o valor F de significância for < 0,05

Assim como nos demais ensaios, a sanidade só mostrou significância para o conjunto de rochas. Neste caso, em especial, a variável sanidade explica 34% da variável Treton para o modelo matemático gerado. A Figura 4-97 e Figura 4-98 ilustram os gráficos da respectiva análise.

Figura 4-97 - Gráfico de regressão linear entre Treton (%) vs Sanidade (%) referente ao conjunto de rochas.

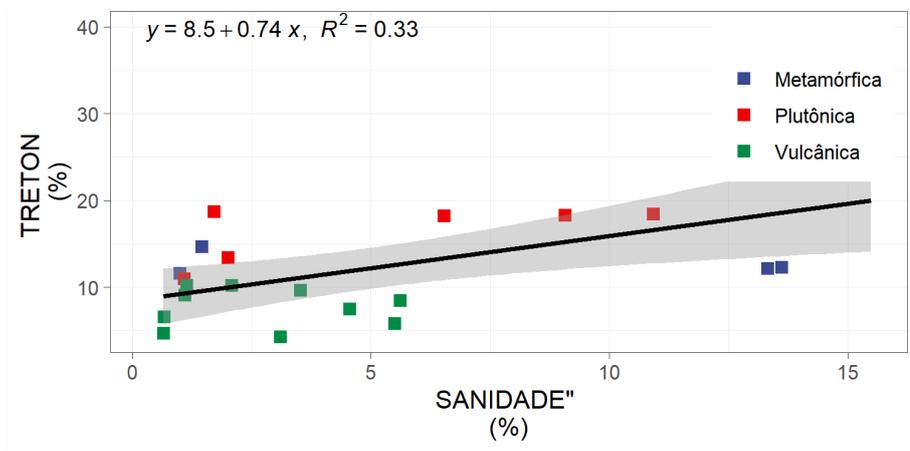
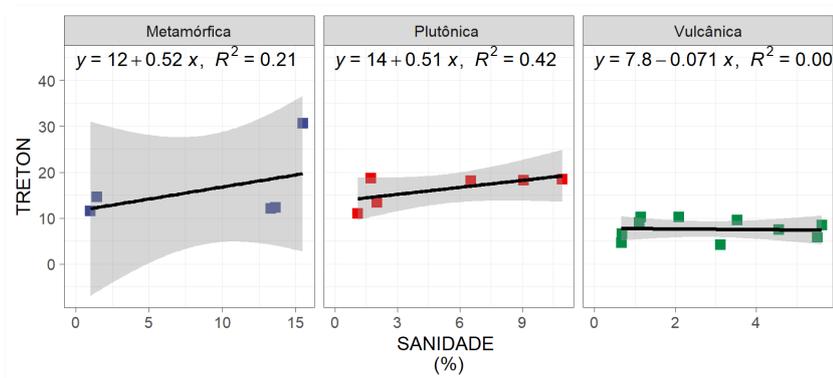


Figura 4-98 - Gráfico de regressão linear entre Treton (%) vs Sanidade (%) separado por litologia.



4.3.3.4 Características mecânica versus análise petrográfica

Conforme mencionado no item 4.2.5.1.1, os ensaios de resistência mecânica Abrasão Los Angeles e Esmagamento apresentaram forte correlação com a análise petrográfica, principalmente em associação à granulação da rocha de origem. Diante desse fato, neste capítulo, aplicou-se a mesma análise a uma gama maior de dados. Para isto, foram utilizados resultados presentes nos trabalhos de Paiva (2017), Back (2018), Remédio (2017), Curtis (2019) e Trotta (2020). Foram utilizadas as seguintes hipóteses como premissas:

- H_0 : $B = 0$, ou seja, não há influência da variável granulação sobre ALA/Esmagamento/Treton
- H_1 : $B \neq 0$, neste caso, há influência da variável granulação sobre ALA/Esmagamento/Treton

Na respectiva análise, foram estabelecidos os seguintes critérios para a granulometria: fina (5); média (10); grossa (15); porfirítica (20). A

Tabela 4-59 traz os resultados estatísticos obtidos entre a análise granulação e os ensaios mecânicos: Abrasão Los Angeles, Esmagamento e Treton.

Tabela 4-59 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

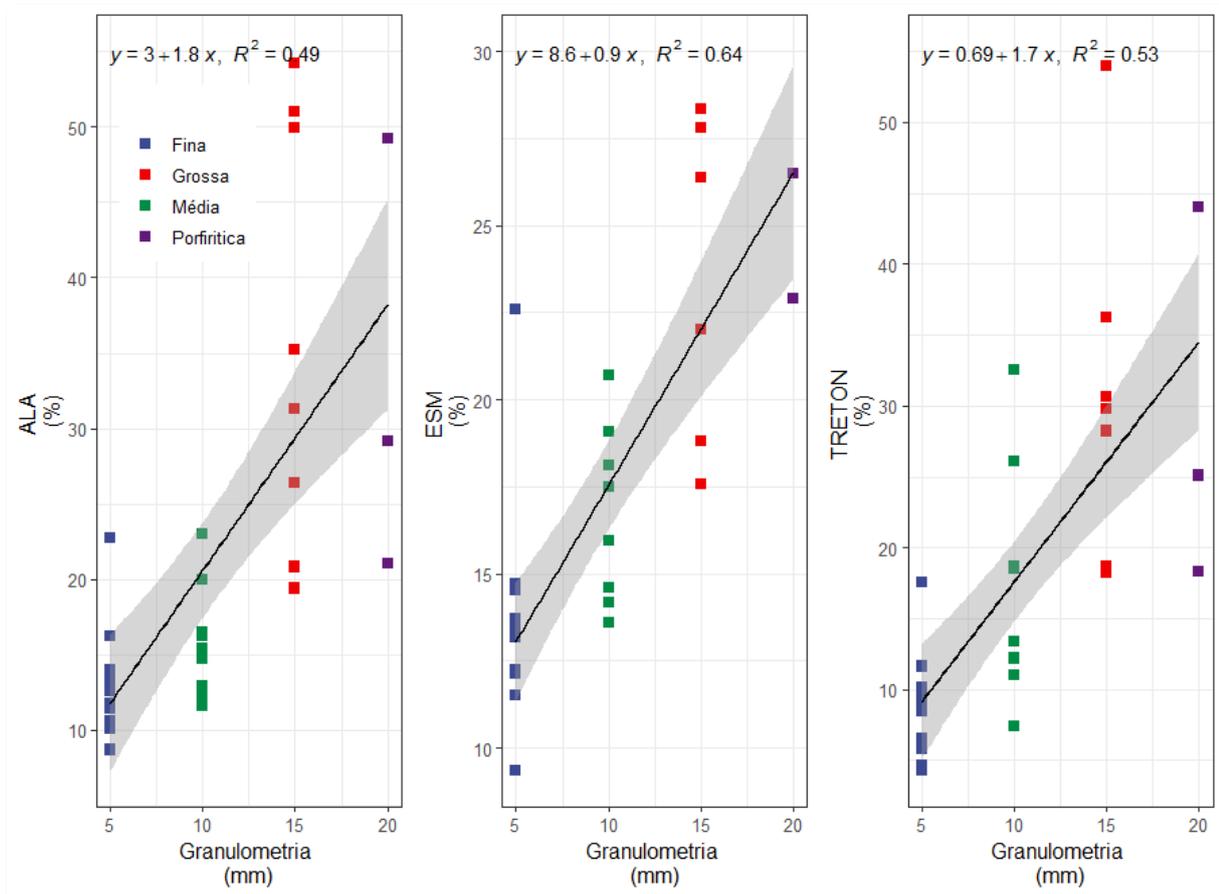
Parâmetro Estatístico	ALA	ESM	Treton
R^2	0,49	0,63	0,54
F de significância (ANOVA)*	$3,28 * 10^{-6}$	$1,55 * 10^{-7}$	$4,62 * 10^{-7}$

*Considerado significante quando o valor F de significância for $< 0,05$

Para todos os dos ensaios utilizados, a variável independente granulação apresentou grande significância, fato esse que corrobora com os trabalhos de Kazi e Al- Mansour (1980), Marques (2001), Keikha e Keikha (2013), Alves (2014), Nagali et al (2016), Back (2018) e Curtis (2019). A resistência aumenta à medida que diminui o tamanho do grão mineral associado à textura da rocha, conforme pode ser observado na Figura 4-99, através da correlação linear positiva.

Para o ensaio ALA a variável granulação explica 49% dos dados, para o Esmagamento, essa relação remete a 63% no Treton, explica 54%. Além disso, conforme pode ser observado nos gráficos, agregados de granulação fina, independente do teste, no geral, apresentaram resistência inferior a 15% (linha tracejada). Para as rochas porfiríticas, os valores de resistência são inferiores as rochas grosseiras. Portanto, estatisticamente, os modelos gerados, com um nível de confiança de 95%, apresentam grande significância.

Figura 4-99 - Gráfico de regressão linear entre ALA, ESM e Treton (%) vs Granulometria (mm) ensaios mecânicos e granulação da rocha.



4.3.3.5 Índices Físicos

Em vista da influência da absorção na densidade das rochas, como forma de avaliação da alteração do mesmo, a seguir serão avaliados a massa específica aparente versus absorção e absorção versus sanidade. Desta forma, o banco de dados desta análise conta com os resultados dos seguintes autores: Fiorentini (2002), Ribeiro (2006), Pinheiro (2009), Boeira (2014), Meurer (2015), Paiva (2017), Remédio (2017), Back (2018), Faccin (2018), Curtis (2019), Ceccato (2021). Assim, foram utilizadas como premissas as seguintes hipóteses:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência da variável Absorção ($\frac{3}{4}$ " e /ou Absorção ($\frac{3}{8}$ " sobre M.E.A ($\frac{3}{4}$ " e/ou M.E.A ($\frac{3}{8}$ ");
- $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência da variáveis Absorção ($\frac{3}{4}$ " e /ou Absorção ($\frac{3}{8}$ " sobre M.E.A ($\frac{3}{4}$ " e/ou M.E.A ($\frac{3}{8}$ ");

4.3.3.5.1 M.E.A versus Absorção

A Tabela 4-60 apresenta os valores obtidos entre M. E.A e absorção referente à Pilha 3/4".

Tabela 4-60 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetro Estatístico	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,00	0,25	0,12	0,32
F de significância (ANOVA)*	0,53	0,019	0,05	0,014

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Através da análise de correlação, nota-se que, para o conjunto de rocha, a hipótese nula é aceitável, ou seja, não há correlação entre M. E.A e absorção (Figura 4-100). Na avaliação por litologia, todas as variáveis ensaiadas exibem valor de R² abaixo de 0,5, no entanto, o F de significância apresentou valores que permitem interpretar que neste caso, estaticamente existe correlação entre as variáveis.

Conforme pode ser observado na Figura 4-101, a medida que a absorção aumenta a massa específica aparente diminui, que dê certo tem coerência, visto que, rochas em processo de alteração ou que, apresentam amígdalas e vesículas, por exemplo as vulcânicas ácidas, têm maior absorção e, conseqüentemente, tendem a uma M.E.A menor.

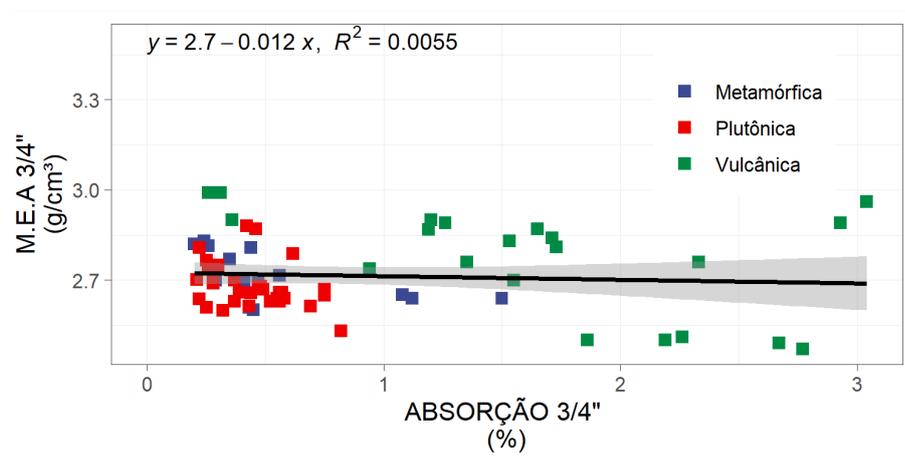
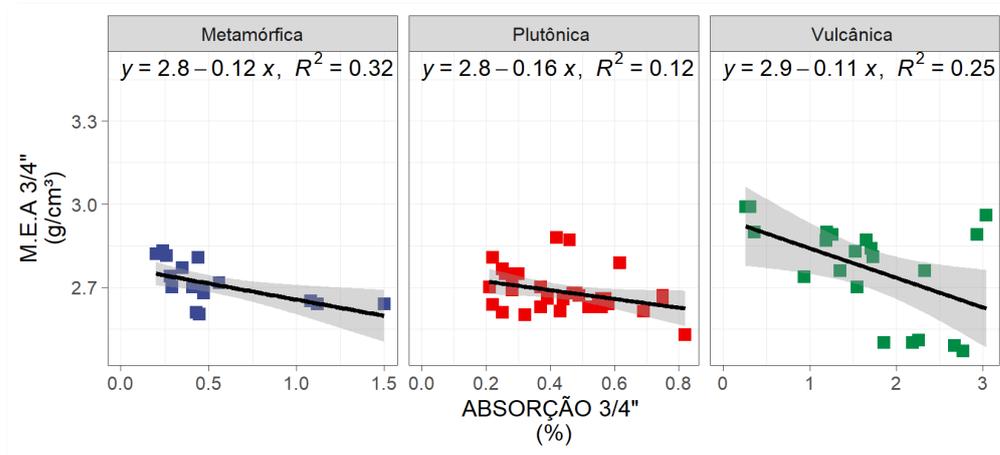
Figura 4-100 - Gráfico de regressão linear entre M.E.A (g/cm³) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.

Figura 4-101 - Gráfico de regressão linear entre M.E.A (g/cm³) vs Absorção (%) separado por litologia.



A Tabela 4-61 ilustra os resultados estatísticos entre a M. E.A, porém agora considerando os dados de absorção da pilha 3/8".

Tabela 4-61 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros Estatístico	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,0065	0,057	0,64	0,43
F de significância (ANOVA)*	0,596	0,429	7,726 * 10 ⁻⁶	0,04

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Para o conjunto de dados utilizado na presente pesquisa, apenas as rochas metamórficas apresentaram como resultado a rejeição da hipótese nula e aceitação da hipótese alternativa. Ou seja, para o modelo matemático gerado, 43% da variável M. E.A pode ser explicado pela variável absorção. A Figura 4-102 e a Figura 4-103 apresentam os gráficos obtidos na respectiva análise.

Figura 4-102 - Gráfico de regressão linear entre M.E.A (g/cm³) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.

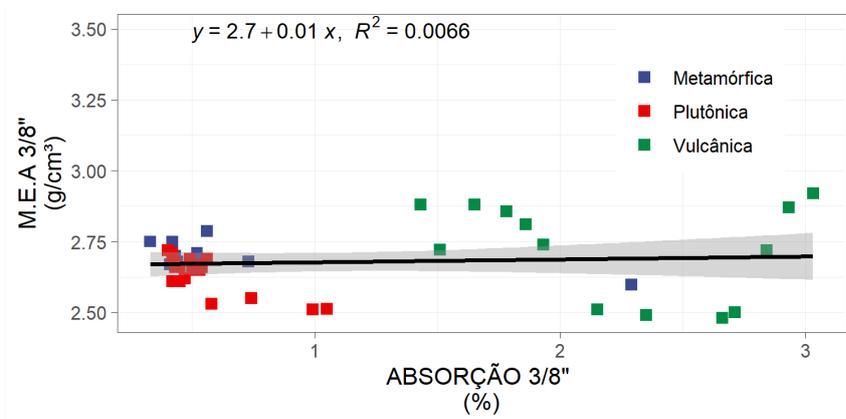
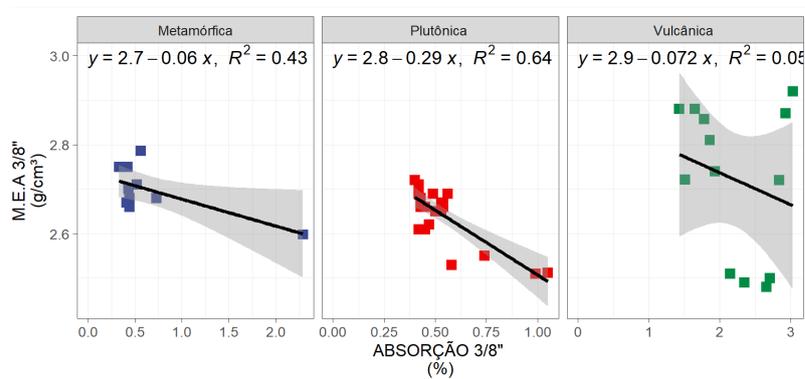


Figura 4-103 - Gráfico de regressão linear entre M.E.A (g/cm³) vs Absorção (%) separado por litologia.



4.3.3.5.2 Índices Físicos versus durabilidade

A Tabela 4-62 mostra a relação entre durabilidade graúdo e absorção referente à Pilha 3/4". O ensaio de durabilidade trata-se de uma simulação da situação de gelo e degelo imposta à rocha. O sulfato de sódio utilizado tende a penetrar pelas fraturas e poros existentes no agregado e, ao ser submetido aos ciclos de imersão e estufa, cristaliza, o que leva a fratura e quebra dos materiais. Portanto, espera-se que exista uma relação entre a absorção de água e durabilidade, visto que, à medida que as rochas se alteram, espaços vazios tendem a aumentar e, conseqüentemente, há uma elevada capacidade de absorver água.

