

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

Priscylla Santos de Paiva

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES
GEOMECÂNICAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO DE
AGREGADOS DE ROCHAS VULCÂNICAS DA PORÇÃO
CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS
2017

Priscylla Santos de Paiva

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS
PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO DE AGREGADOS DE ROCHAS VULCÂNICAS
DA PORÇÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

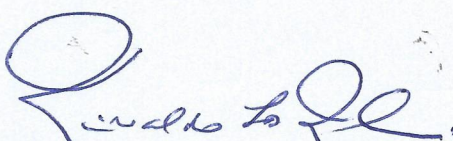
Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Santa Maria, RS
2017

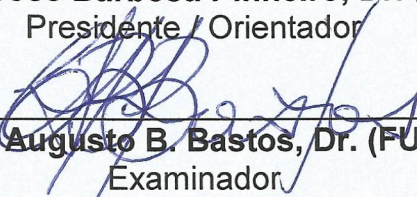
Priscylla Santos de Paiva

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS
PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO DE AGREGADOS DE ROCHAS VULCÂNICAS
DA PORÇÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL.**

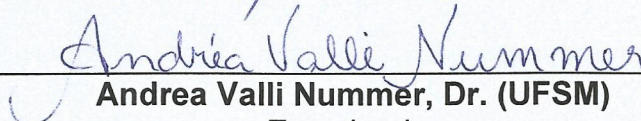
Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.



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



César Augusto B. Bastos, Dr. (FURG)
Examinador



Andrea Valli Nummer, Dr. (UFSM)
Examinador

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Paiva, Priscylla Santos de
Caracterização e avaliação das propriedades geomecânicas para uso em pavimentação de agregados de rochas vulcânicas da porção central do Rio Grande do Sul. / Priscylla Santos de Paiva.- 2017.
164 p.; 30 cm

Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2017

1. Materiais rochosos 2. Construção Civil 3. Agregados para pavimentação 4. Propriedades tecnológicas de rochas 5. Ensaios de Caracterização I. Pinheiro, Rinaldo José Barbosa II. Título.

DEDICATÓRIA

Ao meu esposo João Batista Dias de Paiva por ser o sol que ilumina o meu dia, por me fazer sorrir, por acreditar.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre colocar pessoas honestas e amigas em nossas vidas. A minha família tão maravilhosa que conhece minha capacidade, meu caráter e me permite crescer.

Ao meu orientador Professor Rinaldo Pinheiro por toda paciência e oportunidade de aprendizado prestada, que mesmo em meio aos momentos imprevisíveis no decorrer da pesquisa, confiou-me o seu nome para orientador e sempre me mostrou os caminhos a seguir com inúmeras chances de melhorar em meu trabalho. A CAPES pela bolsa que permitiu melhor dedicação a pesquisa.

A Professora Tatiana Cervo, por ser tão atenciosa e pela disposição em esclarecer as dúvidas que eu as apresentava e pela orientação na melhoria desta pesquisa com sugestões decorrentes da Qualificação do Mestrado. Também ao Professor César Augusto Bastos por vir de tão distante se apresentar na banca examinadora dessa Dissertação.

A Professora Andrea Nummer, por me permitir cair de paraquedas em sua sala de trabalho atrás de explicações e orientação em sua área de ensino. Por ter tentado me ajudar de todas as formas com livros, com orientações sobre as lâminas, pelo apoio com o Professor Luis Eduardo Robaina. Por ter-me feito cada vez mais sábia sempre que eu saía de sua sala e por ter confiado seus conhecimentos a mim.

Ao apoio oferecido para realização dos ensaios por parte do Laboratório de Geotecnia Prof. Jaques Medina Setor de Pavimentos – COPPETEC – UFRJ; Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Centro de Tecnologia e Laboratório de Laminação do Departamento de Geociências, ambos os laboratórios pertencentes à UFSM. Aos meus colegas do GEPPASV que me receberam com muita dignidade e intensão de ajudar, em especial aqueles que sempre estiveram por perto e durante as aulas: João Zago, Rodrigo Pull, Kátia Bohn, Gabriela Meller e Cléber Faccin. Também ao meu colega Pablo Vestena pela parceria nos ensaios.

Aos laboratoristas Sr. João, Alisson e Wilton por toda ajuda e atenção na execução dos ensaios. As empresas que doaram o material de forma incondicional.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO DE AGREGADOS DE ROCHAS VULCÂNICAS DA PORÇÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Priscylla Santos de Paiva

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Os recursos minerais são largamente utilizados pelo homem desde o seu surgimento, dentro deles destacam-se aqueles empregados na construção civil devido aos enormes volumes que são demandados desse material e ao seu baixo custo em relação a outros minerais. A necessidade de abrir caminhos para livre circulação do homem e de suas mercadorias deu início aos estudos sobre a melhor forma de se construir rodovias, onde o modal de transporte mais utilizado são os veículos. No início desses estudos, as propriedades dos materiais constituintes do pavimento não foram levadas em consideração devido à falta de conhecimento sobre seu efeito na resistência da estrutura. Hoje, após várias pesquisas, chegou-se a conclusão que os materiais que compõe o pavimento influenciam no seu desempenho e durabilidade. É através de ensaios que se determinam as propriedades dos materiais bem como o conhecimento de sua origem de formação. Esta pesquisa relata a caracterização e avaliação das propriedades geomecânicas de agregados comumente empregados na pavimentação rodoviária, coletados em unidades da porção central do Rio Grande do Sul, através de ensaios físicos e geomecânicos. Foram avaliadas lâminas delgadas, que possibilitaram classificar os materiais em rochas ácidas, intermediárias e básicas do tipo riódacitos, andesitobasalto, basalto e diabásios, essa classificação permitiu prever o comportamento dos agregados para alguns dos parâmetros comumente analisados em agregados para obras rodoviárias, como os índices físicos e a adesividade onde as rochas ácidas não obtiveram valores satisfatórios para o CAP 50/70. Dos parâmetros estudados, a forma foi avaliada sob diferentes métodos desde aqueles mais usuais como o uso do paquímetro e placa de lamelaridade, aos métodos que vem aperfeiçoando essa forma de analisar as partículas dos agregados como a utilização do software AIMS que permitiu verificar características de textura superficial das partículas. No que diz respeito à avaliação da resistência do material estudado, os ensaios de perda de massa por esmagamento, abrasão e por choque com o aparelho Treton executados para esta pesquisa, obtiveram resultados satisfatórios, além disso, quando comparados entre si, foi verificado que os resultados encontrados mostram uma tendência da influência da forma nas maiores perdas de massa. Ao final do estudo, foram analisadas as relações entre os parâmetros que apresentaram melhor coeficiente de correlação.

Palavras-Chaves: Materiais Rochosos; Construção Civil, Agregados para pavimentação, Propriedades Tecnológicas de Rochas, Ensaios de caracterização.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF GEOMECHANICAL PROPERTIES FOR USE IN PAVING OF VOLCANIC ROCKS AGGREGATES OF THE CENTRAL PORTION OF RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Priscylla Santos de Paiva
ADVISOR: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

The mineral resources have been widely used by man since its inception, among them are those employed in construction due to the enormous volumes that are demanded of this material and its low cost in relation to other minerals. The need to open roads for the free movement of man and his goods did it start to study the best way to build highways, where vehicles are the most used mode of transportation. At the beginning of those studies, the properties of the constituent materials of the pavement were not take into account due to lack of knowledge about its effect on the strength of the structure. After several researches, researchers concluded that the materials that make up the pavement influence its performance and durability. It is through tests that determine the properties of the materials as well as the knowledge of their origin of formation. This research reports the characterization and evaluation of the geomechanical properties of aggregates commonly used in road paving, collected in units of the central portion of Rio Grande do Sul, through physical and geomechanical tests. Thin slides were used to classify the materials into acidic, intermediate and basic rocks of the type rhyodacites, basaltic andesite, basalt and diabase. This classification allowed predicting the behavior of the aggregates for some of the parameters commonly analyzed in aggregates for road works, such as the physical indices and the adhesiveness where the acid rocks did not obtain satisfactory values for the CAP 50/70. From the studied parameters, the shape was evaluated under different methods from the most usual ones such as the use of the pachymeter and lamellar plate, to the methods that have been improving this way of analyzing the particles of the aggregates as the use of AIMS software that allowed verifying texture characteristics surface of the particles. Regarding to the evaluation of the strength of the studied material, the crushing, abrasion and shock mass tests with the Treton apparatus performed for this research, obtained satisfactory results, in addition, when compared with each other, it was verified that results show a tendency of the influence of the form in the greater losses of mass. At the end of the study, the relationships between the parameters that presented the best correlation coefficient were analyzed.

Keywords: Rocky Materials, Construction, Paving aggregates, Technological Properties of Rocks, Characterization tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Produção de agregados – Desmonte, carregamento e transporte	27
Figura 2. 2 – Britador de mandíbula.....	28
Figura 2. 3 – Britador giratório: perfil e vista de topo	29
.....	29
Figura 2. 4 – Britador tipo cônico	30
Figura 2. 5 – Estrutura de formações magmáticas.....	33
Figura 2. 6 – Granito grosseiro rico em feldspato potássico.....	34
Figura 2. 7 – Basalto com granulação fina	35
Figura 2. 8 – Amostra de folhelho, lâminas finas e paralelas	37
Figura 2. 9 – Províncias Geomorfológicas do Rio Grande do Sul	40
Figura 2. 10 – Seção geológica esquemática de um derrame.....	41
Figura 3.1 - Fluxograma das atividades executadas durante a pesquisa.	50
Figura 3.2 - Mapa esquemático com a indicação da localização das jazidas estudadas.	51
Figura 3.3. - Localização das jazidas de Itaara e Dilermando Aguiar	53
Figura 3.4 - Localização da jazida de Coronel Barros.....	53
Figura 3.5 – Vista da frente de lavra de cada uma das jazidas estudadas.....	54
Figura 3.6 - (a) Coleta de amostra em pilha (SUL) e (b) fragmentos de rocha na frente de detonação (DPA)	56
Figura 3.7 – Diferentes dimensões de partículas para uma amostra.....	56
Figura 3.8 - Processo para fabricação de lâminas delgadas.....	59
Figura 3.9 – a) Amostra observada sob microscópio em b) com luz natural e em c) com luz polarizada, observe detalhe destacado para o mesmo mineral.....	60
Figura 3.10 – Separação de agregados por diferentes tamanhos de grãos	61
Figura 3.11 - Medição do comprimento e espessura das partículas com uso do paquímetro	62
Figura 3.12 – Determinação do Índice de Forma com uso de crivos.....	63
Figura 3.13 - Placa para ensaio de lamelaridade.....	65
Figura 3.14 - Dispositivo de compasso proporcional.....	66
Figura 3.15 - Equipamento de sistema de medição por imagem AIMS2	67
Figura 3.16 - Vetor gradiente para partículas lisas x angulares de agregados graúdo e miúdo.....	69
Figura 3.17 – Faixa de angularidade para agregado graúdo e miúdo segundo o manual do AIMS.....	70
Figura 3.18 – Faixa de textura para agregado graúdo.	71
Figura 3.19 – Caixa metálica utilizada para determinação da massa unitária em estado solto do agregado.	75
Figura 3.20 – Equipamento de abrasão Los Angeles e resultado de um ensaio	77
Figura 3.21 – a) Equipamento e b) amostra preparada para o ensaio Treton.	79
Figura 3.22 – Equipamento para ensaio de esmagamento	80
Figura 3.23 – Posicionamento do fragmento durante ensaio de compressão puntiforme.....	81
Figura 3.24 – Ponteiras de aço e amostra de rocha para ensaio de compressão	82
Figura 3.25 – Ensaio de sanidade – detalhe dos cristais de sal envolvendo as partículas do agregado	84
Figura 3.26 – Amostras durante ensaio de equivalente de areia.....	85