Tabela 4-62 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros Estatísticos	Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
R ²	0,1072	0,2139	0,516	0,55
F de significância (ANOVA)*	0,010	0,0023	0,044	0,0086

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Ao avaliar o conjunto de rochas, embora o F de significância tenha apresentado resultados que permite a correlação como coerente ($p\text{-value} < 0,05$), o valor obtido na análise indica uma correlação fraca (R^2 0,11) (Figura 4-104). No entanto, para as rochas vulcânicas, a durabilidade pode ser explicada por 21% da absorção. Para as rochas plutônicas, essa relação é de 52% e por fim, as rochas metamórficas ostentam melhor resultado, sendo de 55% (Figura 4-105).

Fiorentini (2002), em seu estudo com rochas ígneas, avaliou a relação entre essas duas propriedades e, com base nos resultados obtidos, argumenta que a relação se mostra válida quando se trata da mesma rocha (mesmo tipo litológico). Assim, os resultados obtidos no presente estudo, corroboram com as observações apontada por esse autor.

Figura 4-104 - Gráfico de regressão linear entre Sanidade (%) vs Absorção (%) referente ao conjunto de rochas.

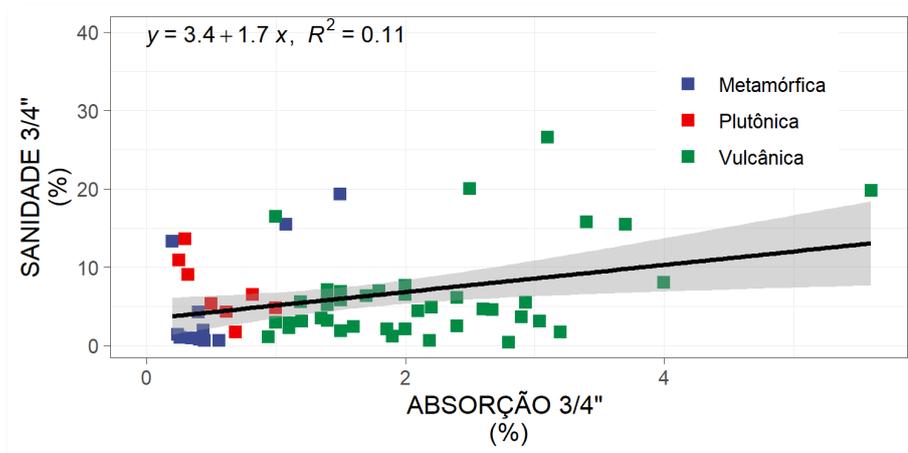
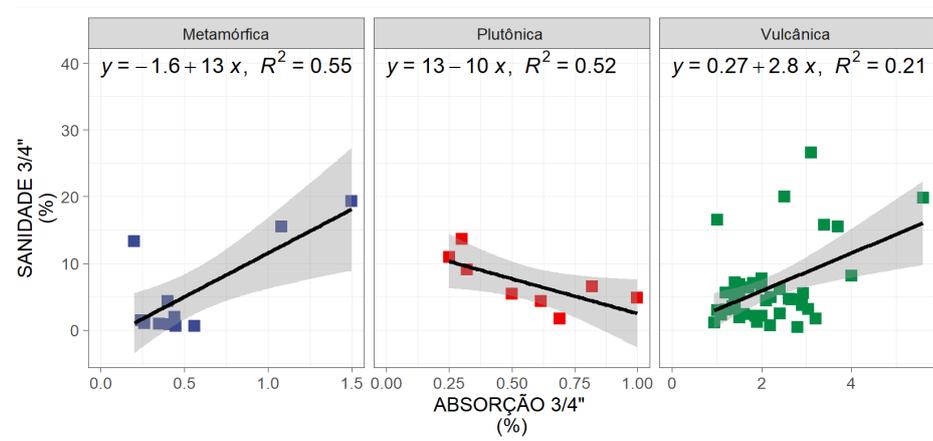


Figura 4-105 - Gráfico de regressão linear entre Sanidade (%) vs Absorção (%) separado por litologia.



4.3.3.6 Angularidade do Agregado Miúdo

Com o propósito em complementar as análises já discutidas no item 3.2.5.3, foram aplicadas algumas análises estatísticas com base nos dados obtidos na angularidade do agregado fino (FAA), cisalhamento direto e PDI. Sendo assim, para esta análise, foram utilizados os resultados dos trabalhos de: Gouveia (2002), Rodrigues (2019) e Ceccato (2021). Deste modo, foram utilizadas as seguintes hipóteses:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência da variável AFF e/ ou PDI, sobre Resistência e/ou AFF;
- $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência da variável AFF e/ ou PDI, sobre Resistência e/ou AFF;
- AFF versus Ângulo de atrito (θ)

Nesta análise, buscou-se avaliar estatisticamente os dados oriundos dos ensaios de angularidade do agregado fino (AFF) correlacionando com os valores de cisalhamento direto. A Tabela 4-63 expõe os valores obtidos.

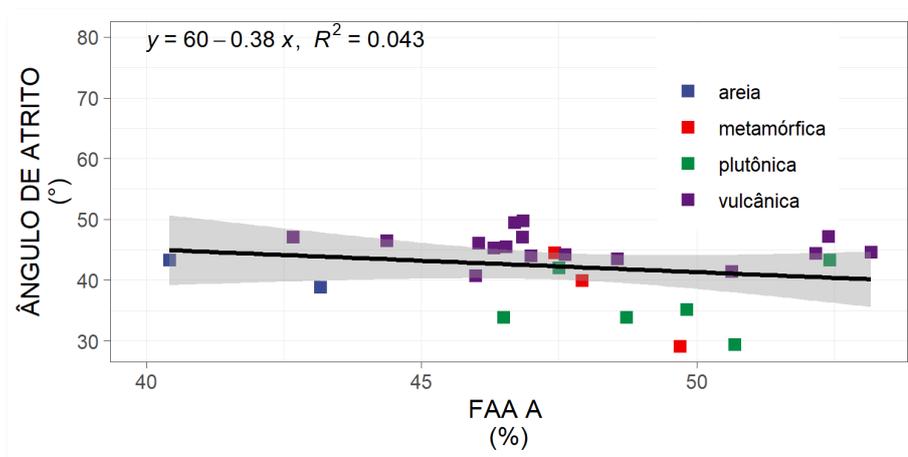
Tabela 4-63 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros Estatísticos	Conjunto das Rochas
R ²	0,04
F de significância (ANOVA)*	0,300

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Os resultados estatísticos corroboram com observações já abordadas e discutidas por Gouveia (2002), o ensaio de AFF não explica a angularidade do agregado miúdo. Observando o gráfico apresentado na Figura 4-106, os maiores valores de AFF nem sempre apresentaram resistência elevada. Portanto, o ensaio de AFF por si só não consegue avaliar a angularidade do agregado miúdo.

Figura 4-106 - Gráfico de regressão linear entre Ângulo de atrito (°) vs FAA-A (%) referente ao conjunto de rochas.



- FAA versus PDI

A fim de comparação entre o ensaio laboratorial e PDI, foi realizada uma análise estatística entre essas variáveis. A Tabela 4-64 resume os valores obtidos.

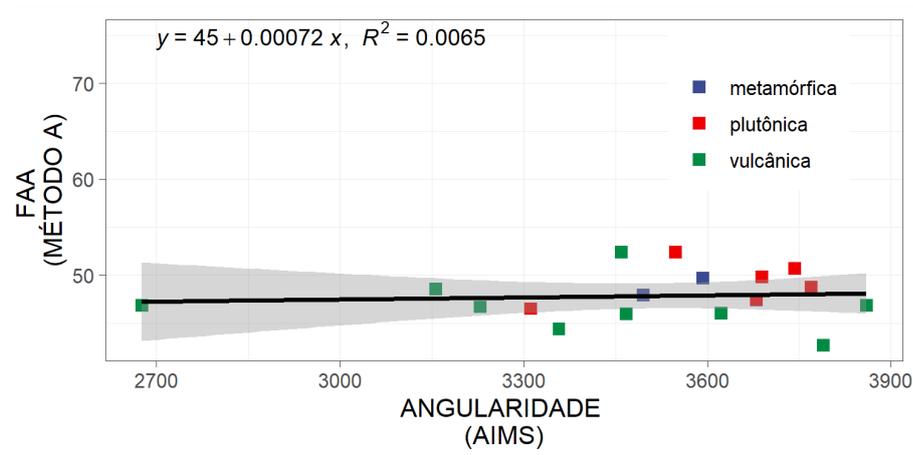
Tabela 4-64 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros Estatísticos	Conjunto das Rochas
R ²	0,006
F de significância (ANOVA)*	0,75

*Considerado significante quando o valor F de significância for < 0,05

Com base nos resultados, as variáveis FAA e PDI não apresentaram correlação entre si, ou seja, neste caso, também, a hipótese nula é aceita (p-valor > 0,05). O gráfico da Figura 4-107 é apresentado para fins de esclarecimento de como os dados se comportaram em relação à reta de regressão.

Figura 4-107 - Gráfico de regressão linear entre FAA – A (%) vs Angularidade - AIMS referente ao conjunto de rochas.



- PDI versus Ângulo de atrito (θ)

Nesta última análise, buscou-se avaliar o resultado obtido por meio do PDI versus o cisalhamento direto, conforme apresentado na Tabela 4-65.

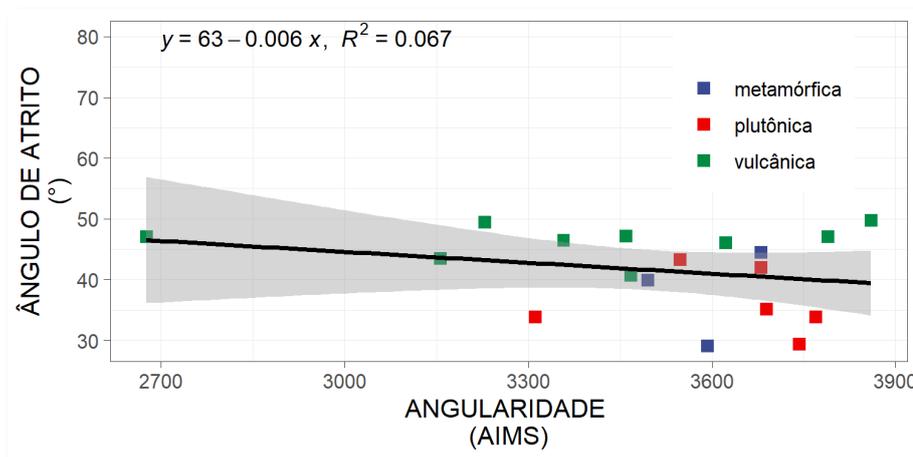
Tabela 4-65 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão linear.

Parâmetros Estatísticos	Conjunto das Rochas
R ²	0,066
F de significância (ANOVA)*	0,30

*Considerado significante quando o valor F de significância for < 0,05

Embora a avaliação da angularidade do agregado miúdo tenha sido avaliada através do processamento digital de imagem, nota-se que, os resultados obtidos entre esse ensaio e o cisalhamento direto não apresentaram significância ($p\text{-valor} > 0,005$). Conforme discutido na literatura e tendo como hipótese que a elevada angularidade gera aumento na θ , estatisticamente, a um nível de confiança de 95%, essa relação não foi plausível, conforme apresentado na Figura 4-108.

Figura 4-108 - Gráfico de regressão linear entre Ângulo de atrito ($^{\circ}$) vs Angularidade - AIMS referente ao conjunto de rochas.



4.3.4 Análise de regressão múltipla

Na análise de regressão linear simples, embora os testes, de intervalo de confiança, Stat t e valor-p tenham sido atendidos, em alguns casos, o modelo gerado apresentou baixo valor de porcentagem da variável independente na influência da variável dependente. Em vista disso, para melhorar os modelos, pode-se analisar a influência de mais de uma variável independente sobre a variável dependente, para isso, faz-se necessário a aplicação da regressão linear múltipla.

Mediante o exposto, este tópico tem por objetivo apresentar a regressão linear multivariada, com o intuito de obter um modelo matemático em que as variáveis independentes expliquem de modo mais preciso a variável dependente, isto é, não somente atenda os testes impostos, mas também, apresente um R^2 mais significativo.

4.3.4.1 Características mecânicas

A princípio buscou-se avaliar o comportamento estatístico entre os ensaios de resistência mecânica. Em primeiro lugar, foi utilizado como variável dependente, o ensaio de abrasão, ALA e, como variável independente, os ensaios de quebra, Esmagamento e tenacidade, Treton. Na sequência utilizou-se como variável dependente os ensaios de carga pontual (Is (50) seca) e como variáveis independentes, Abrasão Los Angeles e Esmagamento.

4.3.4.1.1 Abrasão Los Angeles versus Esmagamento e Treton

Com o objetivo de avaliar a influência do Esmagamento e Treton na resistência mecânica ALA e, com base no resultado propor um modelo matemático que permite inferir um ensaio com base nos demais resultados, a seguir são apresentadas as hipóteses utilizadas como premissas:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência das variáveis Esmagamento e Treton sobre ALA
- $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência das variáveis Esmagamento e Treton sobre ALA

A Tabela 4-66 resume os resultados estatísticos obtidos na respectiva análise.

Tabela 4-66 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão multivariada.

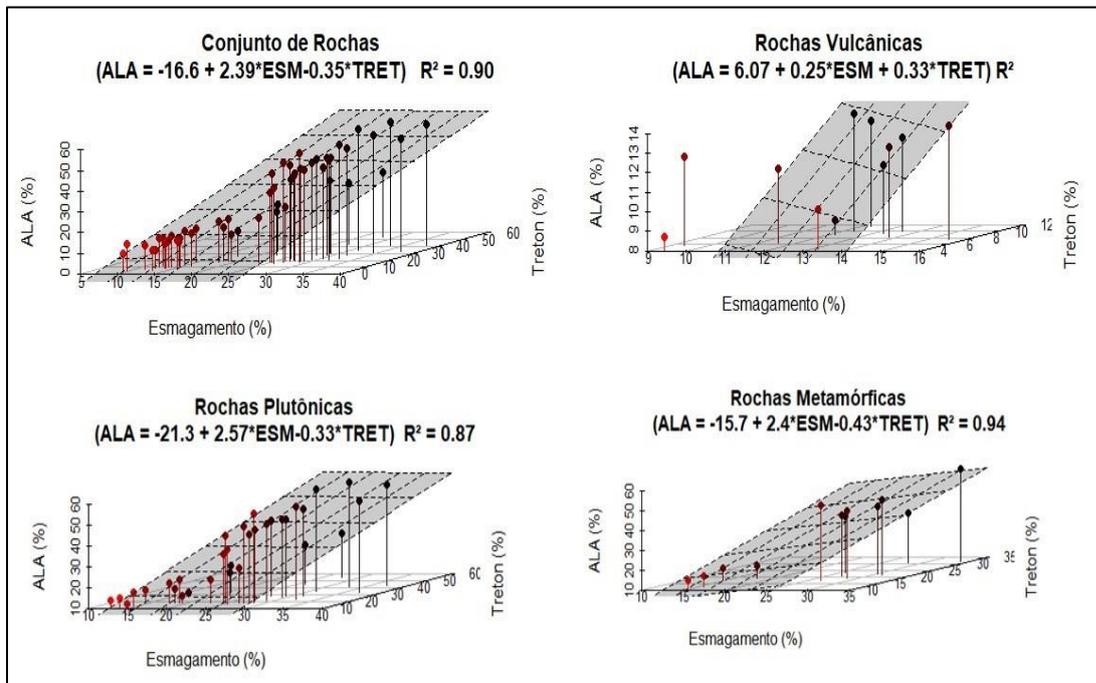
Parâmetros Estatísticos		Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas	Rochas Metamórficas
Resumo	R ²	0,90	0,325	0,88	0,94
	R ² ajustado	0,90	0,157	0,87	0,93
	F de significância (ANOVA)*	2,2 x 10 ⁻⁵	0,207	2,2x10 ⁻¹⁶	2,77x 10 ⁻⁶
Esmagamento	Coef. Angular	2,39	0,2495	2,57	2,41
Treton	Coef. Angular	-0,35	0,33	-0,34	-0,43

*Considerado significante quando o valor F de significância for < 0,05

A priori, apenas as rochas metamórficas não obtiveram um modelo matemático que permita avaliar o ensaio de ALA com base nos demais ensaios, Esmagamento e Treton. Neste caso, assim como avaliado individualmente, a hipótese nula é aceita. Por outro lado, as demais

situações apresentaram um modelo matemático que permite afirmar que as variáveis independentes, Esmagamento e Treton, têm influência significativa sobre ALA (Figura 4-109).

Figura 4-109 - Gráfico de regressão multivariada referente ao conjunto de rochas.



Portanto, conclui-se, que este modelo é melhor do que os anteriores (ALA versus Esmagamento e ALA versus Treton), e nos três testes (significância, t e, p -valor) que comprovam que as variáveis Esmagamento e Treton juntas têm mais influência significativa sobre ALA, conforme pode ser comprovado pelo valor de R^2 acima de 0,8. Em síntese, as variáveis independentes Esmagamento e Treton, juntas, explicam mais de 80% da variável dependente ALA.

4.3.4.1.2 Abrasão Los Angeles versus Esmagamento e Is(50)Seco

Com o propósito de avaliar se um modelo matemático gerado entre as variáveis independentes, Is(50)Seco em adição ao Esmagamento, permite obter a variável dependente, ALA, foram testadas as seguintes hipóteses:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência das variáveis Esmagamento e Is(50)Seca sobre ALA

- $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência das variáveis Esmagamento e Is(50)Seca sobre ALA

A Tabela 4-67 resume os dados estatísticos obtidos na avaliação.