Figura 4.1 – a) Amostra macroscópica da superfície do fragmento de rocha da jazida PIN destacando sua textura em b).....	88
Figura 4.2 – Amostra de fragmento de mão da rocha onde se vê amígdalas milimétricas, destacadas com um círculo	88
Figura 4.3 – Fotografia da lâmina da amostra PIN obtida do microscópio petrográfico destacando a presença de amígdala preenchida com zeólita (Luz Polarizada, aumento de 2,5x 8,0x 4,0 vezes).....	89
Figura 4.4 – a) Amostra de rocha COM e em b) foto obtida de lupa digital com aumento de 60 vezes	90
Figura 4.5 – Fotografia da lâmina da amostra COM obtida do microscópio petrográfico (Luz Polarizada com aumento de 2,5x8x04vezes).....	90
Figura 4.6 – a) Amostra macroscópica da rocha DPA e em b) detalhe com o uso de lupa digital (aumento 100 vezes).....	91
Figura 4.7 – Fotografia da lâmina da amostra DPA obtida do microscópio petrográfico com detalhe para cristal de piroxênio (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes).....	92
Figura 4.8 – a) Rocha em amostra de mão e em b) foto obtida por lupa digital com aumento de 100 vezes	93
Figura 4.9 – Fotografia da lâmina da amostra SUL obtida do microscópio petrográfico (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes)	93
Figura 4.10 – Em a), amostra de mão da jazida PAI e em b), foto de detalhe com o uso de lupa digital, aumento de 80 vezes.....	94
Figura 4.11 - Orientação de vesículas milimétricas indicando direção de fluxo na amostra da jazida PAI	94
Figura 4.12 – Fotografia da lâmina da amostra PAI obtida do microscópio petrográfico destacando ripas de plagioclásios intercrecidos com piroxênios e minerais opacos (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes)	95
Figura 4.13 – a) Amostra de mão e em b) foto obtida de lupa digital com aumento de 100 vezes	96
Figura 4.14 – Fotografia da lâmina da amostra COT obtida do microscópio petrográfico destacando as ripas de plagioclásios e textura fanerítica fina a média (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes).....	97
Figura 4.15 – Distribuição granulométrica do agregado de PIN	99
Figura 4.16 – Distribuição granulométrica do agregado de DPA.....	100
Figura 4.17 – Distribuição granulométrica do agregado de COM.....	101
Figura 4.18 – Distribuição granulométrica do agregado de SUL	102
Figura 4.19 – Distribuição granulométrica do agregado de PAI	103
Figura 4.20 – Distribuição granulométrica do agregado de COT.....	104
Figura 4.21 – Representação gráfica da distribuição da angularidade das diferentes partículas da jazida PAI	116
Figura 4.22 – Representação gráfica da distribuição esfericidade das diferentes partículas da jazida PAI	117
Figura 4.23 – Representação gráfica da distribuição da forma 2D das diferentes partículas da jazida PAI	118
Figura 4.24 – Representação gráfica da relação achatamento e alongamento para a jazida PAI.....	119
Figura 4.25 – Proporção partículas achatadas / alongadas para brita ¾ da jazida PAI	119
Figura 4.26 – Proporção partículas achatadas / longadas para brita 3/8 da jazida PAI	120

Figura 4.27 – Proporção partículas achatadas/alongadas da brita 3/8 da jazida SUL	120
Figura 4.28 – Amostra saturada da jazida PIN com alto índice de alteração e linhas de fratura após rompimento.....	128
Figura 4.29 – Amostra seca da jazida PIN com rompimento perpendicular as linhas de fratura.....	129
Figura 4.30 – Amostra seca da jazida PIN com presença de vesícula preenchida por zeólita.	129
Figura 4.31 – Amostra saturada da jazida PAI rompida de forma perpendicular a possível face direção de fluxo.....	130
Figura 4.32 – Amostra saturada da jazida COT após rompimento em direção paralela a face alterada.....	130
Figura 4.33 – Amostra saturada da jazida COT com pior índice de compressão pontual de 0,8 Mpa.....	131
Figura 4.34 – Amostras ao final do ensaio de adesividade	132
Figura 4.35. – Gráfico da Absorção x Massa específica aparente.....	135
Figura 4.36. – Gráfico Absorção x Massa específica aparente para as rochas ácidas.	136
Figura 4.37. – Gráfico da correlação entre o método com Paquímetro x Crivo	137
Figura 4.38 – Gráfico da correlação entre o método com Paquímetro x Lamelaridade	137
Figura 4.39 – Gráfico da correlação entre o método com Crivo x Lamelaridade	138
Figura 4.40 – Gráfico da correlação entre Isec x Absorção.....	139
Figura 4.41 – Gráfico da correlação entre Isec x Massa específica aparente	139
Figura 4.42 – Gráfico da correlação entre Isec x Massa específica real	140
Figura 4.43 – Gráfico da correlação entre Isec x Perda por Esmagamento	140
Figura 4.44 – Gráfico da correlação entre Isec x Isat.....	141
Figura 4.45 – Gráfico da correlação entre Absorção 3/8 x Perda por Esmagamento	142
Figura 4.46 – Gráfico da correlação entre Massa específica aparente 3/8 x Perda por Esmagamento.....	142
Figura 4.47– Gráfico da correlação entre Massa específica real 3/8 x Perda por Esmagamento.....	142
Figura 4.48– Gráfico da correlação entre a Perda por Abrasão Los Angeles x Perda por Esmagamento.....	143
Figura 4.49 – Gráfico da correlação entre a Perda por Esmagamento x Perda por Choque Treton	143
Figura 4.50 – Gráfico da correlação entre Isec x Perda por Esmagamento	143
Figura 4.51 – Gráfico da correlação entre Isat x Perda por Esmagamento	144
Figura 4.52 – Gráfico da correlação entre Abrasão x Esmagamento	145
Figura 4.53 – Gráfico da correlação entre Abrasão x Treton.....	145
Figura 4.54 – Gráfico da correlação entre Abrasão x Sanidade Graúdo	145
Figura 4.55 – Gráfico da correlação entre Abrasão x Sanidade Total	146
Figura 4.56 – Gráfico da correlação entre Treton x Esmagamento	147
Figura 4.57 – Gráfico da correlação entre Treton x Abrasão Los Angeles	147
Figura 4.58 – Gráfico da correlação entre Treton x Sanidade do Graúdo	147
Figura 4.59 – Gráfico da correlação entre Abrasão Los Angeles x Sanidade do Graúdo ...	148
Figura 4.60 – Gráfico da correlação entre Desgaste Treton x Sanidade do Graúdo	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Identificação das jazidas estudadas.....	52
Tabela 3.2 – Massa aproximada da amostra.	67
Tabela 3.3 – Limites da classificação propostos por Al Rousan.....	72
Tabela 4.1 – Resumo da análise petrográfica.	98
Tabela 4.2 – Características granulométricas dos materiais da brita PIN, porcentagem passante acumulada.....	99
Tabela 4.3 – Características granulométricas dos materiais da brita DPA, porcentagem passante acumulada.....	100
Tabela 4. 4 – Características granulométricas dos materiais da brita COM, porcentagem passante acumulada.....	101
Tabela 4. 5 – Características granulométricas dos materiais da brita SUL, porcentagem passante acumulada.....	102
Tabela 4. 6 – Características granulométricas dos materiais da brita PAI, porcentagem passante acumulada.....	103
Tabela 4. 7 – Características granulométricas dos materiais da brita COT, porcentagem passante acumulada.....	104
Tabela 4.8 – Resultado dos ensaios de absorção, massa específica aparente e massa específica real para as britas 3/4” de cada uma das jazidas estudadas.....	105
Tabela 4.9 – Resultado dos ensaios de absorção, massa específica aparente e massa específica real para as britas 3/8” de cada uma das jazidas estudadas.....	106
Tabela 4.10 – Valores da massa específica do pó de pedra por meio do frasco de Chapman	107
Tabela 4.11 - Avaliação da forma das partículas dos agregados pelo método do paquímetro, método com uso de crivos, pela placa de lamelaridade e pelo SUPERPAVE 5:1.....	109
Tabela 4.12 - Porcentagem de partículas planas, alongadas, planas e alongadas, não planas ou alongadas - Proporção 3:1	109
Tabela 4.13 - Porcentagem de partículas planas, alongadas, planas e alongadas, não planas ou alongadas - Proporção 5:1	110
Tabela 4.14 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida PIN	111
Tabela 4.15 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida DPA	112
Tabela 4.16 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida COM	113
Tabela 4.17 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida SUL	114
Tabela 4.18 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida PAI.....	115
Tabela 4.19 – Classificação dos agregados avaliados, valores propostos por Al Rousan..	121
Tabela 4.20 – Classificação dos agregados avaliados, valores do software do equipamento	121
Tabela 4.21 –Resultados encontrados após ensaio de sanidade com uso de solução de sulfato de sódio.....	123
Tabela 4.22 – Limites especificados para perda de material após realização de ensaio de durabilidade em ciclos de molhagem e secagem com aplicação de solução de sulfato de sódio.....	124
Tabela 4.23 – Resultado dos ensaios de caracterização para as britas tamanho 3/8 de cada uma das jazidas estudadas.....	124

Tabela 4.24 – Valores especificados para o ensaio de perda de massa por esmagamento.	125
Tabela 4.25 –Valores especificados para o ensaio de desgaste por atrito com uso do aparelho para Abrasão Los Angeles.	126
Tabela 4.26 – Resultado dos ensaios de caracterização para as britas tamanho 3/8 de cada uma das jazidas estudadas.....	127
Tabela 4.27 – Aderência obtida após ensaio de adesividade para cada jazida.....	131
Tabela4.28 –Valores obtidos a partir do ensaio de equivalente areia e seus limites especificados segundo sua aplicação pelos órgãos fiscalizadores	133
Tabela 4.29 – Absorção e massa específica aparente dos agregados	134
Tabela 4.30 – Diversos métodos de avaliação da forma dos agregados.....	136
Tabela 4.31 – Correlações com o parâmetro Índice de Compressão Pontual Seca (Isec) .	138
Tabela 4.32 – Correlações com o parâmetro perda por Esmagamento	141
Tabela 4.33 – Correlações com o parâmetro perda por Abrasão Los Angeles	144
Tabela 4.34 – Correlações com o parâmetro perda por choque com uso do Treton	146
Tabela 4.35 – Correlações com o parâmetro ensaio de Sanidade	148

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1-	Determinação do número de partículas.....	63
Equação 3.2-	Índice de forma com uso do paquímetro.....	64
Equação 3.3-	Detreminação da forma 2D pelo AIMS.....	68
Equação 3.4-	Determinação da esfericidade pelo AIMS.....	68
Equação 3.5-	Determinação da angularidade pelo AIMS.....	69
Equação 3.6-	Determinação da textura superficial pelo AIMS.....	70
Equação 3.7-	Cálculo do achatamento	71
Equação 3.8-	Cálculo do alongamento.....	72
Equação 3.9-	Cálculo das partículas achatadas e longas.....	72
Equação3.10-	Detreminação da massa específica aparente.....	73
Equação3.11-	Determinação da massa específica real.....	73
Equação3.12-	Determinação da absorção do agregado.....	74
Equação3.13-	Determinação da massa unitária.....	76
Equação3.14-	Detreminação da perda de massa por abrasão.....	77
Equação3.15-	Detreminação a resistência ao choque no aparelho Treton.....	78
Equação3.16-	Detreminação da resistência ao esmagamento.....	80
Equação3.17-	Índice de resistência para fragmentos de rochas.....	83
Equação3.18-	Fator de correção do tamanho.....	83
Equação3.19-	Cálculo do diâmetro equivalente.....	83

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abs	Absorção
AGI	American Geosciences Institute
AIMS	Aggregate Imaging Measurement System
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregado para Construção Civil
ASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
COM	Compasul
COT	Cotrel
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
DPA	Della Pasqua
ESGR	Escudo Sul-Rio-Grandense
ISRM	Internacional Society for Rock Mechanics
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MEA	Massa Específica Aparente
MER	Massa Específica Real
MU	Massa Unitária
NBR	Norma Brasileira
PAI	Paim
PIN	Pinhal
RAL	Relatório Anual de Lavra
SUL	Sultepa
SHRP	Strategic Highway Research Program
TMN	Tamanho Médio Nominal
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	3
DEDICATÓRIA.....	4
AGRADECIMENTOS	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE EQUAÇÕES.....	13
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. OBJETIVOS	21
1.1.1. Objetivo geral	21
1.1.2. Objetivos específicos.....	21
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. JAZIDA.....	23
2.1.1. Tipos de lavra.....	23
2.1.2. Escolha do método de lavra de uma jazida.....	24
2.2. AGREGADOS.....	25
2.2.1. Britagem de rochas.....	26
2.2.2. Classificação dos agregados.....	31
2.3. TIPOS DE ROCHAS NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS.....	32
2.3.1. Rochas ígneas.....	33
2.3.2. Rochas sedimentares.....	36
2.3.3. Rochas metamórficas	38
2.4. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DO RIO GRANDE DO SUL	39
2.4.1. Planalto Meridional	40
2.4.2. Depressão Central.....	42
2.5. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS MATERIAIS ROCHOSOS.....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1. IDENTIFICAÇÃO E COLETA DE AMOSTRAS EM JAZIDAS DE ROCHA	51
3.2. ENSAIOS LABORATORIAIS.....	57

3.2.1. Análise petrográfica	57
3.2.2. Granulometria	60
3.2.3. Forma das partículas	61
3.2.3.1 Índice de Forma (IF)	62
3.2.3.2 Lameralidade	64
3.2.3.3 Avaliação das Partículas Achatadas e Alongadas (Metodologia SUPERPAVE).....	65
3.2.3.4 Aggregate Image Measurement System (AIMS)	66
3.2.4. Índices Físicos	73
3.2.5. Resistência	76
3.2.5.1 Abrasão Los Angeles	76
3.2.5.2 Perda ao choque no aparelho Treton	78
3.2.5.3 Esmagamento	79
3.2.5.4 Carga Pontual.....	81
3.2.6. Alterabilidade	83
3.2.7. Equivalente de areia	85
3.2.8. Adesividade	85
3.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	86
4. RESULTADOS E ANÁLISES	87
4.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA	87
4.1.1. Jazida Pinhal (PIN)	87
4.1.2. Jazida Compasul (COM)	89
4.1.3. Jazida Della Pasqua (DPA)	91
4.1.4. Jazida Sultepa (SUL)	92
4.1.5. Jazida Paim (PAI)	94
4.1.6. Jazida Cotrel (COT)	95
4.2. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	98
4.3. ÍNDICES FÍSICOS.....	105
4.4. FORMA DAS PARTÍCULAS	107
4.5. DURABILIDADE AO EMPREGO DE SOLUÇÃO DE SULFATO DE SÓDIO	123
4.6. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	124
4.7. COMPRESSÃO PUNTIFORME (UNIAXIAL).....	127
4.8. ADESIVIDADE	131
4.9. EQUIVALENTE AREIA.....	133

4.10. CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS OBTIDOS DOS ENSAIOS REALIZADOS	134
4.10.1. Absorção e Massa Específica	134
4.10.2. Métodos de Determinação da Forma do Agregado	136
4.10.3. Compressão Pontual	138
4.10.4. Perda por Esmagamento	141
4.10.5. Perda por Abrasão Los Angeles	144
4.10.6. Perda por Choque Treton	146
4.10.7. Ensaio de Sanidade	148
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	150
5.1. CONCLUSÕES	150
5.2. SUGESTÕES	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156

1. INTRODUÇÃO

A engenharia civil passa por etapas antes de atingir o produto final a ser entregue ao usuário. Os principais estágios são projeto e execução e na fase de projeto que assuntos referentes a materiais são definidos, tais como localização, métodos, alternativas, esforços, tipos de usuários, orçamento e outros. No caso das obras de infraestrutura, a localização das pedreiras torna-se importante por se tratar de obras, na maioria das vezes, extensas onde a distância ao lugar do fornecimento de materiais irá influenciar de forma significativa nos custos com transporte. Além disso, com o avanço e aperfeiçoamento da tecnologia, a rapidez se faz necessária para a competitividade. Nesse contexto a avaliação de um conjunto de fornecedores e posterior identificação do melhor percurso para obtenção de materiais a serem utilizados, torna-se uma ferramenta atrativa para redução dos valores no orçamento.

Nas obras de pavimentação, inicialmente não houve interesse pelo estudo detalhado dos materiais constituintes do pavimento. O importante era a abertura de um canal de passagem limpa que proporcionasse acesso aos principais pontos de povoamento. Em seguida com o surgimento de transportes mais eficazes, houve uma melhoria na camada que tinha contato direto com as rodas cuja finalidade era promover conforto aos passageiros e carga.

A partir daí, o aumento da população e do número de veículos, o aparecimento de transporte de cargas pesadas, o surgimento cada vez mais frequente da degradação das estradas e o elevado custo para implantação de novos pavimentos, fez surgir a dedicação ao estudo do comportamento dos materiais das camadas do pavimento.

As camadas do pavimento tem a função de receber as tensões impostas pelo tráfego e distribuí-las ao solo de fundação de forma que as deformações causadas sejam mínimas. Para isso, elas devem ser compostas por materiais que possuam capacidade de suportar os esforços a que são submetidos e possuir elevada resistência ao desgaste abrasivo aumentando, assim, a vida útil da via. Dentro do conjunto de materiais que compõem uma obra rodoviária, se destaca o uso de agregados por ser o material que possui maior proporção de volume na composição da estrutura.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral todas as unidades da federação do Brasil, são produtoras de brita e cascalho, com exceção do Acre que importa de estados vizinhos a brita para seu consumo. Porém de acordo com a obtenção de dados indiretos a partir do consumo de cimento extraídos dos relatórios anuais de lavra (RAL), acredita-se que a produção contabilizada de agregado está muito aquém do total produzido em todas as regiões.

Dados do Serviço Geológico Americano (United States Geological Survey - USGS), o consumo anual de bens mineral por habitante nos EUA, em 2000, foi da ordem de 10.000 kg. Deste total, 5.700 kg foram de rocha britada e 4.300 kg de areia e cascalho. Considerando-se que parte da rocha britada foi usada com fins industriais – cimento, cal, indústria química e metalurgia – o total de agregados para construção civil que cada americano consumiu em média ultrapassa 7.500 kg. Ou seja, 75% do consumo médio americano de bens minerais foram de agregados para construção civil. Ainda dados mostraram que no século passado a produção total de agregados nos Estados Unidos aumentou de 58 milhões de toneladas em 1900 para 2,76 bilhões de toneladas em 2000. Observa-se ainda, segundo o balanço mineral brasileiro que países industrializados, como o Canadá, segue o mesmo ritmo de consumo dos EUA.

O Instituto Brasileiro de Mineração mostra que o consumo per capita brasileiro evoluiu de 3,3 toneladas de agregados por habitante/ano em 2010 para 3,5 t/hab. em 2011, ou seja, um incremento de 6%. Comparativamente aos países desenvolvidos, o Brasil está muito distante do valor médio de sete toneladas por habitante/ano.

O consumo de agregados por regiões no Brasil fornecido pela Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregado para Construção Civil (ANEPAC) no ano de 2014 foi de 52,7 milhões de toneladas no Norte; 154,3 milhões de toneladas no Nordeste; 67,5 milhões de toneladas no Centro-Oeste; 347 milhões de toneladas no Sudeste e 119,5 milhões de toneladas no Sul. No total o consumo brasileiro de agregado em 2014 foi de 741 milhões de toneladas, correspondente a 3,7 toneladas per capita.

Ainda segundo a ANEPAC, a produção mineral global no ano de 2014 foi de 65 bilhões de toneladas, sendo que desse total, os agregados ficaram com 45 bilhões de toneladas. O continente que mais produziu agregado nesse mesmo ano

foi a Ásia com 66% da produção global e o que menos produziu foi a América Latina com 5% da produção global.

O consumo de agregado por obra de engenharia é distribuído em:

- 9,8 mil toneladas para cada km construído de estrada pavimentada;
- 50 mil toneladas para cada km construído de uma linha do metrô;
- 3 mil toneladas para cada km de manutenção de estrada;
- 2 mil toneladas para cada km construído de pavimentação urbana;
- 1,4 mil toneladas para cada 1.000 m² em edifícios;
- 68 toneladas por 50 m² de casas populares.

Sabendo da participação dos agregados nos diversos tipos de construção civil, junto aos ensaios de caracterização e resistência que são realizados nos materiais constituintes de uma obra a ser executada, o controle tecnológico de agregados para uso em obras de engenharia vem se aperfeiçoando com o avanço das ciências dos materiais e melhor acesso a tecnologias, principalmente porque trabalhar com materiais rochosos é trabalhar com material heterogêneo extraídos dos mais variados perfis geotécnicos com diferentes características. Esses materiais devem apresentar bom desempenho em serviço e para isso necessitam ser ensaiados, avaliados e classificados como apropriados, ou não, ao uso onde serão aplicados.

Dessa forma, considerando a participação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) no Projeto da Rede Temática de Asfalto patrocinado pela empresa Petróleo Brasileiro Sociedade Anônima (PETROBRÁS), cujo objetivo principal é conhecer melhor os materiais empregados e seu desempenho nos pavimentos nas diversas regiões do Brasil para servir de apoio a pesquisas de desenvolvimento de métodos próprios segundo o emprego de materiais e condições ambientais nacionais, esta pesquisa busca levantar parâmetros que possam ser utilizados para na pavimentação asfáltica.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é caracterizar e avaliar as propriedades geomecânicas de rochas magmáticas da região central do Estado do Rio Grande do Sul utilizadas como agregado em obras rodoviárias.