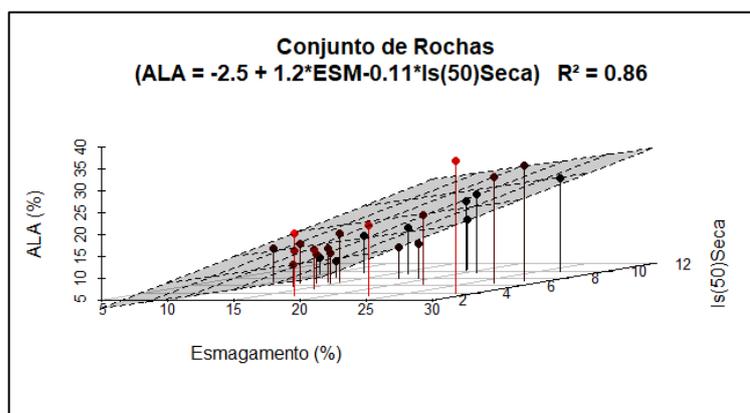
Tabela 4-67 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão multivariada.

Parâmetros Estatísticos		Conjunto das Rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas Plutônicas
Resumo da Estatística	R ²	0,86	0,325	0,79
	R ² ajustado	0,84	0,157	0,75
	F de significância (ANOVA)*	2,067x10 ⁻¹⁰	0,207	0,000
Esmagamento	P - valor	4,65x10 ⁻¹¹	0,08	0,000
Is(50) seco	P-valor	0,694	0,77	0,96

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

O teste de significância apresentou valor extremamente baixo, dentro do limite a ser considerado (F de significância < 0,05), associado à variável Esmagamento, visto que ela apresentou valor p (p-valor) extremamente inferior em comparação a variável Is(50)seca. Surpreendentemente, em todas as análises realizadas, para o conjunto de rochas a variável dependente, ALA, não é obtida por intermédio das variáveis independente, Esmagamento e Is(50)seca. Portanto, o modelo matemático gerado na análise estatística não pode ser aplicado (Figura 4-110).

Figura 4-110 - Gráfico de regressão multivariada entre ALA (%) vs ESM (%) e Is(50) (Mpa) seca referente ao conjunto de rochas.



4.3.4.1.3 Abrasão Los Angeles versus Absorção ($\frac{3}{4}$ " e Absorção ($\frac{3}{8}$ "

Conforme apresentando na regressão linear simples (item 4.3.3), a avaliação realizada entre o ensaio mecânico ALA versus absorção foi aplicado de modo separado para cada fração. Tendo em vista que no respectivo ensaio, faz-se o uso de ambas as frações (i.e., $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ "), realizou-se uma análise multivariada utilizando esses dados. Portanto, foram aplicadas as seguintes hipóteses:

- $H_0 : B = 0$, ou seja, não há influência das variáveis Absorção ($\frac{3}{4}$ "), Absorção ($\frac{3}{8}$ ") sobre ALA.
- $H_1 : B \neq 0$, neste caso, há influência das variáveis Absorção ($\frac{3}{4}$ "), Absorção ($\frac{3}{8}$ ") sobre ALA.

A Tabela 4-68 apresenta os resultados estatísticos obtidos nesta análise.

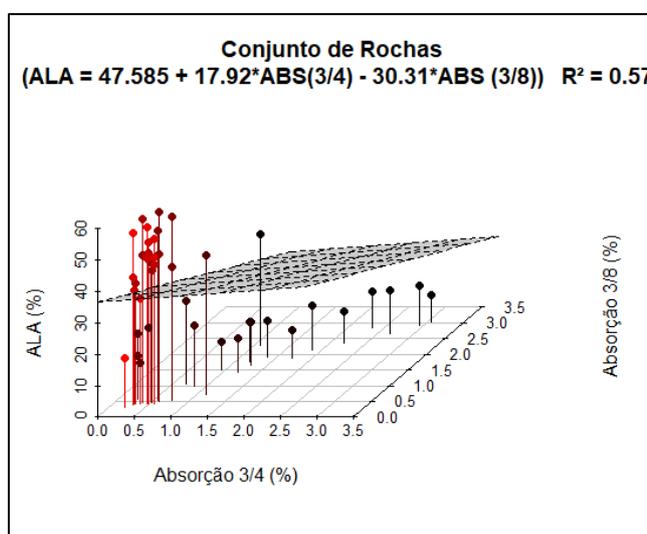
Tabela 4-68 - Resultado dos coeficientes de correlação e análise de regressão multivariada.

Parâmetros Estatísticos		Conjunto das Rochas
Resumo da Estatística	R ²	0,57
	R ² ajustado	0,55
	F de significância (ANOVA)*	1,91*10 ⁻⁸
Absorção ($\frac{3}{4}$ ")	P - valor	0,016
Absorção ($\frac{3}{8}$ ")	P-valor	2,37*10 ⁻⁵

*Considerado significativo quando o valor F de significância for < 0,05

Em vista do número reduzido de amostras para as litologias, optou-se por apresentar e avaliar apenas o resultado do conjunto de rochas. Na análise de regressão linear simples, com as variáveis absorção $\frac{3}{4}$ " e $\frac{3}{8}$ " , separadas, assim como, na regressão múltipla, apresentaram significância, porém, de forma oposta ao consenso encontrado na literatura. Para o banco de dados utilizado, quanto menor o valor de absorção, mais resistente se mostrou o material. Portanto, o modelo matemático gerado nessa análise estatística não pode ser aplicado. Entretanto, para fins ilustrativos, a Figura 4-111 sintetiza o modelo e a representação gráfica da análise.

Figura 4-111 - Gráfico de regressão multivariada entre ALA (%) vs Absorção 3/4" (%) e Absorção 3/8" (%) referente ao conjunto de rochas.



4.3.5 Síntese das análises

Foram realizadas várias análises estatísticas com o propósito em obter modelos matemáticos que permitissem estabelecer relação entre as variáveis dependentes e independentes. Entretanto, alguns modelos não apresentaram significância do ponto de vista estatísticos ou até mesmo condizentes com a veracidade dentro da geotecnia. Na Tabela 4-69 são apresentados os resultados da regressão linear simples e na Tabela 4-70 os resultados da regressão linear múltipla que apresentaram melhor comportamento matemático com base no banco de dados utilizado nesta pesquisa.

Tabela 4-69 - Tabela resumo do modelo de regressão linear simples.

Parâmetros avaliados		Parâmetros estatísticos	Conjunto de rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas plutônicas	Rochas metamórficas
Características mecânicas	ALA vs ESM	R ²	0,88		0,84	0,93
		Modelo	ALA = -16 + 2* ESM		ALA = -22 + 2,3* ESM	ALA = -17 + 2,1* ESM
	ESM vs Treton	R ²	0,50		-	0,57
		Modelo	ESM = -221 + 1,1* Treton			ESM = 4,1 + 0,67* ESM
	ESM vs Is(50) seco	R ²			0,71	
		Modelo			ESM = -22 - 1,2* Is(50) seco	
	ESM vs Is(50) sat	R ²			0,58	
		Modelo			ESM = -21 - 1,2* Is(50) sat	
Características mecânicas versus Granulação	ALA vs Granulação	R ²	0,50			
		Modelo	ALA = -8,6 + 0,53* Gran.			
	ESM vs Granulação	R ²	0,63			
		Modelo	ESM = -11 + 0,27* Gran.			
	Treton vs Granulação	R ²	0,54			
		Modelo	Treton = 5,8 + 0,52* Gran.			
Índices físicos	M.E.A vs Absorção $\frac{3}{8}$ "	R ²			0,64	
		Modelo			M.E.A = 2,8 - 0,29* Abs	
	Durabilidade vs absorção	R ²			0,52	0,55
		Modelo			Sanidade = 13 - 10*Abs	Sanidade = 1,6 + 13*Abs

Tabela 4-70 - Tabela resumo do modelo de regressão múltipla.

Parâmetros avaliados		Parâmetros estatísticos	Conjunto de rochas	Rochas Vulcânicas	Rochas plutônicas	Rochas metamórficas
Características mecânicas	ALA vs ESM e Treton	R ²	0,90		0,88	0,94
		Modelo	ALA = -16,6 + 2,39*ESM - 0,35*Treton		ALA = -21,3 + 2,57*ESM - 0,33*Treton	ALA = -15,7 + 2,4*ESM - 0,43*Treton

5 CONCLUSÃO

Nesta dissertação buscou-se como objetivo principal caracterizar as rochas de origens intrusivas e metamórficas, localizadas nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, como forma de complementação aos estudos realizados por Paiva (2017) e Back (2018). Foi realizada uma gama de ensaios que permitiram avaliar as características físicas e mecânicas das rochas exploradas pelas cinco jazidas estudadas, com foco na aplicação em obras de engenharia civil.

As jazidas Fragosos (FRAG-M) e Vogelsanger (VOG), ambas situadas no estado de Santa Catarina, exploram rochas metamórficas, por sua vez, as jazidas Minersul (MIN), Conpasul (CONP) e Eldorado (ELD), localizadas no Rio Grande do Sul, lavram rochas graníticas, entretanto, embora as seis rochas estudadas estejam associados a mesma litologia, de acordo com cada estado de origem, foi observado por intermédio da análise petrográfica diferenças texturais e mineralógicas que refletiram nos resultados finais dos ensaios de caracterização de índices físicos, sanidade, resistência mecânica e adesividade.

A textura cataclástica presente na rocha (FRAG-M), em decorrência aos esforços de deformação sofrido durante a formação da rocha granulito máfico (FRAG-M), exibem minerais fragmentados que facilita a percolação da água pelas microfraturas, resultando em alta absorção e porosidade em comparação a jazida VOG, que mineralogicamente é formada por biotita, mineral que tendem apresentar alta absorção. Entretanto, de acordo com a avaliação realizada por fração, notou-se que à medida que o tamanho do agregado diminui, a textura cataclástica na rocha FRAG-M torna-se ausente, e, conseqüentemente menor é a absorção apresentada pelo material. Enquanto que, nota-se o oposto para as rochas biotitas gnaisses (VOG), ou seja, devido ao processo de britagem e rebritagem que a rocha é submetido até atingir o tamanho desejado, a presença de minerais micáceos torna-se mais expressivo, e, conseqüentemente, maior absorção ao agregado. De forma análoga, os sienogranitos da jazida ELD exibem absorção superior em comparação as demais jazidas granítica MIN e CONP devido a elevado grau de alteração e presença de microfraturas existentes em alguns minerais, que não foi observado nas demais pedreiras.

De forma análoga, a textura da rocha e composição mineralógica refletiu no ensaio de sanidade. A textura cataclástica e a elevada presença de biotita nas rochas das jazidas FRAG-M e VOG, respectivamente, influenciaram na elevada perda por sanidade do material graúdo. Além disso, embora a jazida ELD tenha apresentado alta absorção, a baixa perda por sanidade pode estar associada a dificuldade de o fluido percorrer as microfraturas observadas em lâminas,

por serem na sua grande maioria fechada, conseqüentemente, o esforço físico que este tipo de ensaio gera não foi suficiente para ocasionar quebra ao agregado.

Por conseguinte, a resistência mecânica, associado ao desgaste por abrasão (ALA) e quebra por esmagamento (ESM), assim como, perda por tenacidade, apresentaram comportamento associado tanto a mineralogia, como também ao tamanho dos grãos. Desta forma, nos ensaios ALA e ESM, as pedreiras apresentaram comportamento semelhante de desgaste, em ordem crescente na seguinte ordem: FRAG-M, VOG, ELD, MIN, CONP. Além disso, no ensaio de ALA, quanto menor a fração ensaiada, ou seja, método C, maior a perda de massa, bem como, menor a resistência mecânica. Outro fator importante a ser destacado refere-se a presença de biotita na rocha VOG que, para o ensaio de tenacidade permitiu a rocha uma maior resistência, pois esse tipo de mineral, ao ser submetido a queda do martelo, devido sua estrutura em forma de folha é flexionada, sendo difícil de ser rompida, tornando-se mais resiliente. Entretanto, a biotita, quando submetido a desgaste por abrasão ou esmagamento, apresenta comportamento oposto, ou seja, os grãos desprendem-se mais facilmente, gerando maior perda de massa, desta forma, nestes ensaios, a rocha FRAG-M apresentou melhor comportamento em comparação a jazida VOG.

Por sua vez, rochas compostas por minerais como quartzo e feldspato, assim como, a presença de pórfiros, tendem a serem mais frágeis e susceptível a quebra, conseqüentemente, independente do ensaio (ALA, ESM ou Treton) maiores são as perdas de massa, o que justifica os baixos valores de resistência das rochas graníticas, MIN, ELD e CONP em comparação as rochas metamórficas, FRAG-M e VOG.

A diferença mineralógica e textura nitidamente presente entre as rochas metamórficas e plutônicas refletiram na aderência entre ligante asfáltico e agregado mineral, ou seja, as rochas com elevada acidez (MIN, CONP e ELD) influenciaram negativamente na interação ligante agregado, resultando má adesividade. Embora as rochas metamórficas não sejam caracterizadas com base na acidez, a composição mineralógica permite aferir que se trata de rochas variando entre acida e intermediária, portanto, a aderência entre agregado e ligante foi mais positiva em comparação as rochas graníticas, embora, todas as rochas ensaiadas, de acordo com a norma tenham apresentado má adesividade, portanto, para seu uso, faz-se necessário a aplicação de *dope*.

Desta forma, com base nos dados obtidos em cada análise, conclui-se que as cinco jazidas apresentaram características de índices físicos e resistência mecânica que se adequam às solicitações impostas pelas normas utilizadas nesta pesquisa (pavimentação e ferroviária). Em

suma, todas as pedreiras demonstraram comportamento físico bom, porém, os agregados da FRAG-M e VOG, apresentaram comportamentos mecânicos ensaios de ALA, ESM e Treton inferior as jazidas MIN, CONP e ELD, tais resultados são atribuídos a diferença entre as gêneses de formação de cada litologia.

Por conseguinte, algumas jazidas obtiveram resultados acima do limite em alguns ensaios, a citar sanidade e índice de forma. Estes são, de certo modo, parâmetros de suma importância, principalmente em relação ao bom intertravamento dos grãos, o que conseqüentemente influencia na trabalhabilidade e desempenho mecânico do pavimento. Portanto, os resultados do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA), corroborou com estudos pré-existentes afirmando que o ensaio sozinho não permite avaliar a angularidade do agregado miúdo. Assim como, o ensaio PDI utilizado nesta pesquisa mostrou a importância quanto ao rigor metodológico na coleta, execução e no tratamento dos dados, pois houve divergência entre os resultados apresentados pelo AIMS em relação ao recalculado com os dados brutos, portanto, faz-se necessário um olhar rigoroso aos métodos deste ensaio e aos valores que definem as classes das propriedades.

Na última etapa, foram analisados estatisticamente os resultados de ensaios apresentados em diversos trabalhos na área de caracterização tecnológica dos agregados, bem como os resultados desta pesquisa, criando-se um banco de dados. Foram aplicadas análises de regressão linear simples e regressão múltipla. Os ensaios mecânicos apresentaram forte correlação entre si, com grau de confiabilidade de 95%, foram gerados quatro modelos diferentes. A granulação resultou grande significância com os ensaios de resistência mecânica, corroborando com os trabalhos de Kazi e Al- Mansour (1980), Marques (2001), Keikha e Keikha (2013), Alves (2014), Nagali et al (2016), Back (2018) e Curtis (2019), porém de forma estatística. Na avaliação entre FAA e ângulo de atrito interno obtido no ensaio de resistência ao cisalhamento direto, os resultados apresentados fortalecem as discussões abordadas por Fernandes (2000), Gouveia e Fernandes (2002), Gouveia (2002; 2006) e Rodrigues (2019), concluindo que o ensaio FAA não consegue sozinho avaliar a angularidade do material. Por sua vez, o PDI também não apresentou correlação com os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto. Os ensaios de resistência apresentaram correlação com a absorção da rocha, tanto na regressão linear simples, como na regressão múltipla, porém, para o banco de dados analisado, de forma oposta ao consenso encontrado na literatura. Por fim, por intermédio da análise multivariada, foi possível obter apenas um modelo matemático significativo tendo como variáveis independentes os ensaios de Esmagamento e Treton e variável dependente ALA.

6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Em vista das impossibilidades de realização de diferentes abordagens ou métodos de investigação durante esta pesquisa, são sugestões para trabalhos e atividade:

1. Realização de ensaios com maior número de amostras por litologias, com a finalidade de gerar modelos matemáticos mais confiáveis, tendo em vista que o número amostral influencia diretamente no resultado;
2. Avaliação dos agregados de uma mesma jazida em épocas distintas, com o propósito de avaliar e caracterizar a jazida (rocha) com o avanço de lavra.
3. Visto que o ensaio de FAA não consegue de fato avaliar a característica da angularidade do agregado miúdo, sugere-se pesquisa para a elaboração de um novo método de ensaio;
4. Referente ao ensaio de carga pontual saturada, visto que o tempo de saturação influencia na absorção da rocha, realizar mais ensaios buscando avaliar tempo *versus* resistência que melhor se adequam à situação em campo;
5. Realizar mais ensaios de carga pontual nas duas condições, seca ao ar e saturada, porém, com litologias plutônicas e, com base nos dados, propor um índice aceitável de $Is(50)_{sat}/Is(50)_{seco}$; e,
6. Avaliar o comportamento do agregado quando submetido ao ensaio de resistência ao Esmagamento, porém, testando diferentes frações de rochas (não somente as frações previstas em norma) e até mesmo uma mistura entre elas.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Agregados – Apreciação petrográfica de materiais naturais para utilização como agregado em concreto – **NBR 7389**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.

_____. **NBR 66/98**. Agregados – Constituintes mineralógicos dos agregados naturais – terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998

_____. **NBR NM 30/01**. Via Férrea – Lastro Ferroviário – Requisitos e Métodos de Ensaio -, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

_____. **NBR NM 5564/14**. Agregado Miúdo – Determinação da absorção de água -. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7809/06**. Agregados - Definições: Determinação do Índice de Forma do Agregado. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

_____. **NBR NM 7809/08**. Agregados Graúdos – Determinação do índice de Forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2008.

AHLRICH, R.C. Influence of Aggregate Gradation and Particle Shape/Texture on Permanent Deformation of Hot Mix Asphalt Pavements. **Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Geotechnical Lab**. in press, 1996.