1.1.2. Objetivos específicos

O presente trabalho teve como objetivos específicos:

- Localizar pedreiras com potencial uso em obras de pavimentação;
- Realizar ensaios para determinação das propriedades tecnológicas dos materiais coletados;
- Avaliar os resultados obtidos e classificar o material analisado.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é constituído de cinco capítulos onde:

O Capítulo 1 apresenta uma introdução sobre o mercado consumidor de agregados e a importância de se verificar a qualidade de suas propriedades.

O Capítulo 2 descreve conceitos de modos de extração e produção dos agregados. Também introduz a classificação dos agregados de acordo com seu tamanho, textura, natureza e graduação. Ainda no decorrer do capítulo são apresentados os três tipos de rochas formadoras de perfis geotécnicos, as unidades geológicas do Estado onde foram coletadas as amostras e por fim são discutidas as principais propriedades tecnológicas aplicadas em rochas utilizadas em obras de engenharia.

No Capítulo 3 são descritos os locais de coleta dos materiais estudados bem como os métodos adotados para desenvolvimento da pesquisa e são apresentadas as normas consultadas para realização dos ensaios.

O Capítulo 4 fala sobre os resultados obtidos para os índices estudados: índices físicos, resistência mecânica, durabilidade, resistência a compressão, análise da presença de materiais mais fino e é feita uma correlação entre esses parâmetros.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões sobre o estudo e identificadas às propriedades que foram ou não satisfeitas de acordo com as especificações para aplicação dos agregados segundo os tipos de obras a serem executadas. Além disso, diante de questionamentos surgidos durante a fase de compilação dos resultados, são sugeridos complementos a serem executados para aperfeiçoamento das propriedades dos agregados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. JAZIDA

Considera-se jazida toda massa individualizada de substância mineral ou fóssil de valor econômico, aflorando a superfície ou existente no interior da terra (BRASIL, 1968). A procura de ocorrências naturais para extração de materiais utilizados na construção civil constitui uma das etapas para realização de obras de grande valor econômico.

Após identificação de uma jazida por meio da investigação em mapas topográficos, geológicos e estudo do local com potencial à extração (lavra) do material por meio de sondagens, ocorre à instalação dos fornecedores com as pedreiras e areais. Esses fornecedores irão extrair da jazida o material que posteriormente será comercializado.

2.1.1. Tipos de lavra

A lavra inclui o desmonte do maciço rochoso, o carregamento e o transporte do material para usina de beneficiamento (CAVALCANTE E PARAHYBA, 2012).

Segundo o Instituto Americano de Geociências (American Geosciences Institute – AGI) há quatro métodos principais de extração de materiais em minas: a céu aberto, subterrânea, garimpagem e in-situ.

O Ministério das Minas e Energia fornece as seguintes definições para os tipos de lavras mais praticados no Brasil:

- A céu aberto – método de bancos em cava ou encostas dependentes das condições topográficas do terreno, onde a profundidade máxima da cava dependerá diretamente do teor e da relação estéril/minério, como também, as dimensões das plataformas de trabalho dependerão da produção e da conveniência dos equipamentos, a massa mineral que encontra-se na superfície é separada da camada não utilizável (estéril) e normalmente é extraída em grandes quantidades;

- Subterrânea – lavra desenvolvida no subsolo em função de dois condicionantes, um é a geometria do corpo (inclinação e espessura) e o outro são as características de resistência e estabilidade dos maciços que constituem o minério e suas encaixantes. As variações do método ocorrem sob a forma de abertura de poços, túneis e galerias nos maciços ou a aplicação de técnicas mais sofisticadas como realce autoportantes (câmaras e pilares);
- Garimpagem – a garimpagem pode ser manual onde o processo se dá pela lavagem de cascalho com o auxílio de equipamentos artesanais e ferramentas manuais para separação da parte estéril; e garimpagem mecânica por meio do desmorte hidráulico onde um jato d'água de alta pressão levado por mangueiras e direcionado na base do talude da frente de lavra provoca um desmoronamento controlado e a movimentação por gravidade do material sendo acumulado num ponto de concentração da polpa formada;
- Dragagem – consiste na utilização de dragas que trabalham nos leitos dos rios, onde a lavra é executada preferencialmente contra corrente e normalmente requer o represamento do curso d'água para proporcionar condições operacionais à draga. A grande vantagem desse método consiste em reunir quatro operações em uma única, pois a draga desmonta, carrega o material, transporta e beneficia numa única operação, permitindo a viabilidade econômica da jazida. Geralmente são utilizadas as chamadas dragas de sucção.

O tipo de lavra in-situ é utilizada para a mineração de urânio e consiste na dissolução do mineral no local, em seguida, processando-o na superfície sem que haja a remoção do maciço superficial (AGI, 2016).

2.1.2. Escolha do método de lavra de uma jazida

Para a extração de uma substância mineral do maciço em que ela se encontra é possível à aplicação de um método ou mais de um método simultaneamente, a escolha da melhor alternativa dependerá de vários fatores

associados tanto ao relevo e minério quanto aos custos, sendo assim, cabe aos profissionais a realização de um estudo preliminar multidisciplinar para posterior escolha do melhor método.

Características físicas e mecânicas do depósito, tais como as condições do maciço do minério, a espessura de minério, a forma geral, a profundidade abaixo da superfície, a qualidade dos recursos devem ser consideradas. Os componentes básicos que definem as condições do solo são: material rochoso com resistência ao cisalhamento, fraturas naturais e descontinuidades, orientação, comprimento, espaçamento e localização de grandes estruturas geológicas, condições hidrológicas, etc. (BITARAFAN, 2004).

Feitas as considerações dos aspectos técnicos envolvidos no processo de seleção do método de lavra, onde geralmente, mais de um é possível para se proceder à extração do material, realiza-se a análise de critérios econômicos e financeiros. A importância destes é fundamental na escolha do método visto que o mais adequado é aquele que apresente o menor custo unitário. Deve também ser considerada a situação financeira da empresa, tendo em vista a necessidade de grande inversão de capital numa atividade reconhecidamente sujeita a riscos elevados (MACÊDO, 2001). Considerados todos os requisitos que satisfaçam a exploração da jazida, procede-se com o beneficiamento da rocha para obtenção do agregado.

2.2. AGREGADOS

Agregado é um material granular utilizado na fabricação de concreto, de origem natural, artificial ou reciclado, com dimensões e formas apropriadas para uso em obras de engenharia (LAMAS, 2012). A obtenção do agregado se dá pelo processo de britagem que pode ser realizado por diferentes equipamentos, conforme se verifica a seguir.

2.2.1. Britagem de rochas

Brita pode ser definida como um conjunto de rochas trituradas artificialmente e reduzidas a grãos com dimensões e características estabelecidas em normas para utilização na construção civil. O uso da brita está presente em concretos, argamassas, pavimentos, lastros ferroviários e outros.

A extração do material que irá compor uma pilha de brita se dá por meio da lavra de um maciço rochoso. Os métodos mais usuais de lavra de maciços são em bancadas ou em paredão. A lavra em bancadas necessita de uma maior área para construção de vias de acesso aos diferentes níveis de avanço do desmonte. No entanto possibilita o uso de perfuratrizes de carreta e de explosivos de maior eficiência, tendo como resultado um material mais uniforme, podendo ser tanto em encosta quanto em cava. A lavra em paredão dificulta a mecanização do desmonte, sendo utilizadas perfuratrizes manuais e explosivos de menor eficiência, resultando em material menos homogêneo (CAVALCANTE e PARAHYBA, 2012).

A lavra de brita é feita a céu aberto, em meia encosta, e as operações se iniciam com a execução do plano de fogo para desmonte primário (perfuração + detonação por explosivos), que fragmenta cada trecho das bancadas da frente de lavra (CUCHIERATO, 2000).

As pedreiras que pertencem a empresas legalizadas, na etapa inicial do desmonte, é indispensável que a cobertura ou capeamento de solo seja removido. O mesmo procedimento deve ser feito para as rochas alteradas e impróprias para uso, existentes na cobertura das futuras frentes de lavra, para que este material não contamine a rocha sã a ser britada. Para realizar este trabalho normalmente são utilizados tratores de esteira e lâmina, de 20 a 35 t e pás carregadeiras. Esse material estéril pode ser utilizado em parte para obras de aterro de estradas. A relação entre o volume estéril e o de minério é um dos fatores determinantes na viabilidade de aproveitamento econômico de uma jazida para produção de brita (MONASTIER, 2004).

Após a etapa de remoção de solo, é elaborado um projeto de desmonte, dotado de um plano de fogo onde consta a previsão de perfuração da rocha e uso de explosivos. Este projeto deve ser elaborado por profissional habilitado, com especificações da quantidade de furos, posição de cada um, profundidade,

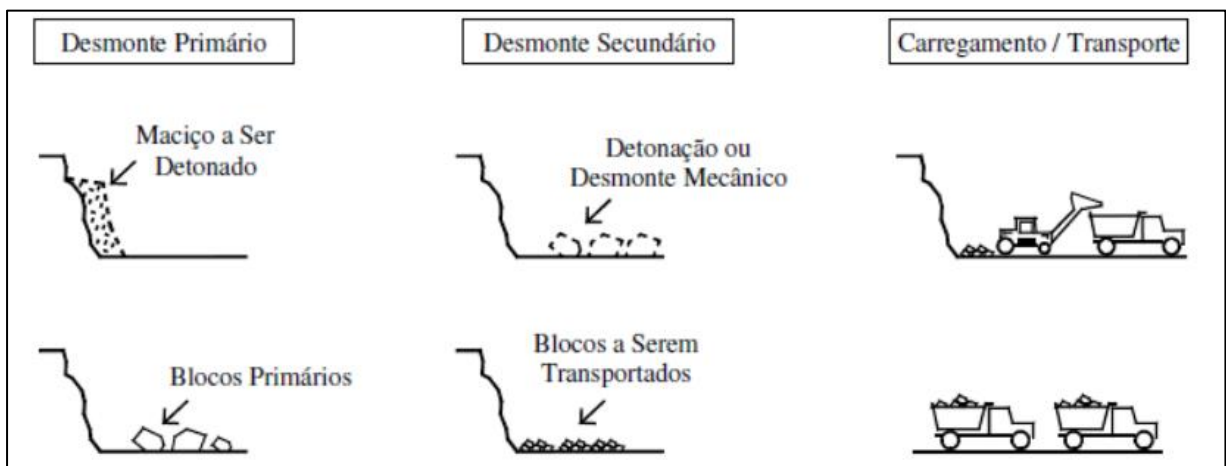
distâncias da face da bancada e entre eles, bem como a quantidade de explosivo necessária a ser colocada em cada furo (MONASTIER, 2004).

Se for feito um furo no meio de um maciço e promover a sua detonação, não haverá desmonte algum, apenas fraturamento da rocha. Para haver desmonte é necessário que haja uma superfície livre próxima. Desta forma, os furos são feitos a uma distância conveniente da parede da bancada (ALMEIDA E LUZ, 2009).

Na etapa de desmonte primário, via detonação, são originados os blocos de tamanhos maiores, também chamados blocos primários (dimensões maiores que um metro). Esses blocos são, então, reduzidos de tamanho na etapa de desmonte secundário, originando os chamados blocos secundários de tamanho que permita carregamento, transporte e alimentação do britador primário. O desmonte secundário pode dar-se por detonação ou por meio mecânico, dependendo do tamanho do bloco e da capacidade da empresa de contar com equipamento adequado (RUSSO, 2011).

Em seguida, efetua-se o carregamento dos fragmentos rochosos com pás carregadeiras em caminhões, Figura 2.1, que depositam o material em locais junto às instalações de britagem, conhecidos como praças de alimentação (ou planta de britagem) para armazenagem temporária e alimentação dos britadores ou transporte direto aos britadores primários (CUCHIERATO, 2000).

Figura 2. 1 – Produção de agregados – Desmonte, carregamento e transporte

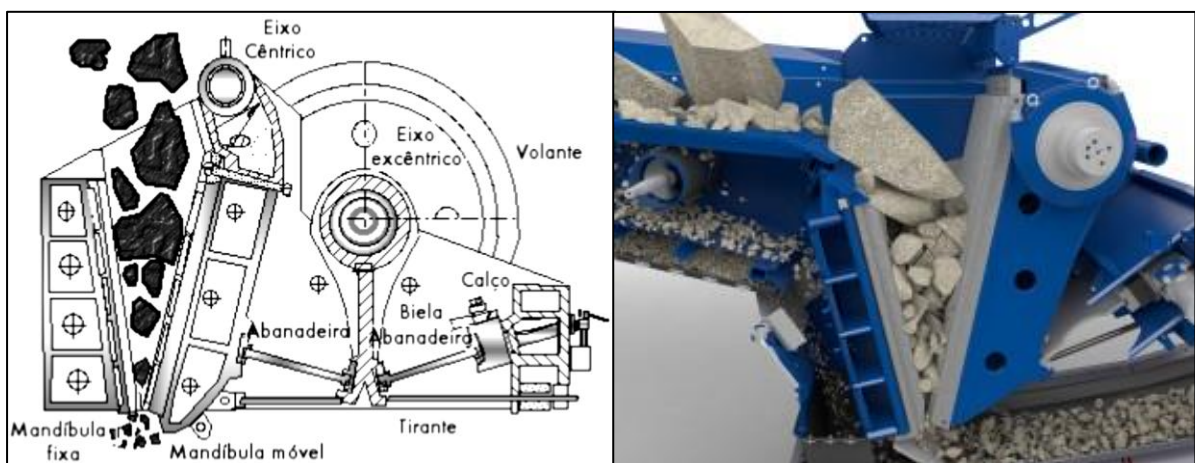


Na maioria dos empreendimentos, a usina de beneficiamento localiza-se dentro dos limites da mesma propriedade, ou seja, muito próximo da frente de lavra, com distâncias da ordem de 500 m. Deste modo esse transporte interno entre a jazida e o beneficiamento, é feito por acessos privados, que geralmente são utilizados apenas pelos caminhões da própria empresa, ou eventualmente por empresas terceirizadas (MONASTIER, 2004).

Boyd diz que objetivo fundamental de uma planta de britagem é uma instalação que atenda aos requisitos de produção necessários, opere a um custo competitivo e em conformidade com as regulamentações ambientais, e possa ser construída a um preço razoável levando em conta custos como os gastos em equipamentos e energia, por exemplo.

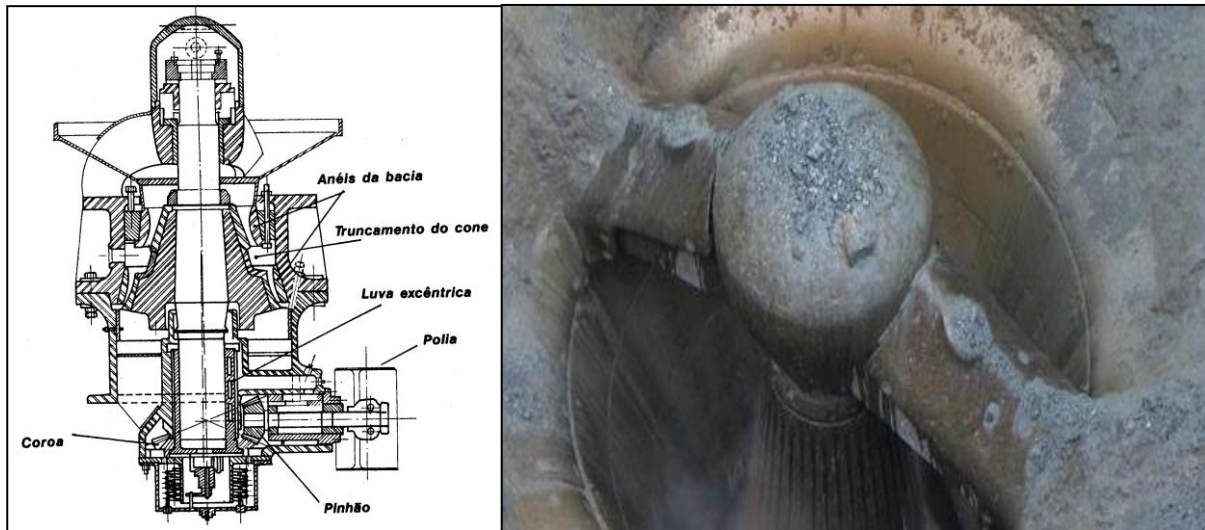
A britagem primária é a primeira operação em planta de cominuição. O propósito da mesma é unicamente a redução do tamanho. De modo geral, podem ser usados britadores de mandíbula (para pequenas e médias capacidades) como representado na Figura 2.2, ou britadores giratórios (médias e grandes capacidades) semelhante ao da Figura 2.3. O britador de mandíbulas é mais usado na britagem primária de plantas de produção de agregados no Brasil (RUSSO, 2011).

Figura 2. 2 – Britador de mandíbula



Fonte: (Russo, 2011 e Imagens e KLEEMANN, 2017)

Figura 2. 3 – Britador giratório: perfil e vista de topo



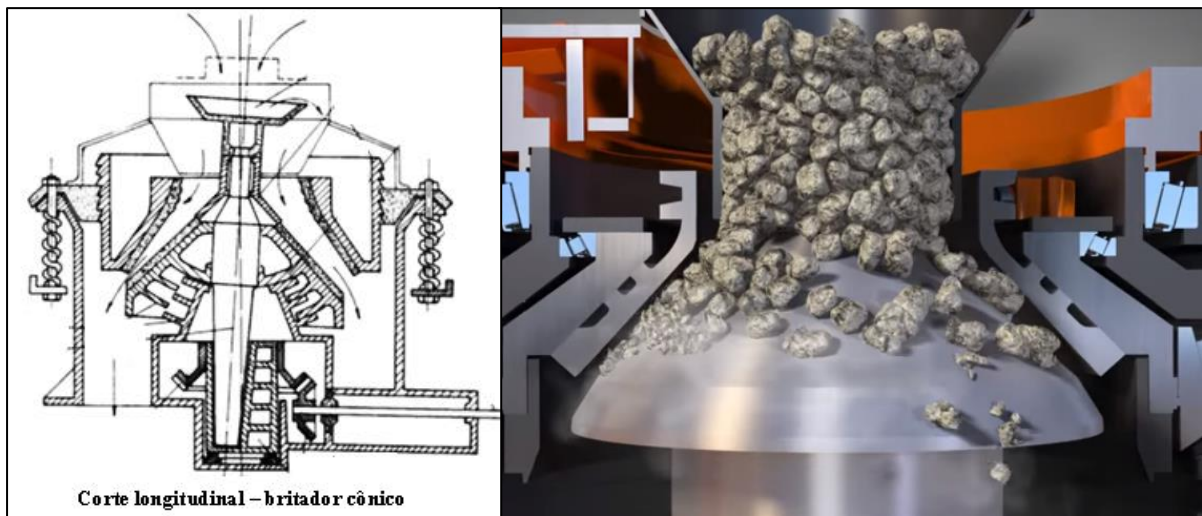
Fonte: (Almeida *et al.*, 2010 e METSO, 2016)

O material da britagem primária pode ou não ser lavado com a finalidade de retirar possíveis impurezas orgânicas vindas da frente de lavra junto com os blocos ou promover a exclusão do pó que caso necessário posteriormente pode ser produzido com a continuação da britagem. Muitas vezes ocorre o reaproveitamento do material residual da britagem primária sendo vendido como brita corrida sem nenhuma classificação.

Após a fragmentação no britador primário, há formação de pilhas pulmão, que alimentam os britadores secundários. O britador secundário pode ser de mandíbulas ou do tipo cônico (CUCHIERATO, 2000), porém normalmente são usados britadores cônicos.

Os britadores terciário e quaternário são do tipo cônico (FIGURA 2.4) ou de impacto, sendo usualmente usados na tentativa de reduzir a lamelaridade do agregado e a produção de finos (CUCHIERATO, 2000).

Figura 2. 4 – Britador tipo cônico



Fonte: (Almeida *et al.*, 2010 e CRUSHFORCE, 2017)

A classificação final do produto da rebitagem é realizada pelo conjunto de peneiras vibratórias, composto por uma ou mais peneiras. Cada peneira, que é uma tela, de arame ou borracha, retém ou deixa passar a brita. A brita que passa por uma peneira é a que será estocada. A brita retida é devolvida ao britador de forma sucessiva até que se obtenha o produto na granulometria desejada. A brita que passou na peneira é conduzida para formação da pilha final do produto (CAVALCANTI E PARAHYBA, 2012).

O transporte da rocha fragmentada entre os britadores e as unidades de classificação, normalmente é feito através de um sistema de correias transportadoras. Durante o processo de cominuição os fragmentos vão sendo sistematicamente selecionados por tamanho, mas como uma última operação, é feita a classificação do material, onde a brita é levada por correias transportadoras até os silos individuais ou depósitos para ser estocada e posteriormente ser carregada em caminhões para a entrega ao consumidor (MONASTIER, 2004).

No Brasil, a exploração de areia natural em várzeas e leitos de rio vem sofrendo restrições das agências de meio ambiente, principalmente em metropolitanas. A obtenção de areia artificial (ou areia de brita), com distribuição granulométrica e fator de forma próximo das areias naturais, usadas como agregado

na construção civil tem sido estudada, pelo CETEM, em usina piloto e os resultados positivos encorajaram a implantação de unidades industriais, em algumas pedreiras (LUZ, FRANÇA E SAMPAIO, 2010).

2.2.2. Classificação dos agregados

Embora seja utilizado o termo inerte para se referir aos agregados, sabe-se que as partículas de rocha não são realmente inativas, na medida em que suas propriedades físicas, térmicas e por vezes químicas afetam o desempenho de concretos fabricados com elas, ou seja, as partículas de agregado podem, em certas condições reagir com o concreto (COUTINHO, 1999 apud LAMAS, 2012).

Conforme o manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT (2006), os agregados podem ser classificados de acordo com:

- a) Tamanho: graúdo, miúdo e de enchimento;
- b) Natureza: natural e artificial;
- c) Graduação: denso, aberto e tipo macadame;
- d) Microtextura, porosidade, resistência e forma.

Os agregados naturais são formados por grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo e produzidos por processos de britagem: pedregulho, os seixos, britas, areais, etc.

Os agregados artificiais necessitam uma transformação física e química do material natural para sua utilização, como a escória de alto forno e a argila expandida.