AHO, B. D., VAVRIK, W. R., CARPENTER, S. H., et al. Effect of Flat and Elongated Coarse Aggregate on Field Compaction of Hot-Mix Asphalt, **Transportation Research Record**, v. 1761, n. 1, p. 26–31, DOI: <https://doi.org/10.3141/1761-04>, 2001.

AL ROUSAN, T. M. – **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system**. Dissertation. Texas A&M Univeristy, 2004.

AL ROUSAN, T. M. et al. New Methodology for Shape Classification of Aggregates. **Journal of Transportation Research Board**, v.193, 2005.

AL HARTHI, A.A., ABO SAADA Y.E., Utilisation de granulats naturels d'oueds pour la fabrication de bétons (Ouest de L'Arabie Saoudite). **BULLETIN**, Paris n. 55, 1997

ALVES, V. A. H. S. **Avaliação da Resistência a Degradação Mecânica de Agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por Técnicas Digitais de Imagens**. Rio de Janeiro:Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 145 p

ANASTASIO, S., PEREZ FORTES, A. P., HOFF, I. Effect of aggregate petrology on the durability of asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.126. .

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

ARASAN, S., YENERA, E., HATTATOGLU, F., et al. Correlation between Shape of Aggregate and Mechanical Properties of Asphalt Concrete. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, n. 2, p. 239–262, 17 jan. 2011, DOI: 10.1080/14680629.2011.9695245. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10,1080/14680629.2011,9695245>. Acesso em: 6 set. 2019.

ARAUJO, V.M.C. **Avaliação da textura de misturas asfálticas a partir do uso do processamento digital de imagens**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2014.

ARAUJO, V.M.C. **Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas para Uso em Revestimentos Aeroportuários a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens. 20**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 81 -10**. Standard Method of Test for Determining Aggregate Shape Properties by Means of Digital Image Analysis, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM d4791** - Partículas achatadas e alongadas no agregado graúdo (Paquímetro Calíper), 2015.

_____. **ASTM. C 615**. Standard specification for granite dimension stone, 1972.

_____. **ASTM D3080** - Standard Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, 2011,

_____. **ASTM C 128** – Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, 1993.

_____. **ASTM C 1252**: Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate, 2006.

_____. **ASTM D 4791**: Standard Test Method for Flat Particle, Elongated Particle, or Flat and Elongated Particle in Coarse Aggregate. EUA. 2010,

_____. **ASTM D 5821**: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. EUA. 2013.

AIRES-BARROS, L. Alteração e alterabilidade de rocha ígneas. Lisboa: **Técnica Nacional de Engenharia Civil**, 57p, 1971.

AKAIKE, H. Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. In: **Petrov, B.N., Casaki, F.** (Eds.), Second International Symposium on Information Theory. Akademiai Kiado, Budapest, pp. 267-281, 1973.

ÅKESSON, U., LINDQVIST, J., GÖRANSSON, M., et al. "Relationship between texture and mechanical properties of granites, Central Sweden, by use of image-analysing techniques", **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 60, n. 4, p. 277–284, 2001, DOI: 10.1007/s100640100105.

ATRAGHJI, D.V. - **Some factor affecting the performance of rockfill dams**. Tese de M.Sc., Imperial College of Science and Technology, Universidade de Londres, 1972.

BACK, A.H. **Macroanálise de uma jazida de rocha em Santa Maria/RS e caracterização de seu material granular**. Rio Grande do Sul, Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

BACK, A. H. **Avaliação das propriedades químicas e geomecânicas de agregados oriundos de jazidas de rochas de diferentes litologias do estado do RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2018.

BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U. y KIGGUNDU, B. M. **Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures**. International Journal of Pavement Engineering, 2005, vol. 6, núm. 4, pp. 229-239.

BARRA, B. S.; MOMM, L.; BROSSEAUD, Y.; HORNYCH, P.. Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. **Revista Pavimentação**, Ano V, ABPV – Associação Brasileira de Pavimentação, v. 17, p. 38-58, 2010,

BASTOS, J.B.S. **Considerações Sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) –Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/23173>>. Acesso em: 9 nov. 2019.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros** (1ª ed.). Rio de Janeiro, 2006.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros** (2ª ed.). Rio de Janeiro, 2007.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros** (2ª ed.). Rio de Janeiro, 2010,

BENGTSSON, M.; EVERTSSON, C. An Empirical Model for Predicting Flakiness in Cone Crushing. **International Journal of Mineral Processing**, v. 79, n. 1, p. 49-60, 2006. DOI: 10.1016/j.minpro.2005.12.002.

BERN, R. Agregados Cúbicos – Produção de Agregados de Alta Qualidade com Impactores e Britadores Cônicos. **Areia e Brita**, v. 1, p. 13 – 20, ANEPAC, 1997.

BÉRUBÉ, M. A. The mineralogical and petrographic analysis of concrete aggregates. 2001, **Anais [...]** Saite-Foy, Québec, [s.n.]. p. 45–47, 2001,

BESSA; I.S.; BRANCO, V.T.F.C.; SOARES, J.B. **Caracterização de agregados convencionais e alternativos utilizando técnicas de processamento digital de imagens**. Monografia CBUT, 2009.

BESSA; I.S.; CASTELOBRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. Avaliação do processo de produção de agregados por médio da utilização do processamento digital de imagens. Associação de Pesquisa e Ensino em Transportes -ANPET, 2011,

BESSA, I. S. **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Departamento de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BESSA; I.S.; CASTELOBRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. Evaluation of polishing and degradation resistance of natural aggregates and steels slag using the aggregate image measurement system. **Road Materials and Pavement Design**, 385-405, DOI: 10.1080/14680629.2014.883323, 2014.

BITENCOURT, M.F., NARDI, L.V.S. Late to post-collisional Brasiliano granitic magmatism in southernmost Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 65:3-16. Suplemento 1, 1993.

BITENCOURT, M.F., NARDI, L.V.S. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. **Revista Brasileira de Geociências**, 30:184-187, 2000.

BOLER, H., QIAN, Y., TUTUMLUEN, E. Influence of size and shape properties of railroad ballast on aggregate packing statistical analysis. **Transportation Research Record**. Washington, D.C., National Research Council. , 2014.

BOEIRA, F.D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, 2014.

BOUQUETY, M.N, DESCANTES, Y., BARCELO, L., F de LARRAD, D. CLAVAUD. Experimental Study of Crushed Aggregate Shape. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 4, p. 865-872, 2007. DOI:10,1016/j.conbuildmat.2005.12.013.

BRONDANI, C. – **Estudo do efeito deletério da água em misturas asfálticas a quente produzidas no Rio Grande do Sul. Santa Maria, Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

BROCH, E. e FRANKLIN, J.A. - The point-load strength test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sei.*, Vol. 9, pp. 669-69, 1972.

BROCH, E. - **The influence of water on some rock properties**. Proc. 3rd Int. Cong. of the **ISRM**, Vol. 2, pp. 33-38, Denver, 1974.

CASTILLO, D., CARO, S., DARABI, M., et al. Influence of aggregate morphology on the mechanical performance of asphalt mixtures, **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 4, p. 972–991, 19 maio 2018. DOI: 10,1080/14680629.2017.1283357.

CAVALCANTI, H.P.P. **Avaliação da degradação de propriedades de forma de agregados utilizando o processamento digital de imagens**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, C.E., Brasil, 2016.

CAVALCANTI, H.P.P., BESSA, I., IBIAPINA, D., BRANCO, V.C. Avaliação da degradação de propriedades de forma de agregados, **Revista Matéria**, v.25 n.01, DOI: 10.1590/s1517-707620200001.0880. 2020.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico. 1, ed. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2011,

CHEMALE JR., F. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: M. HOLZ, L. F. DE-ROS, M. HOLZ, & L. F. DE ROS (Eds.), **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, CIGO/UFRGS. p. 13-52. 2000.

CHEN, J. S., HSIEH, W., LIAO, M. C. Effect of coarse aggregate shape on engineering properties of stone mastic asphalt applied to airport pavements, **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 6, n. 5, p. 595–601, 2013. DOI: 10,6135/ijprt.org.tw/2013.6(5).595.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, (2003). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=790&sid=9>>. Acesso em: 2 de set. de 2019

_____. **CPRM (2003)**. Geobank – Litoestratigrafia (Granito São Francisco do Sul). Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/litoestratigrafia.litoestratigrafia.cadastro?p_COD_UNIDADE_ESTRAT=2884&p_webmap=N> . Acesso em: 15 de set. de 2019.

_____. **CPRM (2007)**. Mapa geológico do Rio Grande do Sul. Serviço Geológico do Brasil, Brasília, Brasil. CD – Room, escala 1:750,000, 2007.

COGGAN, J. S., STEAD, D., HOWE, J. H., et al. Mineralogical controls on the engineering behavior of hydrothermally altered granites under uniaxial compression. **Engineering Geology**, v. 160, p. 89–102, 2013. DOI: 10,1016/j.enggeo.2013.04.001, Disponível em: <http://dx.doi.org/10,1016/j.enggeo.2013.04.001>.

COMINSKY, R. R., LEAHY, R. B., HARRIGAN, E.G. Level one mix design: Materials selection compaction, and conditioning. **Relatório Técnico SHRP-A-408**. Strategic Highway Research Program (SHRP), 1994.

COSTA, H.N. **Caracterização de Areias de Britagem de Pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza e Avaliação da sua Aplicação no Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2015.

CHANDAN, C. et al. Application of Imaging Techniques to Geometry Analysis of Aggregate Particles. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 18(1), p. 75-82, 2004. DOI: [dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:1(75)).

COHEN, JACOB. Statistical power analysis for the behavioral sciences. **Hillsdale, NJ**, Erlbaum, 1988.

CRUZ, G. K. A. **Influência das propriedades morfológicas e dos métodos de seleção granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas.**, 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-graduação em recursos Naturais, Centro de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2018.

CURTIS, J.A.N. **Estudo tecnológico de rochas da intrusão de Limeira, visando aplicação como agregados em obras de engenharia**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Geotecnia, São Carlos, 2019.

DANCEY, Christine & REIDY, John. Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. **Artmed**, Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – Base Granular. **DAER – ES-P 08/91**, Porto Alegre, 2001,

_____. **DAER ES-P 16/91** – Concreto Asfáltico. Porto Alegre, 1991,

_____. **DAER – EL 108/01** – Determinação do índice de lamelaridade., Porto Alegre, 2001,

_____. **DAER – ES - P 16/91**. Dispositivo de Drenagem Pluvial Urbana. Porto Alegre, 1991,

_____. **DAER – ES – P 14/11** – Tratamento Superficial Simples, Porto Alegre, 2011,

_____. **DAER – ES – P 15/11** – Tratamento Superficial Duplo, Porto Alegre, 2011,

_____. **DAER – ES – P 19/91** – Pré – Misturado a Frio, Porto Alegre, 1991,

_____. **DAER – ES – P 07/91** – Macadame Seco, Porto Alegre, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-IE 006/94**:
Materiais rochosos usados em rodovias –Análise Petrográfica. MT, 1994.

_____. **DNER – ME 35/98**. Agregado Graúdo – Ensaio de Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro: 1998.

_____. **DNER – EM 37/97** – Agregado graúdo para concreto de cimento, Rio de Janeiro: 1997.

_____. **DNER – ME 54/97**. Equivalente de Areia. Rio de Janeiro: 1997.

_____. **DNER – ME 78/94**. Agregado Graúdo – Adesividade a ligante betuminoso, Rio de Janeiro: 1994.

_____. **DNER-ME 081/98**: Agregados: determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

_____. **DNER -ME 083/98**. Agregados –análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

_____. **DNER-ME 086/94** Agregado –Método de Ensaio. Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1994.

_____. **DNER-ME 086/20** Agregado –Método de Ensaio. Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2020.

_____. **DNER – ME 89/94.** Agregado – Avaliação da Durabilidade Pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio, Rio de Janeiro: 1994.

_____. **DNER – ME 152/95.** Agregado – Determinação da massa unitária do agregado em Estado Solto - Rio de Janeiro: 1995.

_____. **DNER-ME 194/98.** Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: IPR, 1998

_____. **DNER – ME 195/98.** Agregado – Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo, Rio de Janeiro: 1998.

_____. **DNER – ME 197/97.** Agregado Graúdo – Determinação da Resistência do Esmagamento, Rio de Janeiro: 1997.

_____. **DNER-ME 317/97:** Pavimentação – pré – misturado a frio. Rio de Janeiro: IPR, 1997.

_____. **DNER – ME 399/99.** Agregado – Determinação da perda ao choque no aparelho Treton, Rio de Janeiro: 1999.

Departamento Nacional de infraestrutura de transportes DNIT – Agregados – Determinação das propriedades de forma por meio do processamento digital de imagens (PDI) – Método de ensaio -. **DNIT 432/2020 – ME,** Rio de Janeiro, 2020.

_____. **DNIT 411/2019 – ME –** Pavimentação asfáltica – Mistura asfáltica – massa específica. Densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 2019.

_____. **DNIT 415/2019 – ME –** Pavimentação asfáltica – Mistura asfáltica – teor de vazios de agregados miúdo não compactados, Rio de Janeiro, 2019.

_____. **DNIT – ES 31/06 – Pavimentos Flexíveis – Concretos Asfálticos – especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT – ES 152/2010 – Pavimentação – Macadame Hidráulico – especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010,

_____. **DNIT – ES 146/12.** – Pavimentação asfáltica – Tratamento superficial duplo – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **DNIT – Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço. DNIT – ES 141/10,** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Rio de Janeiro, 2010,

_____. **DNIT – ES 147/12 – Pavimentação asfáltica – Tratamento superficial – especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DE SANTA CATARINA – **DEINFRA – SC ES – P 11/16 - Pavimentação: camadas de brita graduada.** Florianópolis, 2016.

_____. **DEINFRA – SC ES – P 07/16 – Pavimentação: microrrevestimento asfáltico a frio.** Florianópolis, 2016.

_____. **DEINFRA – SC ES – P 03/15 – Pavimentação: camadas de macadame.** Florianópolis, 2015.

DIÓGENES, L. M, BRANCO, V.T.F.C. Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastros ferroviários com o uso do processamento digital de imagens. **Anais do Congresso ANPET.** 2015.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação da influência da britagem nas propriedades de forma de agregados por meio do processamento digital de imagens Estudo de caso na Região Metropolitana de Fortaleza.** 2015. 93 f. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2015.

DIÓGENES, D.F. **Avaliação das Propriedades de Forma de Agregados Utilizados em Lastro Ferroviário a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

DIÓGENES, L. M, BESSA, I.S., BRANCO, V.T.F.C., MAHMOUD, E. The influence of stone crushing processes on aggregate shape properties. **Road Materials and Pavement Design**, DOI: 10.1080/14680629.2017.1422792., 2018.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem da rocha de origem**. Dissertação de Mestrado. 146 f. Universidade Federal do Ceará, 2018.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente**. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, 2018.

FARIAS, M.M., PALMEIRAS, E.M. Agregados para construção civil. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: **IBRACON**, v.1, p1481-523, 2007.

FARJALLAT, J.E.S; MONTEZZO NETO, V.; RATTI, G. Relações entre desagregação de rochas basálticas e seu conteúdo em argilas expansivas. In: **Semana Paulista de Geologia Aplicada**, São Paulo. Anais...São Paulo: APGA. p.123-155. 1972.

FARRAR D. E. & GLAUBER, R. R. Multicollinearity in regression analysis—the problem revisited. **The Review of Economics and Statistics**, v. 49, n. 1, 1967

FERNANDES, L. A. D., MENEGAT, R., COSTA, A. F. U., KOESTER, E., PORCHER, C. C., TOMMASI, A., KRAEMER, G., RAMGRAB, G. E., CAMOZZATO, E. Evolução Tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-rio-grandense: Parte I-uma contribuição a partir do registro geológico. **Revista Brasileira de Geociências**, 25(4), 375-384. 1995.

FERNANDES, J. L.; R ROQUE; M. TIA E L. CASANOVA. Evaluation of uncompacted void content of fine aggregate as a quality indicator of materials used in Superpave mixtures. **79th Annual Meeting in January of the Transportation Research Board**, Washington, D.C, 2000,

FIorentini, J. **Avaliação de durabilidade, abrasividade e dureza das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.178, 2002.

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.

FLETCHER, T.et al. Aggregate Imaging System for Characterizing the Shape of Fine and Coarse Aggregates. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1832, p. 67-77, 2003.

FRAGOSO, C.A.R.S. FIQUEIREDO, M.C.H., SOLIANI Jr., E., FACCINI, U.F. O batólito Pelotas (Proterozóico Superior/Eo-Paleozóico) no Escudo do Rio Grande do Sul. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 34. Goiânia. Anais. Goiânia, SBG. v.3, p. 1322-1342, 1986.

FRASCÁ, M.H.B.O., FRAZÃO, E.B. Proposta de especificação tecnológica para agregados graúdos. **Areia & Brita**, São Paulo, n.19, p.28-33, 2002.

FRASCÁ, M.H.B.O. Rocha como material de construção. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). **Materiais de Construção e princípios de Ciência e Engenharia de materiais**. Ed.1, São Paulo: **IBRACON**, V.1, p.437-479, 2007.

FRAZÃO, E, B.; Farjallat, J. E. S. Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento. **I Congresso Internacional da Pedra Natural**. Lisboa. 1995.47-58p.

FRAZÃO, E.B. - **Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir de estudo experimental em amostras de basaltos da UHE de Três Irmãos - Estado de São**

Paulo. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1993

FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU, A.B. Materiais rochosos para construção civil. In: **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo: ABGE. p.331-342, 1998.

FRAZÃO, E.B. **Tecnologia de rochas na construção civil no Brasil**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. ABGE. Ed 01, p.132, 2002.

FRAZÃO, E.B. Agregados para a construção civil no Brasil. Cap. 1 – Organização: Tannús, M.B., Cardoso, J.C.C – contribuições para a formulação de políticas públicas. **CETEC**, 2007.