O agregado graúdo corresponde ao material que fica retido na peneira nº 10 (2,0 mm), por exemplo, as britas, cascalhos e seixos.

Agregado miúdo é o material passante na peneira com abertura de 2,0 mm ficando retido com abertura de 0,075 mm: pó de pedra e areia são exemplos.

O agregado de enchimento, denominado filler, é aquele que passa pelo menos 65% na peneira com abertura de 0,075 mm e estão nesse grupo a cal extinta, o cimento Portland e o pó de chaminé.

Os agregados graúdo, miúdo e material de enchimento são não plásticos e inertes em relação aos demais componentes de uma mistura de agregados.

O agregado de graduação densa apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

O agregado de graduação aberta é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino para preencher os vazios entre as partículas maiores.

O tipo macadame é o agregado que possui partículas de um único tamanho, chamado “one size aggregate”. É um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo.

Diversos tipos de rochas são utilizados como agregados e dependendo de sua origem, elas podem ser classificadas e divididas em grupos. A seguir é apresentada uma breve descrição sobre os principais tipos litológicos aplicados na construção civil.

2.3. TIPOS DE ROCHAS NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS

A superfície terrestre encontra-se em processo de modificação, ela não é um corpo totalmente rígido e estático. O planeta Terra está sofre influência de forças que ora contribuem para a formação de novas rochas – como a ação interna do magma, ora modelam rochas formadas no passado.

O movimento existente na superfície da terra altera a paisagem por meio de processos de erosão, ação do vento, percolação da água no interior das fraturas das rochas, congelamento do solo durante o inverno, atividades dos animais e outros.

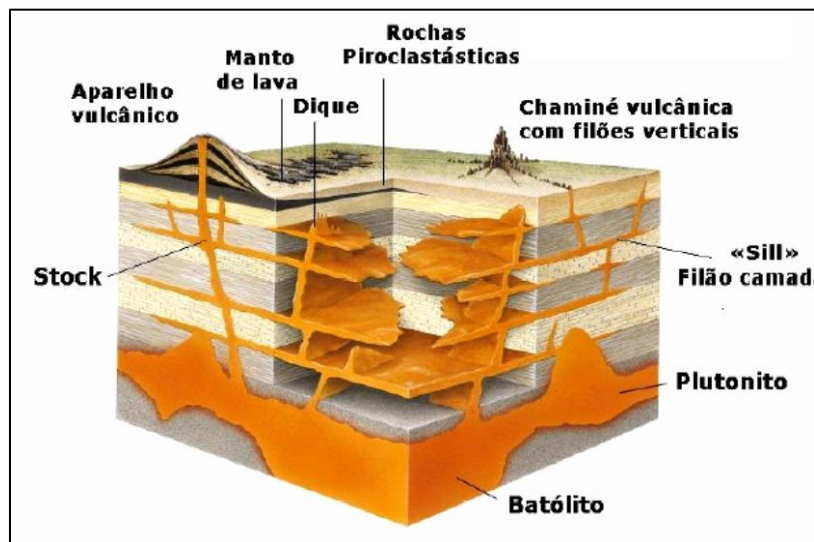
O resultado dessa modificação é a formação de um material não consolidado denominado solo. É abaixo do solo que se encontram as formações rochosas, materiais sólidos que possuem em sua composição minerais constituídos por diferentes arranjos cristalinos e combinações químicas. Rochedos, morros e algumas ilhas tratam-se de afloramentos de rochas que já estão sob a ação das intempéries externas.

De acordo com sua gênese, as rochas podem ser divididas em três tipos: ígneas, sedimentares e metamórficas.

2.3.1. Rochas ígneas

As rochas ígneas ou magmáticas originam-se por resfriamento e solidificação de magmas sob altas temperaturas – 700 a 1.200 °C. A solidificação do magma ocorre na superfície da litosfera, formando rochas vulcânicas ou extrusivas, ou em regiões mais profundas, formando rochas plutônicas ou intrusivas, constituindo cerca de 80% do volume da litosfera (BEST, 2003 apud LAMAS, 2012). Dependendo do local de cristalização do magma, podem ser formados *sills*, derrames entre outros conforme representado na Figura 2.5.

Figura 2. 5 – Estrutura de formações magmáticas



Fonte: (<http://www.geologia.ufpr.br/graduacao2/geologiageografia/rochasingeasmetamorficas.pdf>, 2016)

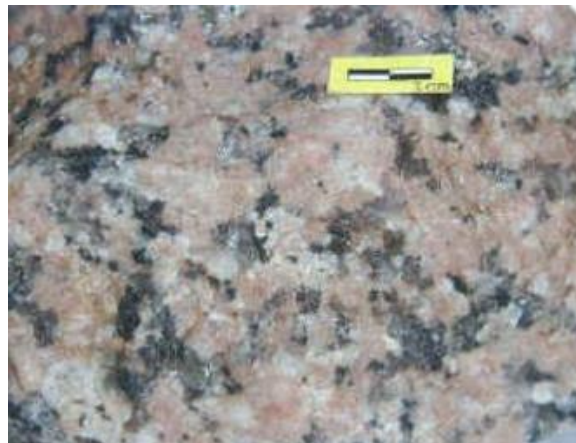
Parte do magma com baixa viscosidade pode penetrar entre planos de estratificação das unidades rochosas formando os chamados *sills*. O teto e o piso dos *sills* são constituídos por superfícies planas, paralelas entre si, formando na

maioria dos casos corpos tabulares. Frequentemente os *sills* se conectam através de finos diques formando *sills* mais espessos, sendo assim possuem espessuras variáveis possuindo de centímetros a metros de espessura (RENNER, 2010).

Em sequências sedimentares, os *sills* são facilmente confundidos com derrames devido às formas laminares de ambos os corpos. A distinção entre ambos é de grande importância, porque permite determinar a idade relativa da atividade ígnea, já que um derrame é contemporâneo com a sedimentação e o *sill* é posterior à sedimentação (RENNER, 2010).

As rochas intrusivas apresentam minerais de tamanho médio a muito grosseiro, com textura fanerítica onde, segundo Winter (2010), a maior parte de seus cristais é visível a olho nu exemplificado na Figura 2.6, indicando que o magma resfriou lentamente e os minerais tiveram tempo para se desenvolver. São destes tipos: granitos, sienitos, dioritos, gabros, peridotitos e piroxenitos (MACIEL FILHO E NUMMER, 2014).

Figura 2. 6 – Granito grosseiro rico em feldspato potássico



Fonte: (<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/magmaticos/granito.html>, 2015)

Quando o magma esfria a superfície da crosta, a temperatura e a pressão diminuem rapidamente - não sendo aprisionados voláteis, não existindo condições favoráveis à cristalização dos minerais, resultando em uma textura fina a muito fina denominada afanítica onde a maior parte de seus cristais não é visível a olho nu,

apresentado na Figura 2.7, (CARVALHO, 2002 apud LAMAS, 2012). Segundo Maciel Filho e Nummer, (2014) são destes tipos: riólitos, dacitos, andesitos, basaltos e vidro vulcânico.

Figura 2. 7 – Basalto com granulação fina



Fonte: (<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/magmaticos/basalto.html>, 2015)

A composição química é a característica mais marcante nas rochas ígneas e é expressa em % de óxidos, geralmente reflete a composição do magma, fornecendo informação sobre a origem das rochas. A composição do magma determina os minerais que cristalizam e as suas proporções. Desta forma as rochas podem ser classificadas com base no teor de sílica (SiO_2) que é uma dos principais óxidos constituintes destas e podem ser (BEST, 2003 apud LAMAS, 2012):

- Rochas ácidas com teor de $\text{SiO}_2 > 66\%$, como exemplo os granitos e riólitos;
- Rochas intermediárias com teor de SiO_2 variando de 52 a 66%, como exemplo os dacitos e andesitos;
- Rochas básicas com teor de SiO_2 variando de 45 a 52%, como exemplo os basaltos e gabros;
- Rochas ultra básicas com teor de $\text{SiO}_2 < 45\%$ com exemplo o serpentinito.

É importante distinguir corretamente o teor de sílica de uma rocha (que em regra está entre 40 e 75%) e o teor de quartzo (rara vez acima de 30%, quando não é nulo). A sílica SiO_2 é um componente químico presente em todos os minerais silicatados, ao passo que o quartzo (que tem a mesma composição, SiO_2) é um

mineral com uma composição e uma estrutura cristalina específicas. O quartzo representa o excesso de SiO_2 , isto é, o teor remanescente após todos os outros minerais silicatados terem sequestrado suas respectivas cotas de sílica disponíveis no líquido magmático (GILL, 2014).

As rochas ácidas dificilmente se alteram nas condições normais de uso, mesmo em meio aquoso. No que diz respeito às rochas básicas e ultrabásicas elas tendem a se alterar quando expostas às condições atmosféricas, podendo ocorrer desagregação mecânica ou decomposição em argilominerais, quase sempre expansivos (OLIVEIRA E BRITO, 1998).

Rochas ígneas, como o basalto e o granito, são muito utilizadas na construção civil para confecção de muros, meio-fio, pavimentação, tanto na forma de paralelepípedo como na forma irregular. São bastante utilizados como agregado, tanto para concreto hidráulico como betuminoso, pois originam uma brita de forma cúbica que tem elevada resistência à compressão e ao desgaste (MACIEL FILHO E NUMER, 2014).

2.3.2. Rochas sedimentares

As rochas sedimentares são resultantes da consolidação de sedimentos, ou, seja, partículas minerais provenientes, da desagregação e do transporte de rochas preexistentes, ou da precipitação química, ou ainda, de ação biogênica. Se formam então, em sua maioria a partir de processos que compõem o ciclo sedimentar, quais sejam: o intemperismo, a erosão, o transporte e a deposição e litificação (OLIVEIRA, 1998 apud Boeira, 2014).

Embora a sua representação na crosta terrestre seja baixa – 5% do seu volume, as rochas sedimentares cobrem uma extensa superfície, ocupando mais de 75% da sua área continental (LEAL, 2012).

Por serem formadas a partir da sobreposição de camadas, as rochas sedimentares apresentam planos de estratificação definidos como sendo planos de sedimentação e possuem a característica de planos de fraqueza da rocha influenciando no seu comportamento mecânico, Figura 2.8.

Figura 2. 8 – Amostra de folhelho, lâminas finas e paralelas



Fonte: (<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/index.html>, 2015)

Na composição mineralógica das rochas sedimentares, podem distinguir-se os minerais herdados e os minerais de neoformação. Os denominados minerais herdados provêm diretamente de rochas preexistentes, através de fenômenos de desagregação e transporte, sem terem sofrido qualquer alteração química. Estes minerais vão constituir as rochas sedimentares detríticas (formadas por material transportado e depositado). O quartzo, os feldspatos, as micas, a calcita são exemplos de minerais herdados (LEAL, 2012).

Os minerais de neoformação são minerais novos que se formam durante a sedimentogênese ou diagênese e que resultam da alteração química ou da precipitação de outros minerais. Exemplos de minerais de neoformação mais frequentes são a calcita, a dolomita, a sílica, os argilominerais, a halita e o gesso (BOGGS, 2009 apud LEAL, 2012). O mineral gipsita, geralmente, é encontrado em granulação fina a média, estratificada ou maciça, constituindo as denominadas rochas gipsíferas. Com o desenvolvimento da indústria cimenteira passou a ser utilizada junto com o clínquer para retardar o tempo de pega, além de ser intensamente utilizada na produção de gesso (SOBRINHO, 2001).