FRAZÃO, E.B. - Alteração de rochas como critério de seleção de agregados. **ABGE**: São Paulo. p. 123, 2012.

FURLAN, A.P.; GOUVEIA, L.T.; FABBRI, G.T.P.; JR, J.L.F – Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas. **17º Encontro de Asfalto – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás**, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2004.

GÉBER, R. & GÖMZE, L.A. Investigation of Hydrophilic and Hydrophobic Properties of Different Mineral Fillers for Asphalt Mixtures. **Proceedings of the 11th ECERS Conference**, Krakow, pp.945–950, 2009.

GOUVEIA, L.T.. **Avaliação do ensaio de angularidade do agregado miúdo (FAA) da especificação Superpave**. Dissertação de mestrado, USP São Carlos. 2002.

GOUVEIA, L. T. DE. **Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil –Transportes). Departamento de Transportes, Universidade de São Paulo, 2006.

GOUVEIA, L.T.; FERNANDES JR., J.L. Considerações a respeito das propriedades de consenso do Superpave para agregados de misturas asfálticas. **Anais do Congresso ANPET**. 2006.

GOUVEIA, L.T.; FERNANDES E.S., SENGER, L.J., MARTINS, E.A. Esqueletização multiescala para análise de forma de agregados. **Transportes**, v.23, n.2, 2015.

GUIFU, X. e HONG, L. (1986) - On the statistical analysis of data and strength expression in the rock point load tests". Proc. 5th Int. **Cong. of the IAEG**, 1,5.7, pp. 383-394, Buenos Aires.

GUIMARÃES, A. C. R., MOTTA, L. M. G., ANTONELLO, L. Um estudo sobre a viabilidade de utilização de metadolomitos do Paraná em camadas de pavimentos. **Anais [...]** Rio de Janeiro, [s.n.], 2010,

GREER, M., HEITZMAN, M. Evaluation of the aims2 and micro-deval to characterize aggregate friction properties. **NCAT Report** 17-02 EVALUATION. Auburn, Alabama, [s.n.], 2017.

HARTMANN, L.A.; SELVA, L.C.; ORLANDI, V, F. O Complexo Granulítico de Santa Catarina. Descrição e implicações genéticas. **ActaGeol. Leop.**, 6:93-112, 1979.

HARTMANN, L.A., CHEMALE, F.J.; PHILIPP, R.P. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: R. Ianuzzi; J.C. Frantz. (Org). **50 Anos de Geologia. Instituto de Geociências**. Contribuições. Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade, v.2, p.97-123, 2007.

HARTLEY A. A review of the geological factors influencing the mechanical properties of road surface aggregates. **Q J Eng Geol**7:69–100, 1974.

HEFER AW, LITTLE D Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond. ICAR project no. ICAR 505:220, **International Center for Aggregates Research**, Austin, 2005.

HICKS, R. P. Moisture damage in asphalt concrete. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, **Transportation Research Board**, Washington, p. 91, 1991.

HINKLE de, WIERSMA W, JURIS SG. Applied Statistics for the Behavioral Sciences. 5th ed. **Boston: Houghton Mifflin**. 2003

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS AND MINING SCIENCES. **ISRM - 1985** – Suggested method for determining point load strength. – Oxford, v. 22, n. 2, p. 51-60, 1985.

_____. ISMR - **Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mechanics**. International Journal of Rock Mechanics Science and Geomechanics. Abstract., 15, p.319-368, 1978.

_____. ISRM - **The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006**. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Ankara, Turkey. p. 628, 2007.

IBIAPINA, D.S. **Avaliação da Relação entre Propriedades de Forma dos Agregados, Parâmetros do Esqueleto Mineral e o Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas**. Minuta de Qualificação (Doutorado em Engenharia Civil) -Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2016

IBIAPINA, D. S., CASTELO BRANCO, V. T. F., DIÓGENES, L. M., et al. Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil, **Transportes**, v. 26, n. 4, p. 21–32, 2017. DOI: 10,14295/transportes. v2i4.1510

IBIAPINA, D. S, CASTELO BRANCO, V. T. F., FREITAS, S.M., MOTTA, L.M.G., DIÓGENES, L. M., et al. Análise estatística da qualidade das medidas das propriedades de forma de agregados com o uso do processamento digital de imagens (PDI), **Transportes**, v. 28, n.14, p. 99–110, 2017. DOI: 10,14295/transportes. v28i1,1865.

IBRAHIM H, WAHHAB AA, HASNAINT J. Laboratory study of asphalt concrete durability in **Jeddah**. **Build Environ** 33:219–230, 1998.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Estudos geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens). São Paulo (IPT –Relatório, 19569), 1984.

IRFAN T.Y. Aggregate properties and resources of granitic rocks for use in concrete in Hong King. **Q.J. of Engin Geol.**, 27: 25-38, 1994.

KAZI, A.; AL-MANSOUR, Z.R. **Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregates**. *Engineering Geology* v.15, p.195-203, 1980,

KANDHAL, P.S.; PARKER JR., F. NCHRP Report 405: Aggregate tests related to asphalt concrete pavement performance in pavements. **Transportation Research Board**. Washington, D.C., 1998.

KEIKHA, T., KEYKHA, H. A. Correlation between mineralogical characteristics and engineering properties of granitic rocks, **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 18 S, p. 4055– 4065, 2013.

KENNEDY, T. W.; ROBERTS, F. L.; LEE, K. W. Evaluation of Moisture Effects on Asphalt Concrete Mixtures - **Transportation Research Record** 911, p. 134 - 143. Washington, DC. 1983.

KIM, Y.R; KIM, N; KHOSLA, N.P. Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and permanent deformation of asphalt concrete. In: **Meininger**, R.C. (ed) *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. American Society for Testing a Materials, Philadelphia, 1992.

KIM, Y.R.; SOUZA, L.T. Effects of aggregate angularity on mix design characteristics and pavement performance. **Report on research** No. MPM-10, Mid-America Transportation Center and University of Nebraska-Lincoln. December, 2009.

KUANG, D., WANG, X., JIAO, Y., et al. Influence of angularity and roughness of coarse aggregates on asphalt mixture performance, **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 681–686, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.176. .

LANDIM, P. M. B. A análise estatística de dados geológicos multivariados. São Paulo: **Oficinas de Textos**, 2011, ISBN 978-85-7075-032-8.

LAGO, L.N – **Avaliação geológico-geotécnica de agregado de rocha granulítica para uso em pavimentação asfáltica**. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. PUC- Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

LEANDRO, R.P. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Corpos de Prova de Misturas Asfálticas a Quente Resultantes de Diferentes Métodos de Compactação**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2016. Disponível em: <<https://doi:10.11606/T.3.2016.tde-24062016-113652>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

LEE, C., WHITE, T.D., WEST, T.R. **Effect of fine aggregate angularity on** July, 1999.

LEE, D.Y. The relationship between physical and chemical properties of aggregates and their asphalt absorption. **Association of Asphalt Paving Technologists**, v.38, p-242-275, 1969.

LIMA, C.D.A. **Estudo da Deformação Permanente de Duas Britas Graduadas para uso em Camadas de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

LIRA, S.A. **Análise de Correlação: Abordagem Teórica e de Construção dos Coeficientes com Aplicações**. Dissertação ao Curso de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia-UFPR, 2004.

MACEDO, J. A.G., BRASILEIRO, F. E. Características físicas e mecânicas de agregados graúdos lateríticos após extração em concretos betuminosos usinados a quente. In: Reunião anual de pavimentação, 1987, Maceio **Anais**. Maceio: ABPV, 1987, p. 83-105.

MAHMOUD, E. **Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage.** Thesis for the degree of Master of Science, Texas A&M University. December, 2005.

MAHMOUD, E. E. E. MASAD Experimental Methods for the Evaluation of Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage. *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, v. 19, p. 977-985, 2007.

MAHMOUD, E., GATES, L., MASAD, E., et al. Comprehensive Evaluation of AIMS Texture, Angularity, and Dimension Measurements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 22, n. 4, p. 369–379. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000033, 2010,

MAHMOUD, E.M.; KUTAY, E.; BAHIA, H. Digital Image Analysis System: Standard Method for Determining Aggregate Structure in Asphalt Mixes by Means of Planar Imaging – **Draft Procedure**. 2010a. Disponível em: <<http://uwmarc.org/rilem-taskgroup2.html>>. Acesso em: 25 set. 2019.

MAHMOUD, E., ORTIZ, E. Implementation of AIMS in Measuring Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion and Breakege. **Urbana** - IL, [s.n.]. Disponível em: <https://apps.ict.illinois.edu/projects/getfile.asp?id=3121>, 2014.

MARQUES, G.L.O. **Procedimentos de Avaliação e Caracterização de Agregados Minerais Usados na Pavimentação Asfáltica.** Seminário de Qualificação ao Doutorado. Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2001,

MASAD, E.; J. W. BUTTON E T. PAPAGIANNAKIS. Fine aggregate angularity: Automated image analysis approach. *Transportation Research Record*, v.1721, p.66 – 72. DOI: 10.3141/1721-08, 2000,

MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L., Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance *Transportation Research Record 1757, Transportation Research Board, National Research Council*, Washington D.C., p.148-156,2001,

MASAD, E.A. Aggregate Imaging System (AIMS) basics and applications. **Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration**. October, 2005.

MASAD, E.A.; LUCE, A.; MAHMOUD, E. Implementation of AIMS in measuring aggregate resistance to polishing, abrasion and breakage. **Texas Transportation Institute**, Texas A&M University. December, 2006.

MASAD, E.; AL-ROUSAN, T.; BUTTON, J.; LITTLE, D.; TUTUMLUER, E. Test methods for characterizing aggregate shape, texture, and angularity. Report NCHRP-555, **National Cooperative Highway Research Program**. National Research Council. Washington, D.C., USA, 2007

MASAD, E.; REZAEI, A.; CHOWDHURY, A.; HARRIS, P. Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics. Texas Department of Transportation, **Texas A&M University**. August, 2009.

MEURER, P. **Aspectos Geológicos do Estado de Santa Catarina e suas Aplicabilidades no Estudo dos Materiais utilizados na Pavimentação**. Projeto de Extensão. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Joinville. Joinville – SC, 2014.

MEURER, P. **Caracterização de Materiais Rochosos do Norte do Estado de Santa Catarina para fins de aplicação em Obras de Pavimentação**. Artigo publicado no 44 a Rap (Reunião Anual de Pavimentação) / 18 o ENACOR (Encontro Nacional de Conservação Rodoviária), Foz do Iguaçu, 2015.

MEURER, P. **Caracterização de materiais rochosos no norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Joinville, Joinville – SC, 2015.

MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: **IBRACON**, 2008.

MOAVENZADEH, F., W. H. GOETZ. **Aggregate Degradation in Bituminous Mixtures: Technical Paper**. Publication FHWA/IN/JHRP-63/05. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, 1963.

Moura, E. **Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2001,

MISKOVSKY, K. et al. Influence of the mineralogical composition and textural properties on the quality of coarse aggregates. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.13, p. 144-150, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedade do concreto**. São Paulo, (1997).

NÚÑEZ, W.P. **Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados**. p.271 Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia**, Oficina dos Textos, 582p, 1998.

OLIVEIRA, J. A. **Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2013. Disponível em: . Acesso em: 19 fev. 2020,

ONOFRE, F.C. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Produzidas com Ligantes Asfálticos Modificados por Ácido Polifosfórico e Aditivos Poliméricos, Enfatizando a Resistência à Deformação Permanente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) -Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.2012.

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.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Santa Maria/RS, 164 p, 2017.

PALMSTRÖM, A. A rock mass characterization system for rock engineering purposes – **Appendix 3.** Phd thesis, Oslo University, Norway, 400 p., 1995.

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. DOI: 10.1061/ASCE0733-947X(2006)132:7580, 2006.

PAZOS, A.G. – **Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Dissertação de Mestrado, 2015.

PAZOS, A. G.; SACRAMENTO, F. T.; MOTTA, L. M. G. **Efeitos de Propriedades Morfológicas de Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas.** 44a. Reunião Annual de Pavimentação, RAP, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: . Acesso em: 15 ago. 2019.

PEARSON, Karl. The grammar of science. **London, J. M. Dent and Company**, 1892.

PEARSON, Karl; FISHER, Ronald & INMAN, Henry F. (1994), Karl Pearson and R. A. Fisher on Statistical Tests: A 1935 Exchange from Nature. **The American Statistician**, 48,1: 2-11,

PIRES, J.; COSTA, R., BERNUCCI, L., MOTTA, R., MOURA, E. Desgradação do lastro ferroviário – principais aspectos e estudos de caso, **Transportes**, v. 25, n. 3, p. 62–74, 2017. DOI: 10.14295/transportes. v25i3.1340,

PINHEIRO, R.J.B. Relatórios de dosagens de concreto asfáltico realizados no **LMCC**. Certificados Número: 44144, 45126, 2009.

PORTAL ACTION. **Calculo e interpretação do p-valor**. Acessado em: em 14 setembro, 2020, Disponível: <http://www.portalaction.com.br/inferencia/512-calculo-e-interpretacao-do-p-valor>, 2017.

POSSEBON, É.P. – **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

PHILIPP, R.P. **A evolução geológica e tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul**. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade Estadual de São Paulo – USP. Tese de Doutorado. V. 1, 1998.

PHILIPP, R. P.; MACHADO, R.; NARDI, L. V. S.; LAFON, J.M. O magmatismo granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 2, p. 277-290, 2002.

PHILIPP, R. P.; MACHADO, R. Ocorrência e Significado dos Septos do Embasamento encontrados nas Suítes Graníticas do Batólito Pelotas, RS. **Pesquisas**. 29, n. 1, p. 43-60, 2002.

PHILIPP, R.P.; CHEMALE JR., F.; MACHADO, R. A Geração dos granitoides Neoproterozóico do Batólito Pelotas: evidências dos isótopos de Sr e Nd e implicações para o crescimento continental da porção sul do Brasil. **50 Anos de Geologia, Porto Alegre**, CIGO, Instituto de Geociências, UFRGS, 1: p. 59-77, 2007.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J. AND JORDAN, T.H. **Understanding Earth**, Bookmans Ed., Tradução Menegat R., 656 p, 2006.

PROWELL, B. D., ZHANG, J.; BROWN, E.R. Aggregate properties and performance of Superpave-designed hot mix asphalt. **National Cooperative Highway Research Program**, n.539, 2005.

RAJAN, B.; SINGH, D. Comparison of Shape Parameters and Laboratory Performance of Coarse Aggregates Produced from Different Types of Crushing Operations. **Journal of**

Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 7, p. 04017044, 2017a. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001874.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021,

READ, J.; WHITEOAK, D. (2003). **The Shell Bitumen Handbook. Fifth edition**. ISBN: 0 7277 3220 X

REMÉDIO, M. J. **Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade – trecho campinas /São Paulo**, 154 f. Universidade de São Paulo, 2017.

REZAEI, A.; MASAD, E.; CHOWDHURY, A. Development of a Model for Asphalt Pavement Skid Resistance Based on Aggregate Characteristics and Gradation. **Journal of the Transportation Engineering**, v.137, n.12, p.863-873, 2011,

RIBEIRO, E.M. **Caracterização de Agregados Graúdos do Rio de Janeiro para Concreto Estrutural**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COOPE, Rio de Janeiro, 2006.

REMÉDIO, M. J. **Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade – trecho campinas / São Paulo**. 154 f. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S; BROWN, E.R; LEE, D.Y; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. Report NCHRP-539, National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation. Second Edition. Maryland, USA, 1996.

RODRIGUES, D.K. **Avaliação da angularidade de Agregados miúdos de diferentes litologias para uso em pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Santa Maria/RS, 148 p, 2019.

ROUSAN, T. Al. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system.** 229 f. Texas A&M University, 2004. Disponível em: <http://txspace.di.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/1485/etd-tamu-2004C-ENGRAL.pdf?sequence=1>, 2004.

ROUSAN, T. Al. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system,** n. December, p. 211, Disponível em: <http://txspace.di.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/1485/etd-tamu-2004C-ENGRAL.pdf?sequence=1>, 2004.

ROSSATO, F.P. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas.** Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, 2015.

SANTOS, G. T. **Caracterização Geotécnica de riodacito de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado, 156 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990,

SOUZA, L. T **Investigation of Aggregate Angularity Effects on Asphalt Concrete Mixture Performance Using Experimental and Virtual Asphalt Samples.** Thesis of Master Science. Nebraska, USA, 2009.

SCHEIBE, L. F. (1986). **A Geologia de Santa Catarina – Sinopse Provisória.** Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Geociências. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/viewFile/12542/11811>>. Acesso em: 30 de Ago. de 2019.

SMITH, M.R.; COLLIS, L. **Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes.** 3rd edition, Revised by Fookes, P.G., Lay, J., Sims, I., Smith, M.R., West, G., Geological Society Engineering Geology Special Publication N° 17, London, 339 p. 2001,

SUKHWANI, R.; LITTLE, D.N.; MASAD, E. **Sensitivity of HMA performance to aggregate shape measured using conventional and image analysis methods** TTI Report 0-1707-5, Texas Transportation Institute, College Station, TX, 2006.

TAYLOR, M.A. et al. Some Properties of Irregular Particles in 3D. **Powder Technology**, 162, 1-15, 2006. 10.1016/j.powtec.2005.10.013.

TOMPKINS, DG. **Durability and adhesive properties of bitumen–aggregate mixes. Bituminous materials for flexible pavements, residual course.** Department of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, p 57, 1972.

TROTTA, R.P. C. **Quantificação da degradação mecânica e avaliação da heterogeneidade de agregados por processamento digital de imagem (PDI).** Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Dissertação de Mestrado, 2020,

TUĞRUL, A., ZARIF, I. H. "Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey", **Engineering Geology**, v. 51, n. 4, p. 303–317, 1999. DOI: 10.1016/S0013-7952(98)00071-4.

VALLEJO, L. I. G. D.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. **Engenharia Geológica.** Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2002.

VALLEJO, L. **Ingeniería Geológica. Pearson Prentice Hall.** Madrid, 2004.

WATTERS, B.R., KLASSEN, M.J., CLIFTON, A.W. Appendix: CP Rail Specification for ballast. **Transportation Research Record**, TRB, 1131:59-63, 1987.

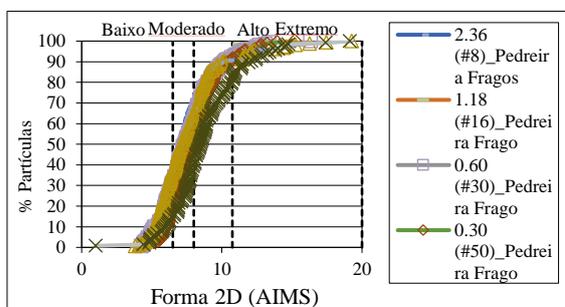
WILSON, J.D., KLOTZ, L.D. Quantitative Analysis of Aggregate Based on Hough Transform. **Transportation Research Record**, n. 1530, p. 111-115. Washington, D.C., 1996

WHITE, T.D.; HADDOCK, J.E.; RISMANJOTO, E. "NCHRP Report 557: Aggregate tests for hot-mix asphalt mixtures used in pavements. NCHRP Report 557. **Transportation Research Board.** Washington, D.C., 2006

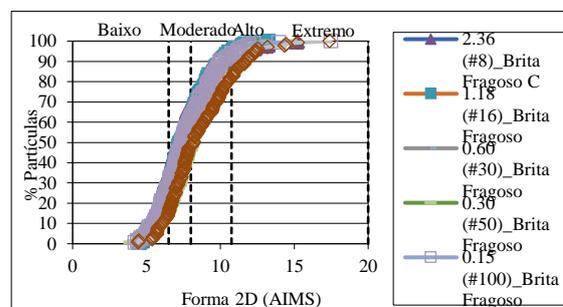
APÊNDICE A

APÊNDICE – A₁ – Representação gráfica do ensaio de Forma 2D - AIMS

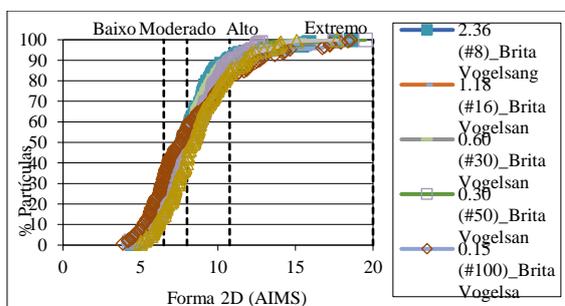
Forma dos agregados miúdos para Jazida FRAG-M



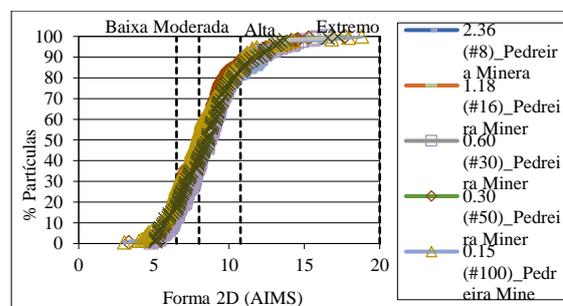
A) Jazida FRAG-M



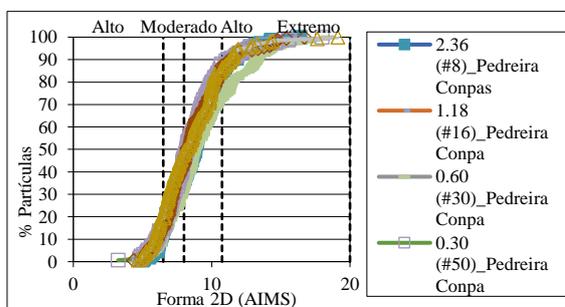
B) Jazida FRAG-F



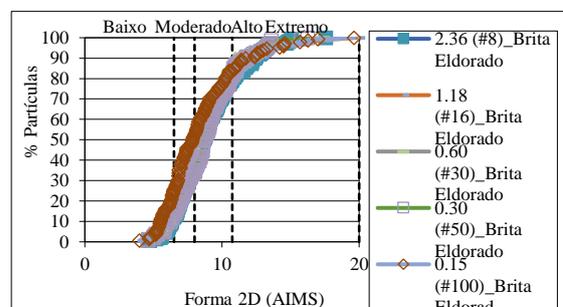
C) Jazida VOG



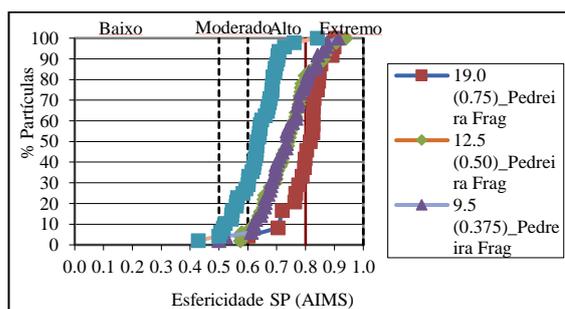
D) Jazida MIN



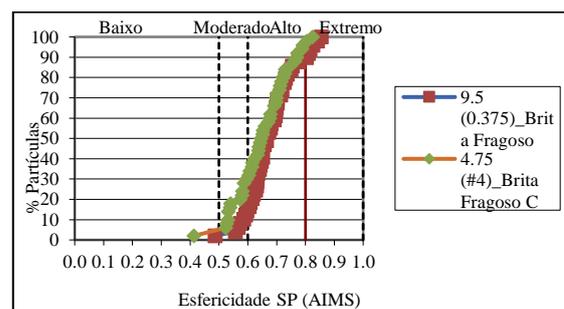
E) Jazida CONP



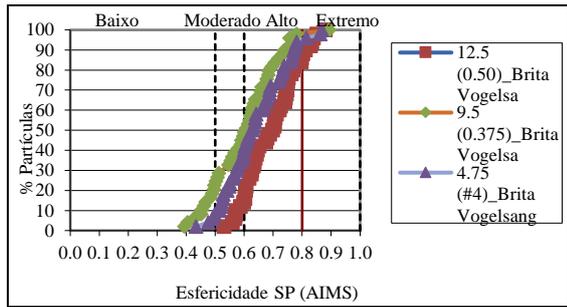
F) Jazida ELD

APÊNDICE – A₂ – Representação gráfica do ensaio de esfericidade – AIMS

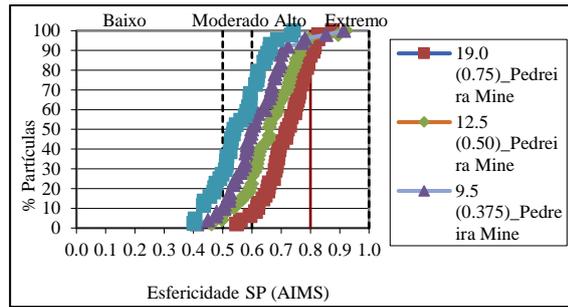
A) Jazida FRAG-M



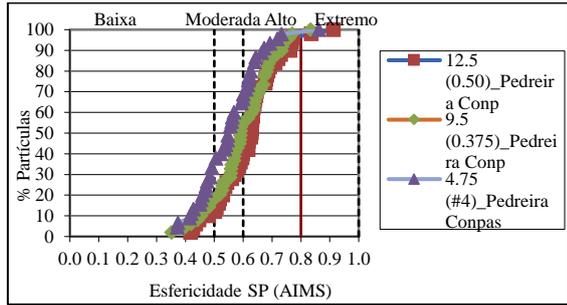
B) Jazida FRAG-F



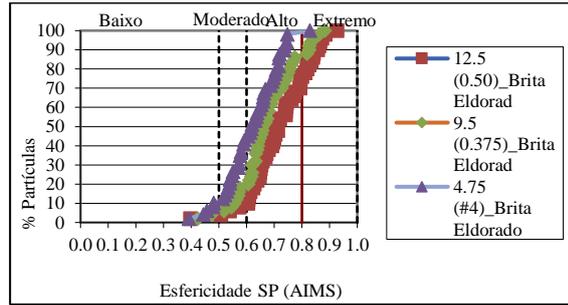
C) Jazida VOG



D) Jazida MIN

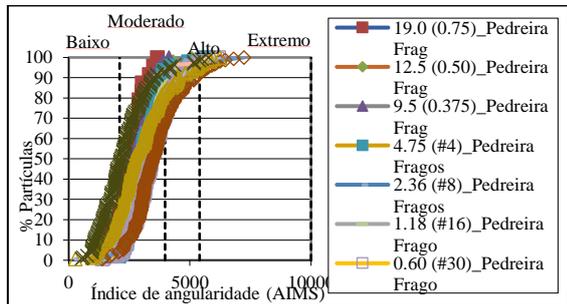


E) Jazida CONP

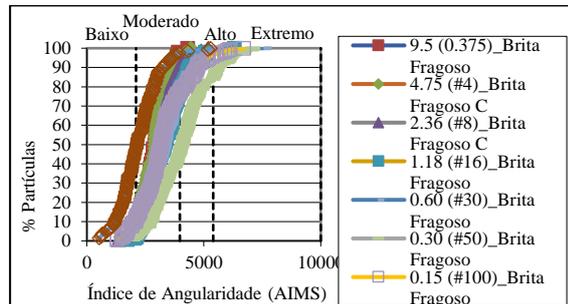


F) Jazida ELD

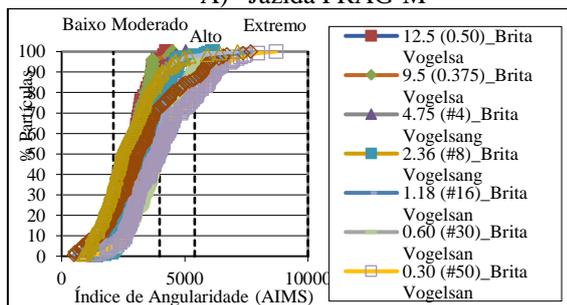
APÊNDICE – A₃ – Representação gráfica do ensaio de Angularidade – AIMS



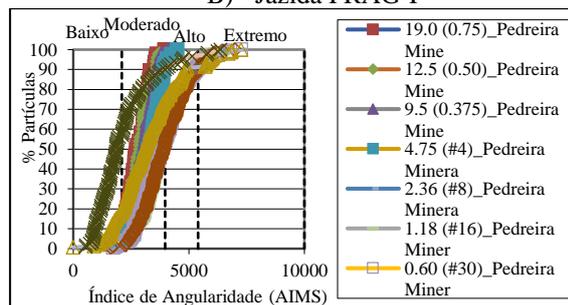
A) Jazida FRAG-M



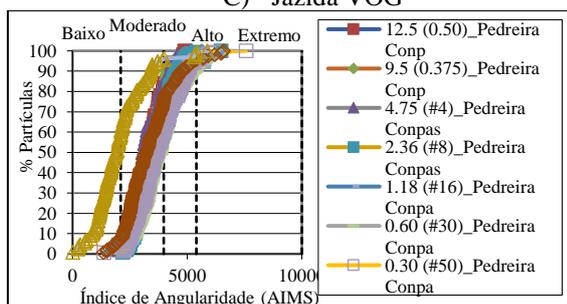
B) Jazida FRAG-F



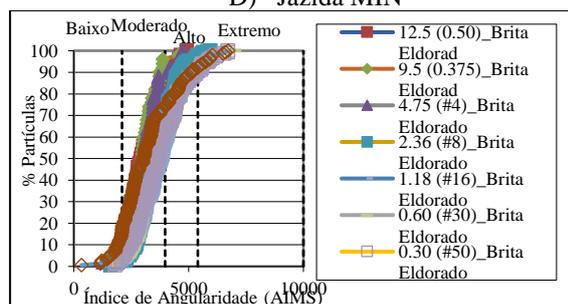
C) Jazida VOG



D) Jazida MIN

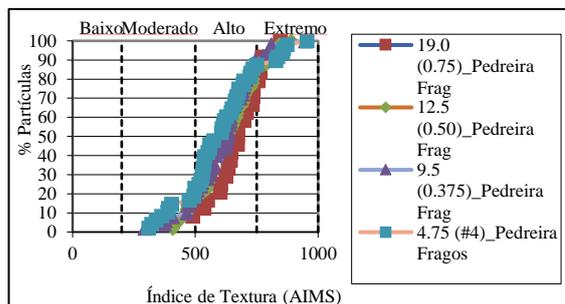


E) Jazida CONP

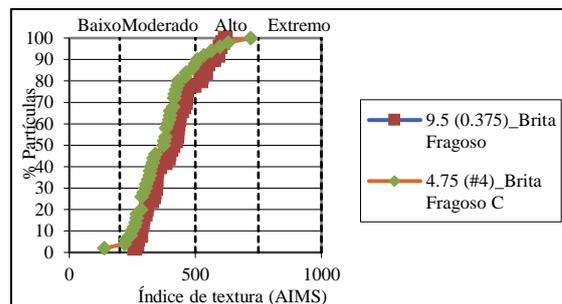


F) Jazida ELD

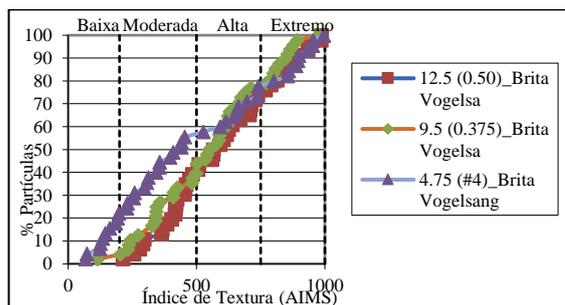
APÊNDICE – A4 – Representação gráfica do ensaio de Textura – AIMS



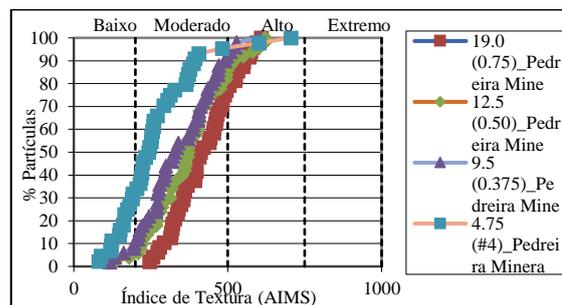
A) Jazida FRAG-M



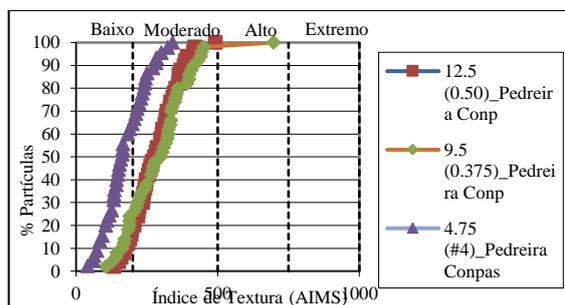
B) Jazida FRAG-F



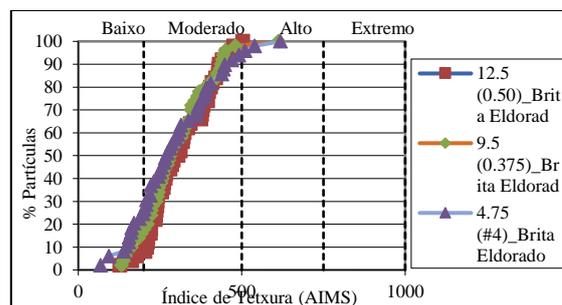
C) Jazida VOG



D) Jazida MIN

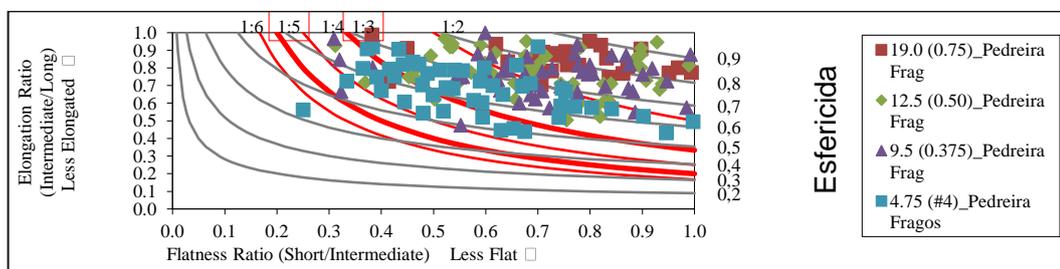


E) Jazida CONP

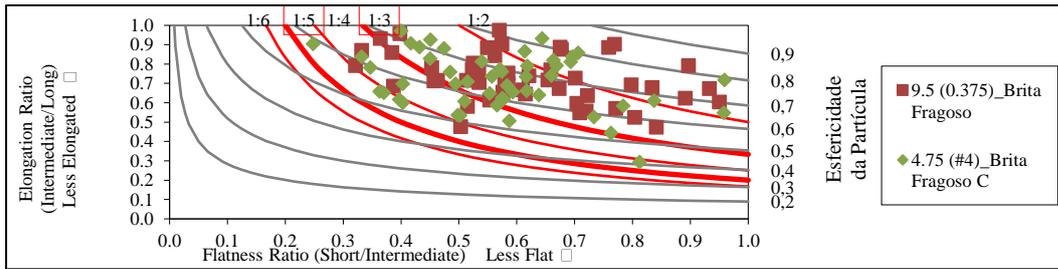


F) Jazida ELD

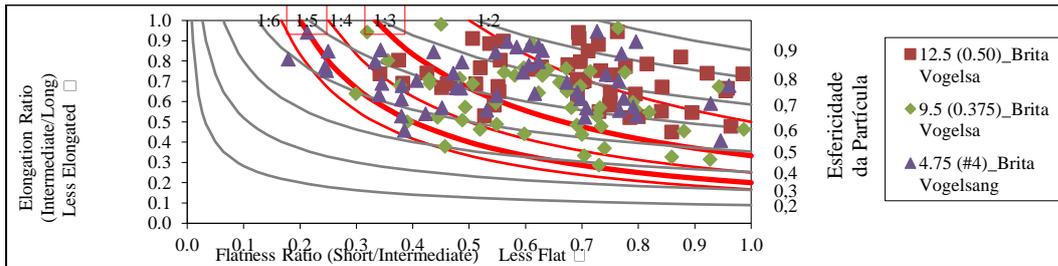
APÊNDICE – A5 – Representação gráfica do ensaio achatado/alongado – AIMS