As rochas sedimentares, quando bem cimentadas, podem ser utilizadas para blocos de fundação, revestimento de calçadas e meio fios. Quando pouco cimentadas, as rochas sedimentares são facilmente intemperizadas e dão origem a depósitos de areia, pedregulhos e argilas. Esses materiais podem ser utilizados

como empréstimo para confecção de concreto, tijolos etc. (MACIEL FILHO E NUMMER, 2014).

2.3.3. Rochas metamórficas

Tanto as rochas ígneas como as sedimentares podem ser levadas por processos geológicos a condições diferentes daquelas nas quais se formou a rocha. Estas novas condições determinam a instabilidade dos minerais preexistentes, estáveis nas antigas condições em que foram formadas. Essas transformações foram impostas por condições adversas, que são temperatura, pressão, presença de agentes voláteis ou fortes atritos, adaptando assim a rocha, as novas condições. E estas adaptações é que dá origem a formação das diferentes rochas denominadas rochas metamórficas. Dependendo do caso, elas poderão ter sua composição mineralógica alterada, porém sua textura será modificada obrigatoriamente (BOEIRA, 2014).

As rochas metamórficas são resultantes de um processo de metamorfismo, depende essencialmente da sua composição original, das condições de pressão e temperatura e dos fluidos envolvidos, ou seja, rochas de composições mineralógicas diferentes (por exemplo, calcários, folhelhos, basaltos), elas poderão apresentar mineralogia diversa mesmo quando submetidas a ações metamórficas semelhantes (BOEIRA, 2014).

As rochas metamórficas dividem-se em um grupo com quartzo, feldspato, micas e minerais escuros aciculares, sendo a estrutura e a textura importantes para sua classificação e em outro grupo classificado de acordo com a composição de cada rocha (MACIEL FILHO E NUMMER, 2014).

Mármore, quartzitos e gnaisses são tipos de rochas metamórficas e são bastante utilizados como agregados. O xisto não é apropriado para esse uso por fornecer agregados lamelares, porém são empregados em revestimentos e paredes devido a sua beleza e brilho dados pela presença de micas (MACIEL FILHO E NUMMER, 2014).

A seguir, destaca-se as unidades geomorfológicas formadoras da região onde foram coletadas amostras de rochas e realizada a pesquisa dessa dissertação.

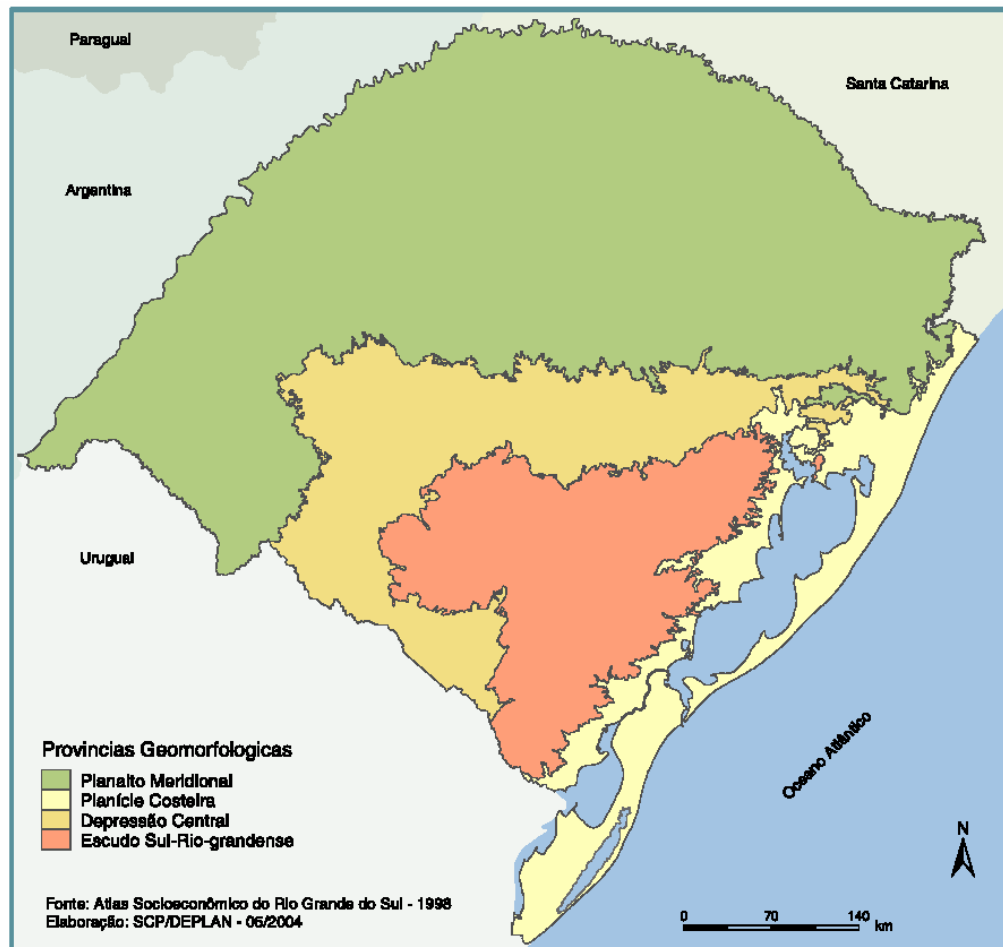
2.4. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DO RIO GRANDE DO SUL

O estado do Rio Grande do Sul é constituído por quatro domínios Geomorfológicos distintos. Do domínio mais antigo para o mais novo têm-se: o Escudo Sul-Rio-Grandense, a Depressão Central, o Planalto Meridional e a Planície Costeira, demonstradas conforme a Figura 2. 10. Nesta dissertação serão detalhadas a unidade geomorfológica Depressão Central, onde se localiza o município de Santa Maria e o Planalto Basáltico, região de onde provém o material rochoso analisado

Ao norte, encontra-se o Planalto Meridional ou Planalto de Derrames, formado por extenso platô de rochas basálticas e riódacíticas, com altitudes de até 1.378 m. A Depressão Periférica, situada no entorno da fralda do platô, apresenta relevo de coxilhas suaves e planícies fluviais. Esse domínio estende-se num estreito corredor em direção ao oeste, até a fronteira com o Uruguai, é composta por rochas sedimentares paleozoicas e mesozoicas da Bacia do Paraná, no qual são mais antigas do que as rochas do platô (MENEGAT *et al.*, 1998).

Na porção sudeste do estado encontra-se o Escudo Rio-Grandense, trata-se de um planalto formado por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. E na costa leste situa-se o domínio da Província Costeira, formada por um rosário de pequenas lagoas isoladas encravadas em depósitos arenosos (MENEGAT *et al.*, 1998).

Figura 2. 9 – Províncias Geomorfológicas do Rio Grande do Sul



Fonte: Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria da Coordenação e Planejamento – 2ª edição 2006).

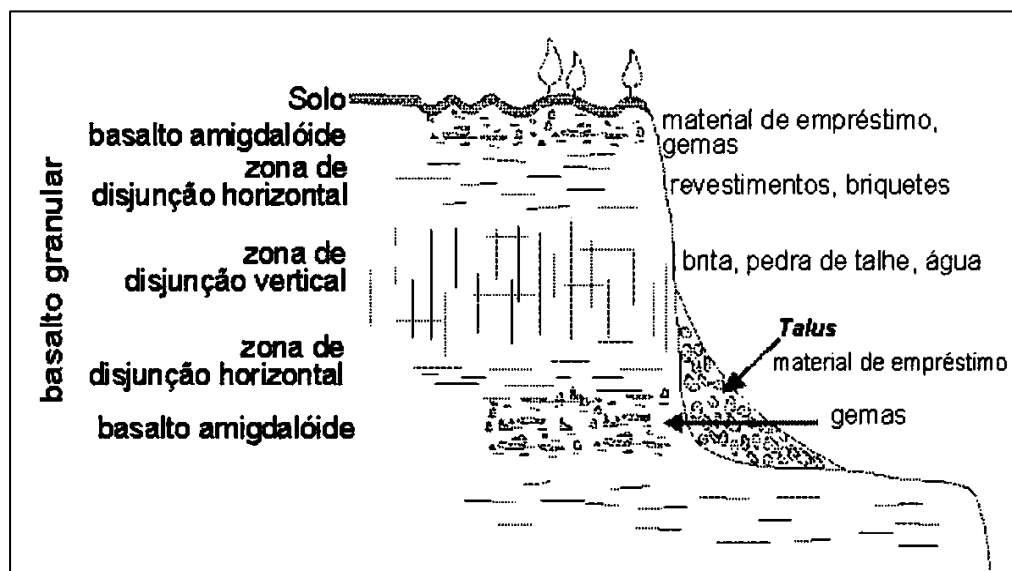
2.4.1. Planalto Meridional

Grande parte do Rio Grande do Sul foi recoberto pelo derrame basáltico conhecido como Trapp do Paraná e descrito como província Magmática do Brasil Meridional. Este derrame de lava basáltica ocupa toda a região do Planalto e parte da Campanha gaúcha e pertence à Formação Serra Geral, formada no Cretáceo Inferior pela deposição de vários derrames, sendo o material inferior rochas básicas e o superior rochas ácidas (MACIEL FILHO apud REINERT et al., 2007).

A região do Alto Uruguai, no norte do Rio Grande do Sul, apresenta uma seqüência de derrames basálticos da Formação Serra Geral constituída por 12 derrames formando um pacote de aproximadamente 20.000 km³ de rocha (MULOCHER, 2013).

A designação de Formação Serra Geral, refere-se à província magmática relacionada aos derrames e intrusivas que recobrem parte da Bacia do Paraná, abrangendo toda a região centro-sul do Brasil e estendendo-se ao longo das fronteiras do Paraguai, Uruguai e Argentina. Esta unidade está constituída predominantemente por basaltos e basalto-andesitos de filiação toleítica, os quais contrastam com riolitos e riodacitos aflorantes na região dos Aparados da Serra (CPRM,2003) com um paredão íngreme com quase mil metros de desnível caindo a nordeste diretamente na planície litorânea. A Figura 2.10 apresenta um esquema de uma seção geológica de um derrame.

Figura 2. 10 – Seção geológica esquemática de um derrame



Fonte: (CPRM, 2016).

O sistema de derrames em platô é alimentado através de uma intensa atividade intrusiva, normalmente representada por diques e sills que acompanham, grosseiramente, as principais descontinuidades estruturais da bacia (CPRM,2003).

A superfície do planalto apresenta uma inclinação geral de leste a oeste. No nordeste, junto ao litoral, alcança sua maior elevação, entre 1.000 e 1.100m; em Vacaria atinge 960m; em Carazinho, 602m. Em Cruz Alta, 469m; no extremo oeste do estado, junto às margens do Rio Uruguai, não ultrapassa cem metros. A topografia é plana ou levemente ondulada, mas os rios, que banham a parte mais elevada, abrem nela profundos sulcos ou vales, isolando compartimentos tabulares (BOEIRA, 2014).