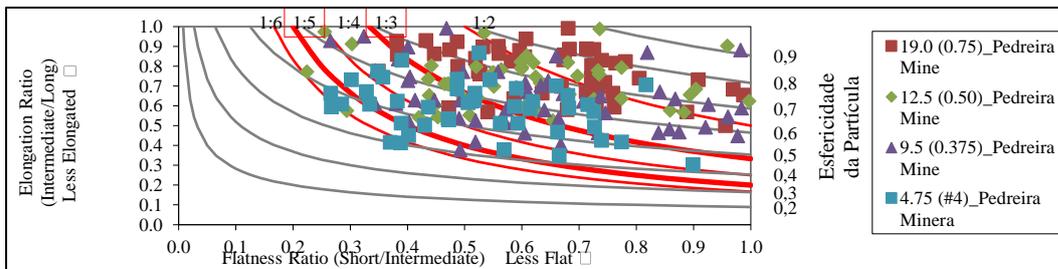
A) Jazida FRAG-M



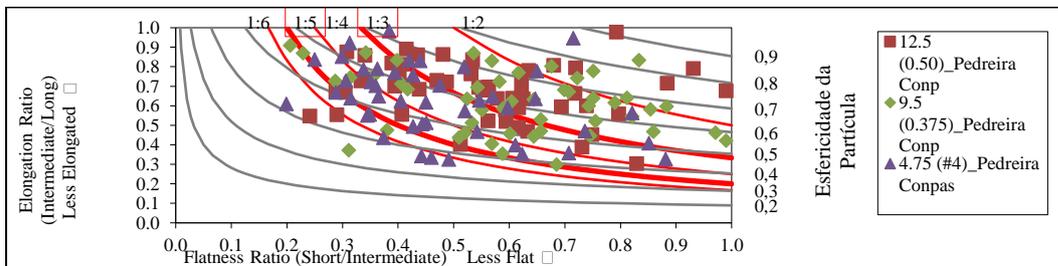
B) Jazida FRAG-M



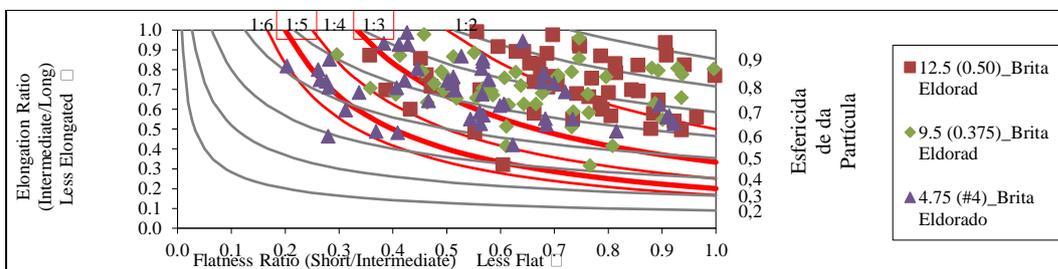
C) Jazida VOG



D) Jazida MIN



E) Jazida COMP



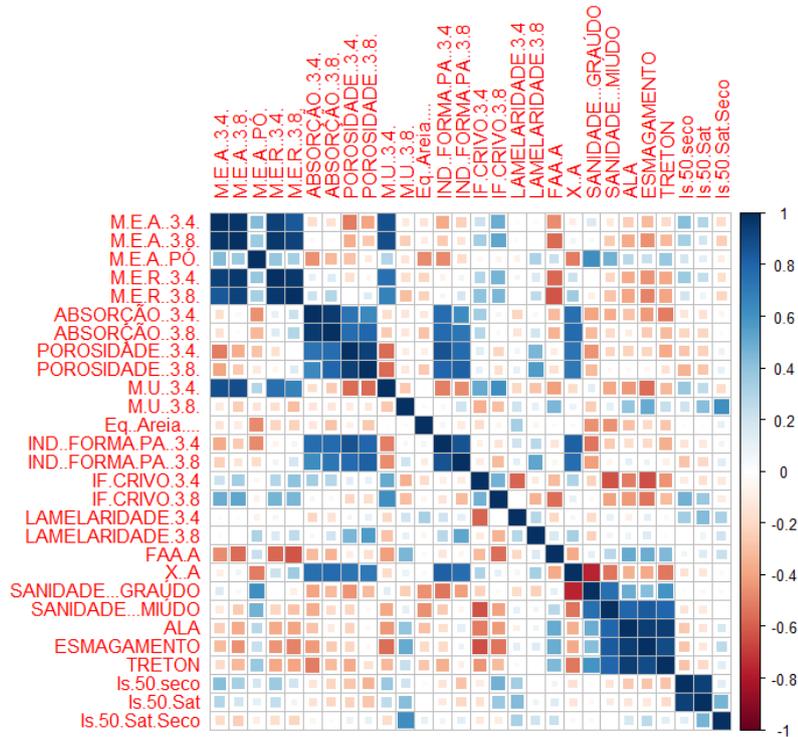
F) Jazida ELD

APÊNDICE – A₆ – Resultado geral dos ensaios de caracterização das diferentes jazidas

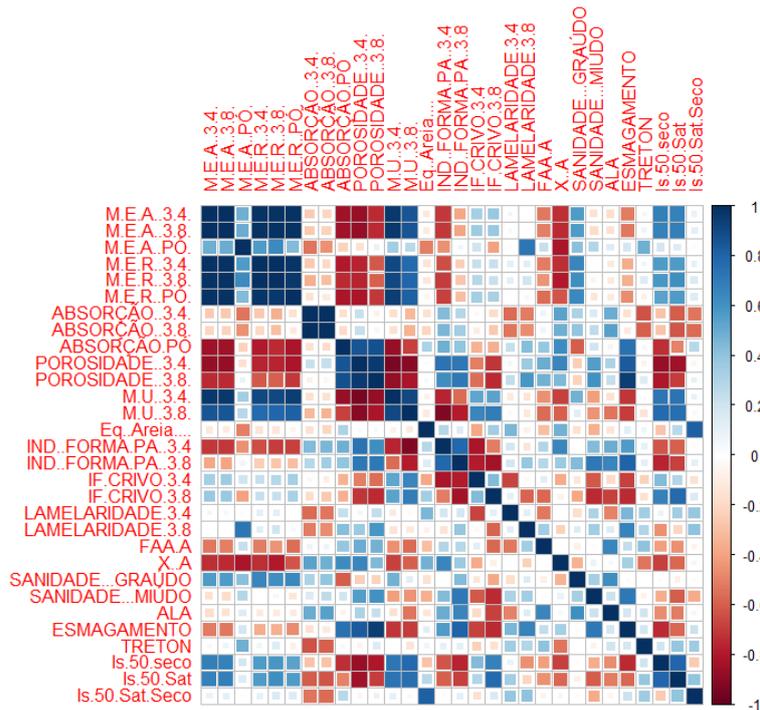
Ensaio	Nomenclatura						
	FRAG-M	FRAG-F	FRAG-N	VOG	MIN	CONP	ELD
IF – Paquí. 3/4"	1,37	-	-	1,44	1,48	1,54	1,58
IF – Paquí. 3/8"	1,45			1,49	1,52	1,58	1,99
IF – Crivo 3/4"	0,9			0,79	0,79	0,77	0,89
IF – Crivo 3/8"	0,69			0,69	0,64	0,44	0,56
IL – DAER/RS 3/4"	9,7			18,9	27,1	20,9	7,5
IL – DAER/RS 3/8"	15,2			25	36,8	29,3	18,9
F&A (3:1) – 3/4"	4%	22%	-	25%	17%	35%	8%
F&A (3:1) – 3/8"	12%	-	13%	21%	42%	36%	21%
F&A (5:1) – 3/4"							
F&A (5:1) – 3/8"							
AFF – Método A	46,5			49,7	50,7	48,73	49,82
AFF – Método B	49,16			54,27	50,89	53,51	54,5
AFF – Método C	37,06			43,05	42,59	45,04	43,67
φ A	33,81			29,03	29,36	33,81	35,07
φ C	42,49			40,71	36,65	37,41	40,85
M.E.A 3/4"	2,75			2,82	2,61	2,6	2,53
M.E.A 3/8"	2,69			2,75	2,53	2,55	2,51
M.E.A Pó (g/cm ³)	2,67			2,88	2,66	2,56	2,63
Absorção 3/4" (%)	0,3			0,2	0,25	0,32	0,82
Absorção 3/8" (%)	0,56			0,33	0,58	0,74	0,99
Absorção Pó (%)	0,35	-	-	0,31	1,08	0,48	0,82
Porosidade 3/4" (%)	0,81			0,58	0,65	0,83	2,06
Porosidade 3/8" (%)	1,51			0,9	1,47	1,89	2,48
M.E.R 3/4" (g/cm ³)	2,77			2,84	2,62	2,62	2,58
M.E.R 3/8" (g/cm ³)	2,73			2,77	2,57	2,6	2,58
M.E.R Pó (g/cm ³)	2,66	-	-	2,87	2,69	2,55	2,61
Massa Unitária Solta – 3/4"	1,63			1,6	1,49	1,42	1,51
Massa Unitária Solta – 3/8"	1,58			1,53	1,39	1,5	1,45
Massa Unitária Solta – Pó	1,66			1,56	1,44	1,44	1,46
Sanidade Graúdo (%)	13,62			13,33	10,93	9,08	6,54
Sanidade Miúdo (%)	7,98			10,34	9,67	11,67	6,02
Equivalente Areia	57			70	74	79	81
ALA (%)	11,62			15,45	20,78	21,02	19,4
Esmagamento (%)	14,17			15,95	18,82	22,91	17,59
Treton	12,28			12,16	18,42	18,29	18,19
Comp. Puntiforme – Is(50) seco (MPa)	6,91			10,48	10,6	3,81	3,4
Comp. Puntiforme – Is(50) sat (MPa)	6,89			9,32	10,26	3,39	3,21
Is(50)Sat/Seco	0,99			0,88	0,97	0,89	0,94
Adesividade	Não Sat	-	-	Não Sat	Não Sat	Não Sat	Não Sat

APÊNDICE B

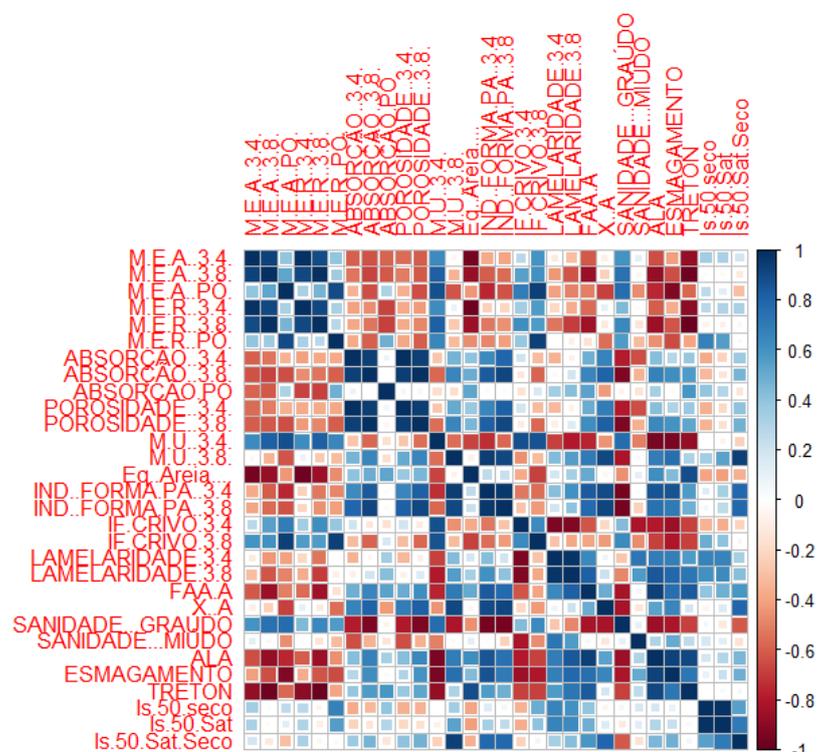
APÊNDICE – B₁ – Matriz de correlação linear conjunto de rochas.



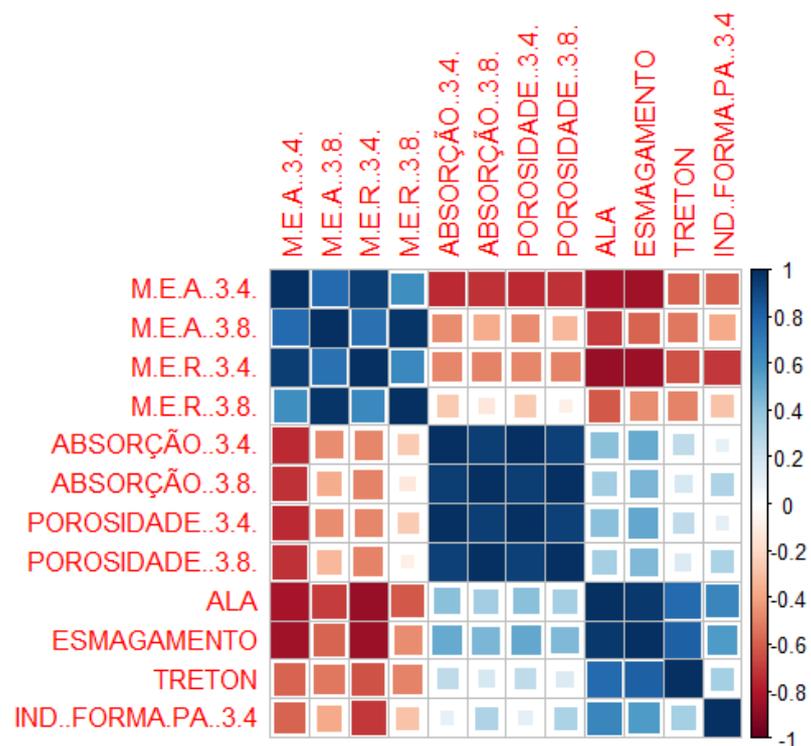
APÊNDICE – B₂ – Matriz de correlação linear rochas vulcânicas.



APÊNDICE – B₃ – Matriz de correlação linear rochas plutônicas



APÊNDICE – B₄ – Matriz de correlação linear rochas metamórficas



ANEXO

ANEXO A₁ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Fiorentini (2002).

Nomenclatura	Classificação Rocha	Acidez Rocha	Sanidade Graúdo (%)	Absorção ¾" (%)	Comp. Puntiforme – Is(50) Seco (MPa)
136	Dacito	Ácida	1,70	3,20	-
654	Andesito Basáltico	Básica	2,00	2,70	7,70
51	Dacito	Ácida	2,10	2,00	8,90
651	Basalto	Básica	2,30	1,10	10,90
378	Dacito	Ácida	2,40	1,60	-
300	Andesito Basáltico	Básica	2,50	2,40	8,80
104	Andesito Basáltico	Básica	2,90	1,10	8,20
684	Diabásio	Básica	3,10	1,20	8,70
20	Basalto	Básica	3,70	0,30	7,60
653	Basalto	Básica	4,40	2,10	10,30
485	Basalto	Básica	4,90	2,20	-
515	Basalto	Básica	5,20	1,40	8,10
266	Andesito	Básica	5,90	1,60	9,20
376	Basalto	Básica	5,90	1,40	-
251	Dacito	Ácida	6,10	2,40	9,60
11	Basalto	Básica	6,40	1,70	-
12	Dacito	Ácida	6,50	2,00	7,90
545	Basalto	Básica	6,90	1,50	7,80
652	Basalto	Básica	7,00	1,80	8,00
10	Basalto	Básica	7,10	1,40	7,20
8	Basalto	Básica	7,7	2,00	8,20
634	Basalto	Básica	8,10	4,00	5,30
504	Basalto	Básica	15,50	3,70	5,00
483	Basalto	Básica	15,80	3,40	5,30
252	Andesito Basáltico	Básica	19,80	5,60	-
9	Basalto	Básica	20,00	2,50	6,90
390	Basalto	Básica	26,60	3,10	5,70

ANEXO A₂ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Gouveia (2002).

Nomenclatura	Classificação Rocha	FAA A (%)	Ângulo de atrito interno (φ)
01 Pedreira Santa Isabel	Basalto	51,1	46,3
02 Pedreira Fazenda Velha	Granito	50,4	
03 Pedreira Contil	Gnaiss	49,7	
04 Pedreira São Jerônimo	Granito	49,1	
05 Pedreira Basalto – Americana	Basalto	49,0	
06 Pedreira Bonato	Basalto	48,7	
07 Pedreira São Roque	Granito	48,3	46,4
08 Pedreira Bandeirantes	Basalto	48,3	
09 Pedreira Basalto 6	Basalto	48,2	
10 Pedreira 52.314 AM: 02	Granito	48,2	
11 Pedreira 52.314 AM 01	Granito	47,9	
12 Pedreira Basalto – Jaguariuna	Gnaiss	47,8	
13 Pedreira 52.414	Granito	47,8	
14 Pedreira Galvani	Basalto	47,4	
15 Pedreira Basalto 05	Gnaiss	47,0	
16 Pedreira 52.232	Granito	47,0	
17 Pedreira Edispel	Basalto	46,9	
18 Pedreira 52.304	Granito	46,8	
19 Rio Moji Guaçú	Areia natural britada	46,7	
20 Rio Moji Guaçú	Areia natural	44,0	41,6

ANEXO A3 Resultado geral dos ensaios de caracterização de Ribeiro (2006).

Nomenclatura	Classificação Rocha	Acidez da Rocha	M..E.A $\frac{3}{4}$ " (g/cm ³)	M..E.A $\frac{3}{8}$ " (g/cm ³)	Absorção $\frac{3}{4}$ " (%)	Absorção $\frac{3}{8}$ " (%)	Porosidade Aparente $\frac{3}{4}$ " (%)	Porosidade Aparente $\frac{3}{8}$ " (%)	IF Paq. $\frac{3}{4}$ "	ALA (%)	Treton (%)	ESM
Anhanguera (RJ)	Gnaiss	-	2,70	2,71	0,47	0,52	1,30	1,40	2,2	44,3	18,6	29,9
Anhanguera (SG)	Granito	Ácida	2,68	2,69	0,48	0,49	1,3	1,3	2,5	46,4	27,2	27,7
Bangu			2,64	2,68	1,12	0,73	3,0	2,0	1,9	44,3	22,2	30,3
Carioca	Granito	Ácida	2,66	2,66	0,39	0,45	1,0	1,2	2,2	58,7	34,8	30,9
Cispel	Granito	Ácida	2,7	2,71	0,37	0,42	1,0	1,1	1,8	33,7	17,6	24,7
Convém	Granito	Ácida	2,63	2,62	0,37	0,47	1,0	1,2	2,3	46,7	18,7	27,0
Emasa	Granito	Ácida	2,66	2,67	0,57	0,54	1,5	1,4	1,8	59,8	41,8	32,9
EMFOL	Granito	Ácida	2,65	2,65	0,56	0,53	1,5	1,4	1,7	54,1	33,4	37,0
Estrela			2,69	2,66	0,47	0,44	1,3	1,2	2,1	47,8	17,5	26,5
Holcim	Granito	Ácida	2,67	2,66	0,75	0,54	2,0	1,4	1,9	42,4	19	27,6
IBRATA (RJ)	Granito	Ácida	2,63	2,61	0,56	0,42	1,5	1,1	2,2	52,7	18,1	28,0
IBRATA (I)	Granito	Ácida	2,69	2,68	0,28	0,43	0,7	1,1	1,6	36,1	16,4	25,6
J. Serô			2,69	2,67	0,47	0,41	1,3	1,1	1,9	56,4	31,7	33,9
Lafarge	Granito	Ácida	2,66	2,69	0,56	0,42	1,5	1,1	2,1	46,7	28,8	29,1
Macasa			2,7	2,68	0,29	0,44	0,8	1,2	2,1	38,2	23,4	25,6
Ouro Branco	Granito	Ácida	2,67	2,7	0,49	0,42	1,3	1,1	2,3	51,5	28,2	31,5
Raiz de Serra	Granito	Ácida	2,65	2,67	0,75	0,53	2,0	1,4	1,8	58,4	42,4	37,5
Santa Luiza	Granito	Ácida	2,71	2,72	0,28	0,4	0,8	1,1	2,3	54,6	23,5	32,1
São Pedro	Granito	Ácida	2,64	2,66	0,55	0,43	1,5	1,1	2,2	44,4	19,5	28,1
SePETIBA			2,74	2,75	0,28	0,42	0,8	1,2	2,1	40,3	20,9	26,8
SIMGRA	Granito	Ácida	2,64	2,65	0,58	0,5	1,5	1,3	1,9	47	27	29,2
SNEC	Granito	Ácida	2,63	2,61	0,52	0,45	1,4	1,2	2,1	42,3	18,2	24,8
SPAR	Granito	Ácida	2,68	2,69	0,47	0,42	1,3	1,1	1,9	46,4	21,7	28,9
Tamoio			2,68	2,7	0,47	0,43	1,3	1,2	1,9	47,9	21,5	31,3

ANEXO A₄ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Pinheiro (2009).

Nomenclatura	Classificação Rocha	M.E.A $\frac{3}{4}$ " (g/cm ³)	M.E.A $\frac{3}{8}$ " (g/cm ³)	Absorção $\frac{3}{4}$ " (g/cm ³)	Absorção $\frac{3}{8}$ " (g/cm ³)	ALA (%)
P1	V.ácida	2,51	2,5	2,26	2,71	13,9
P2	Basalto	2,9	2,88	1,2	1,43	10,9
P3	Basalto	2,89	2,88	1,26	1,65	13,9
P4	Basalto	2,81	2,81	1,73	1,86	9,1
P5	Basalto	2,76	2,72	2,33	2,84	11,5
P6	Basalto	2,83	-	1,53	-	9,4

ANEXO A₅ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Boeira (2014).

Nomenclatura	Classificação Rocha	M.E.A $\frac{3}{4}$ " (g/cm ³)	Absorção $\frac{3}{4}$ " (g/cm ³)	Sanidade gráudo	EQ	IF	IL	ALA (%)
P1	Basalto	2,87	1,65	2,59	77,25	2,73	17,8	9,86
P2	Riodacito	2,47	2,77	1,52	67,1	0,99	7,2	10,6
P3	Marmóre dolimítico	2,78	0,61	4,32	75,53	2,54	14,7	14,7
P4	Marmóre Calcítico	2,64	1,4	19,34	62,23	2,51	13	26,79
P5	Granítica	2,6	0,44	0,63	66,1	1,01	20,5	21,3
P6	Dacito	2,7	1,55	3,47	62,08	2,19	11,3	9,88
P7	Diabásio	2,8	1,7	1,22	69,9	2,0	7,2	16,8

ANEXO A₆ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Meurer (2015).

Nomenclatura	Classificação Rocha	M.E.A $\frac{3}{4}$ " (g/cm ³)	Absorção $\frac{3}{4}$ " (g/cm ³)	Sanidade (%)	ALA (%)	Adesividade
Vogelsanger	Anfubólio-biotita Tonalito	2,8	0,44	1,95	12,54	Não satisfatório
Rio Zoada (Escura)	Biotita – Anfibólio Tonalito	2,77	0,35	0,93	13,85	Não satisfatório
Rudnick	Metatonalito	2,7	0,4	0,84	13,92	Não satisfatório
Sol Nascente	Biotita Sieno- Granito	2,72	0,56	0,62	20,76	Não satisfatório

ANEXO A7 Resultado geral dos ensaios de caracterização de Remédio (2017).

Nomenclatura	Classificação Rocha	Granulação	M.E A (g/cm ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção (%)	Comp. Puntiforme – Is(50) seco (MPa)	ESM	Treton	ALA
BAS	Micro-Gabro	F (0,5 a 1,5 mm)	2,99	0,78	0,26	9,6	12,2	11,7	13,4
CVG	Gnaisse	F (0,5 a 1,5 mm)	2,755	0,72	0,26	7,0	14,7	17,6	16,2
MOR	Monzogranito	F-M (0,5 a 1,5 mm)	2,620	0,85	0,32	10,7	18,1	18,7	16,2
ITU	Monzogranito	G (2 a 5 mm)	2,638	0,59	0,22	7,5	27,8	54,0	31,3
TNO	Monzogranito	M (1 a 2 mm)	2,614	1,10	0,43	9,6	20,7	32,5	23,0
TIC	Sienogranito	G (1 a >20 mm)	2,65	1,16	0,44	6,9	26,5	44,0	29,2
TAI	Bt monzogranito	G (2 a 10 mm)	2,8	0,59	0,22	6,4	22,0	28,3	20,9
CAN-O	Bt sienogranito	G (até 15 mm)	2,7	0,56	0,21	8,0	17,5	26,1	12,2
CAN-L	Monzogranito	G (2 a > 10 mm)	2,766	0,68	0,25	7,9	19,1	18,5	12,9

ANEXO A₈ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Paiva (2017).

Ensaio	Nomenclatura					
	PIN	DPA	COM	COT	SUL	PAI
Classificação Rocha	Riodacito	Riodacito	Riodacito	Diabásio	Basalto	Andesi-Basalto
IF – Paquí. 3/4”	3,09	2,09	2,46	3,18	2,00	2,49
IF – Paquí. 3/8”	3,43	2,24	2,47	-	2,14	2,51
IF – Crivo 3/4”	0,76	0,91	0,89	0,73	0,91	0,86
IF – Crivo 3/8”	0,49	0,67	0,62	-	0,75	0,58
IL – DAER/RS 3/4”	27,48	11,88	6,83	26,25	5,56	14,5
IL – DAER/RS 3/8”	36,57	39,94	36,75	-	11,96	34,64
M.E.A 3/4”	2,49	2,50	2,50	2,91	2,89	2,96
M.E.A 3/8”	2,48	2,49	2,51	-	2,87	2,92
Massa específica Chapman (g/cm ³)	2,62	2,64	2,62	-	2,92	3,02
Absorção 3/4” (%)	2,68	2,19	1,86	1,00	0,49	0,91
Absorção 3/8” (%)	2,82	2,35	2,15	-	0,74	1,27
M.E.R 3/4” (g/cm ³)	2,67	2,64	2,62	3,00	2,93	3,04
M.E.R 3/8” (g/cm ³)	2,66	2,65	2,66	-	2,93	3,03
Sanidade Graúdo (%)	4,56	0,66	2,09	16,53	5,51	3,11
Sanidade Miúdo (%)	8,39	5,61	3,7	-	4,56	5,3
Equivalente Areia	74,7	67,65	71,31	-	66,67	83,4
ALA (%)	13,86	10,05	13,97	18,71	12,54	8,67
Esmagamento (%)	15,6	13,17	12,26	20,46	9,34	9,35
Treton	7,48	4,66	10,19	16,63	5,8	4,25
Comp. Puntiforme – Is(50) seco (MPa)	5,66	6,46	6,8	7,81	8,26	10,38
Comp. Puntiforme – Is(50) sat (MPa)	5,28	5,76	6,63	6,75	7,18	9,28
Adesividade	Não Sat.	Não Sat.	Não Sat.	Sat.	Sat.	Sat.

ANEXO A9 Resultado geral dos ensaios de caracterização de Back (2018).

Ensaio	Nomenclatura						
	CONC	SBS	CAP	SJ	CMV	CMC	NH
Classificação Rocha	Basalto	Sieno Granito	Basalto	Basalto	Mármore Calcítico	Mármore Dolomítico	Mármore Calcítico
IF – Paquíim. 3/4”	2,15	1,99	2,04	1,87	1,82	-	1,96
IF – Paquíim. 3/8”	2,09	2,61	2,42	2,69	2,24	-	2,75
IF – Crivo 3/4”	0,84	0,77	0,87	0,88	0,84	-	0,81
IF – Crivo 3/8”	0,83	0,51	0,57	0,59	0,67	-	0,62
IL – DAER/RS 3/4”	40,10	24,96	23,05	20,24	14,62	-	12,24
IL – DAER/RS 3/8”	26,02	37,75	44,97	65,71	33,95	-	38,90
M.E.A 3/4”	2,74	2,61	2,76	2,87	2,81	2,84	2,65
M.E.A 3/8”	2,72	2,51	2,74	2,86	2,79	-	2,60
Massa específica Chapman (g/cm ³)	2,73	2,6	2,76	2,96	-	-	2,68
Absorção 3/4” (%)	0,94	0,69	1,35	1,19	0,26	0,24	1,08
Absorção 3/8” (%)	1,51	1,05	1,93	1,78	0,56	-	2,29
M.E.R 3/4” (g/cm ³)	2,81	2,66	2,87	2,97	2,84	2,85	2,73
M.E.R 3/8” (g/cm ³)	2,83	2,58	2,89	3,01	2,83	-	2,76
Sanidade Graúdo (%)	1,11	1,72	3,53	5,62	1,01	1,46	15,49
Sanidade Miúdo (%)	4,26	8,98	7,63	5,7	-	-	15,53
Equivalente Areia	82	71	55	74	-	-	48
ALA (%)	8,76	26,39	11,44	12,56	13,8	14,96	35,22
Esmagamento (%)	12,14	26,38	13,2	13,73	14,52	-	28,36
Treton	9,06	18,7	9,61	8,44	11,59	14,68	30,63
Comp. Puntiforme – Is(50) seco (MPa)	8,14	8,52	8,16	6,64	6,97	6,75	4,45
Comp. Puntiforme – Is(50) sat (MPa)	8,38	9,96	6,80	7,06	5,05	7,09	4,04
Adesividade	Não Sat	Não Sat	Sat	Sat	Não Sat		Não Sat

ANEXO A₁₀ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Faccin (2018).

Nomenclatura	Classificação Rocha	IF ¾"	IF ⅜"	IL ¾"	IL ⅜"	Absorção (%)	Eq. Areia (%)	Sanidade (%)	ALA (%)
P1	Basalto	-	0,79	-	25,9	1,0	61,4	3,0	23,1
P2	Basalto	0,77	0,55	25,8	50,8	1,4	56,9	3,2	16
P3	Riodacito	0,94	0,78	9,20	27,4	2,8	60,7	0,4	14,5
P4	Basalto	0,87	0,75	14,8	17,8	1,5	57,7	1,9	11,0
P5	Granítica	0,84	0,70	20,7	37,0	0,5	71,0	5,4	26,4
P6/P7/P8	Basalto	0,81	0,78	20,8	19,2	2,9	62,5	3,7	11,8
P9	Basalto	0,94	0,72	9,7	27,8	2,6	61,7	4,7	12,5
P10	Granítica	0,87	0,81	18,3	28,7	1,0	63,0	4,8	19,8
P11/P12	Rocha Metamórfica	0,76	0,79	29,7	17,6	0,4	58,3	4,3	14,8
P13	Diabásio	0,92	0,82	8,20	12,5	1,9	69,9	1,2	16,9
P14	Basalto	0,83	0,71	24,5	29,5	1,0	60,8	5,8	13,1
P15	Basalto	0,73	0,66	26,25	32,6	1,0	63,0	16,5	13,7

ANEXO A₁₁ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Curtis (2019).

Nomenclatura	Classificação Rocha	Granulação	M.E A (g/cm ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção (%)	Sanidade	Esmagamento	Treton	ALA	Adesividade
BAS	Basalto	Muito fina <1 mm	2,99	0,60	0,31	0,68	11,5	6,57	11,8	Não Satisfatório
DIA	Diabásio	F (0,5 a 1,5 mm)	2,94	0,69	0,36	1,14	13,5	10,19	12,8	Não Satisfatório
MONm	Monzodiorito	F-M (0,5 a 5 mm)	2,8	0,86	0,46	1,09	13,6	10,99	14,7	Não Satisfatório
MONmg	Monzodiorito	F-G (0,5 a 6 mm)	2,88	0,79	0,42	2,01	14,6	13,42	16,5	Não Satisfatório

ANEXO A12 Resultado geral dos ensaios de caracterização de Brondani (2019)

Nomenclatura	Classificação Rocha	Índice	Adesividade visual CAP 50/70	Adesividade	Textura - AIMS
P1	Basalto	50	Excelente	Satisfatório	679-724
P2	Basalto com olivina	40	Muito boa	Não Satisfatório	737-774
P3	Riodacito	20	Ruim	Não Satisfatório	349-369
P4	Basalto	30	Boa	Não Satisfatório	465-561
P5	Sienogranito	10	Muito ruim	Não Satisfatório	196-168
P6/P7/P8	Dacito	5	Péssimo	Não Satisfatório	561-465
P9	Olivina Basalto	35	Boa	Não Satisfatório	624-704
P10	Sienogranito	15	Ruim	Não Satisfatório	253-240
P11/P12	Mármore Dolomítico	30	Boa	Não Satisfatório	485-470
P13	Olivina Diabásio	45	Muito boa	Não Satisfatório	661-653
P14	Andesito	0	Péssimo	Não Satisfatório	701
P15	Dibásio	25	Boa	Não Satisfatório	428-532

ANEXO A₁₃ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Rodrigues (2019).

Nomenclatura	Classificação Rocha	M.E A (g/cm ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção (%)	FAA – Metodo A (%)	Ângulo de atrito interno (φ)
A01	Basalto	2,79	6,68	2,39	46,54	46,74
A07	Basalto	2,87	5,39	1,86	46,04	46,48
A11	Basalto	2,48	5,01	1,76	44,37	46,48
A13	Basalto	2,64	7,53	2,71	50,64	41,36
A16	Basalto	2,52	4,96	1,77	46,99	45,11
A22	Basalto	2,84	4,25	1,49	46,32	46,48
A02	Diabásio	2,82	6,04	2,27	47,61	45,40
A03	Diabásio	2,7	6,09	2,5	45,99	45,82
A04	Diabásio	2,88	6,13	2,13	46,84	47,03
A17	Diabásio	2,48	7,03	2,57	48,56	47,45
A19	Diabásio	2,46	6,50	2,47	42,67	47,08
A06	Riodacito	2,46	7,13	2,84	46,69	49,39
A08	Riodacito	2,46	6,79	2,72	46,85	49,91
A12	Riodacito	2,51	7,82	3,15	52,17	45,46
A18	Riodacito	2,55	6,52	2,64	52,40	47,13
A21	Riodacito	2,7	8,27	3,35	53,17	44,54
A05	Granito	2,51	1,8	0,71	47,50	44,72
A20	Granito	2,55	1,43	0,56	52,42	44,01
A09	Mármore	2,57	2,16	0,802	47,42	44,85
A10	Mármore	2,79	3,24	1,2	47,92	41,42
A14	Areia	2,84	1,26	0,48	43,17	39,19
A15	Areia	2,64	2,01	0,77	40,42	43,25

ANEXO A₁₄ Resultado geral dos ensaios de caracterização de Trotta (2020).

Ensaio	Basalto	Metacalcário	Paleossoma	Melanossoma	Leucossoma	Pegmatito	Granitoide
Granulação	fina	fina	média	Fina a média	Fina a média	Muito Grossa	Fina a média
M.E.A	2,92	2,74	2,65	2,87	2,58	2,59	2,63
Comp. Puntiforme – Is(50) seco (MPa)	12,94	6,02	5,56	4,58	5,38	2,75	10,17
ALA	10,6	22,7	49,2	54,2	49,9	51,0	20,0
Treton	4,4	9,3	25,1	36,2	28,2	29,8	7,4
Esmagamento	12,2	22,6					