2.4.2. Depressão Central

A Depressão Central, situada entre o Planalto e a Serra do Sudeste, apresenta altitudes que variam aproximadamente de 40 a 200 metros. O relevo caracteriza-se pela ocorrência de amplas planícies aluviais e coxilhas sedimentares com declividades suavemente onduladas a onduladas (REINERT *et al.*, 2007).

A área da planície aluvial está constituída principalmente por sedimentos recentes (Quaternário) que foram removidos de superfícies topograficamente mais elevadas e depositados nas áreas mais planas das margens dos cursos fluviais mais importantes do ponto de vista da atuação dos processos de acumulação. Modeladas sobre terraços fluviais em porções ao centro e sul ao sul da área, onde atuam processos de aplanamento e dissecação, ocorrem formas topograficamente um pouco mais elevadas constituindo as coxilhas. Em alguns pontos formam-se coxilhas alongadas, apresentando-se na forma de pequenas encostas rampeadas. Nelas ocorrem com facilidade os processos de erosão hídrica a partir da atuação de canais incisivos (NASCIMENTO *et al.*, 2012).

Formada pelos municípios principais: Gravataí, Santa Maria, Guaíba, Taquari, Canoas, Cachoeira do Sul, ocupa uma área de 31.778 km² e é constituída por Formações como a Botucatu, grupo Rosário do Sul, Rio do Rastro, Estrada Nova, Irati, Palermo e a mais perto do Escudo, a Formação Rio Bonito. Na Formação Botucatu, existem arenitos que devido a sua porosidade constituem o Aquífero

Guarani. Na formação Rio Bonito é possível encontrar carvão mineral e xistos grafitosos, enquanto que a formação Estrada Nova apresenta rochas derivadas do calcário (BOEIRA, 2014).

O grupo Rosário do Sul, depositado durante o Triássico por sistemas continentais fluviais, lacustres e eólicos, é dividido nas formações Pirambóia, Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita, sendo as três últimas restritas ao Estado do rio Grande do Sul. É formado por conglomerados, arenitos e pelitos avermelhados (SILVA *et al.*, 2008).

Rochas de origens diferentes apresentam propriedades diferentes e sua aplicação em determinada obra de engenharia irá depender das exigências requeridas em cada aplicação e de acordo com suas características tecnológicas.

2.5. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS MATERIAIS ROCHOSOS

Hoje em dia, em decorrência de suas altas qualidades de durabilidade, resistência e baixo custo, a pedra continua ocupando importante papel nas construções e por ocupar grandes volumes, ela deve ser buscada sempre que possível próximo ao local da obra, com o objetivo de não encarecer o transporte. Com isso o engenheiro terá a sua disposição não exatamente o material de que gostaria, e sim aquele disponível (MACIEL FILHO E NUMMER, 2014).

Frazão (2002), diz que a correta utilização das rochas e demais materiais pétreos na construção civil, requer o conhecimento prévio de suas propriedades. Para a utilização de materiais rochosos na construção civil as propriedades de interesse são ditas propriedades tecnológicas e podem ser classificadas em geológicas, físicas e físico mecânicas.

As propriedades geológicas estão ligadas a natureza da rocha ou material pétreo em foco. Trata-se de propriedades químicas, mineralógicas e petrográficas que são refletidas na composição mineralógica, na textura, estrutura, alterabilidade, cristalinidade e outros (FRAZÃO, 2002).

A alteração é definida como sendo o conjunto das transformações pelas quais passam as rochas, motivadas por fatores intrínsecos e extrínsecos (FRAZÃO E CARUSO, 1983 apud ARNOLD, 1993). Os fatores intrínsecos estão relacionados

com a natureza da rocha: a composição mineralógica define as características químicas e o estado microfissural. Os fatores extrínsecos estão relacionados com o meio ambiente: os fatores climáticos em geral e os fatores do meio físico onde se encontra a rocha (RETORE, 2005).

A alteração é um dos aspectos que mais influi nas suas características tecnológicas dos materiais rochosos, principalmente a durabilidade. Em pesquisas sobre uso de basaltos em pavimentos rodoviários concluiu-se que os minerais de alteração, em teores elevados são a principal causa de degradação dos pavimentos (RETORE, 2005).

A quantidade e a dimensão das discontinuidades determinam a porosidade e permeabilidade das rochas. Essas discontinuidades são formadas pela interação entre o meio ambiente e o material rochoso, pois se sabe que há meios mais agressivos que outros. Fissuras mais abertas proporcionam a entrada da água ao interior da rocha que irá entrar em contato com seus minerais e quanto maior o número de fissuras maior será esse contato. Caso a água venha a ter contato com argilominerais, poderá ocorrer a desagregação da rocha.

Assim, as características das discontinuidades e as condições de tensão do maciço são importantes para definir a influência do fraturamento na alterabilidade das rochas (PRICE, 1995).

As propriedades de origem e formação das rochas são os principais responsáveis pela desagregação que ela rocha tenha ou possa vir a ter principalmente pela presença de minerais com menor estabilidade química que possa reagir com água ou outras substâncias.

FRAZÃO e CARUSO (1983) realizaram estudos sobre a estabilidade química de rochas com diferentes composições mineralógicas. Os estudos estabeleceram séries de alterabilidade sugerindo uma ordenação de geração de minerais no magma onde os últimos minerais a se formarem são mais estáveis na condição de superfície em relação aos primeiros minerais a se formarem que são menos estáveis.

Em condições úmidas, as rochas basálticas se alteram mais facilmente que, por exemplo, os granitos, essa condição se dá devido a estabilidade mineralógica desse tipo de rocha onde seus minerais essenciais (plagioclásios e piroxênios) são

menos estáveis que os do granito (quartzo, ortoclásio e biotita) nas mesmas condições ambientais. (GILNEI, 1993).

Além disso, os basaltos também possuem maior presença de minerais secundários quando comparado com granitos. Esses minerais secundários são formados por ação hidrotermal e dentro deles, os argilominerais são os que mais contribuem para alteração dessas rochas.

Sabendo que fatores intrínsecos são aqueles que dependem da litologia da rocha de origem e que os fatores extrínsecos são aqueles relacionados com o local de onde foi extraída a rocha (tais como clima, temperatura e condições pluviométricas), pesquisadores como Irfan e Dearman (1978), Cole e Sandy (1980) falam da importância do uso de índices petrográficos na proporção de minerais sãos e alterados para quantificação da durabilidade de rochas.

As principais qualidades necessárias dos materiais rochosos referem-se a requisitos básicos: resistência mecânica, para suportar a ação das cargas aplicadas sem que ocorra rompimento; durabilidade que é a capacidade de manter suas propriedades físicas e mecânicas com o passar do tempo e sob ação de agentes agressivos; trabalhabilidade que é a capacidade de ser afeiçoado com o mínimo de esforço; e estética que é a aparência da pedra quando se trata de fins de revestimento acabamento (MACIEL FILHO E NUMMER, 2014).

As propriedades físicas estão relacionadas a massa específica porosidade, permeabilidade, capacidade de absorção d'água, dureza adesividade (FRAZÃO, 2002).

As propriedades físico-mecânicas podem ser resumidas em: resistência à compressão, à tração, ao cisalhamento, ao impacto, a deformabilidade e a abrasividade entre outros (FRAZÃO, 2002).

Os agregados usados como base e sub-base devem atender às especificações dos órgãos de fiscalização de estradas de rodagem, em nível estadual DAER/RS e DNIT (antigo DNER) em nível nacional.

O DAERS/RS através de sua especificação DAER-ES-P 04/91 Sub-base granular, estabelece os critérios que o material pétreo a ser usado como sub-base deverá atender.

O agregado não poderá ter perda superior a 12% no ensaio de Sanidade, deve apresentar expansão máxima de 1% e ser isento de material vegetal e outras

substâncias deletérias. O material retido na peneira nº10 deverá ser constituído de partículas duras ou duráveis, isento de fragmentos alongados ou achatados (RETORE, 2005).

Ainda de acordo com a especificação DAER-ES-P 08/91 – Base granular, o material deve ter abrasão Los Angeles menor que 40%, perda no ensaio de Sanidade inferior a 10% e estar isento de substâncias nocivas.

Em seu estudo sobre caracterização laboratorial de agregados para aplicação em camadas de apoio de vias férreas, Damásio e Lopes (2011) confirmam que o comportamento dos materiais granulares é influenciado por diversos fatores, entre eles o nível de tensão aplicado *in situ*, o teor em água do material, a forma das partículas, a quantidades de finos presentes e a carga que será aplicada no material no local de projeto.

As características dos agregados que devem ser levadas em conta nos serviços de pavimentação são:

- Granulometria;
- Forma;
- Absorção de água;
- Resistência ao desgaste e ao choque;
- Durabilidade
- Adesividade;
- Massa específica aparente;
- Densidade rela do grão.

A absorção de água é uma forma de avaliar a porosidade do agregado e indica a quantidade de água que o agregado é capaz de absorver. Um agregado poroso irá também absorver ligante asfáltico, consumindo parte do ligante necessário para dar coesão a uma mistura asfáltica. Para compensar esse fato deve-se incorporar à mistura uma quantidade adicional de ligante (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A granulometria do agregado assegura estabilidade aos pavimentos, em função do maior atrito interno entre as partículas, desde a partícula mais graúda a mais fina e também pela forma de suas partículas. Em seu estudo sobre a influência do agregado graúdo na resistência ao dano por fadiga de misturas asfálticas, Freire (2015) chegou à conclusão que existe uma relação entre o teor de ligante asfáltico e

o tamanho médio nominal (TMN) dos agregados utilizados na confecção da matriz de agregado fino onde a mistura asfáltica com menor TNM requereu uma maior quantidade de ligante asfáltico alterando a capacidade das misturas asfálticas de armazenarem energia durante a aplicação de cargas. Golalipour *et al.* (2012), enfatiza o cuidado que deve-se ter em misturas asfálticas com relação ao atrito entre as partículas do agregado revestido com betume principalmente com relação as deformações no revestimento, visto que a aplicação do ligante de forma inadequada reduz o contato entre os grãos.

O Índice de Forma permite avaliar o quanto as partículas dos agregados é achatada e consiste num ensaio normalizado que avalia a forma dos grãos. A forma cúbica é a mais desejada principalmente na construção de revestimentos asfálticos do tipo tratamento superficial. Nos tipos revestimento por mistura admite-se agregados com formas alongadas, conforme o Manual de Pavimentação do DNIT. A preocupação com a forma do agregado decorre do fato de que partículas mais alongadas ou achatadas tem a tendência de se quebrarem durante a compactação das camadas alterando assim, a sua granulometria, e também prejudicam a trabalhabilidade da mistura conforme relata Gouveia e Fernandes (2006).

Chang *et al.* (2005) também explica que agregados minerais constituem cerca de 95% da mistura asfáltica a quente e que as partículas planas e alongadas tendem a quebrar durante a mistura, compactação e sob tráfego. Ele ainda afirma que partículas cúbicas são desejáveis para aumentar o atrito interno do agregado e melhorar a resistência ao afundamento.

Com relação a angularidade das partículas do agregado, que diz o quanto o grão possui variação em suas bordas, Souza (2009) chama atenção para o fato de que um aumento na angularidade do agregado graúdo proporciona aumento na vida de fadiga do pavimento.

A durabilidade do agregado é testada com o uso de soluções de sulfato de sódio ou magnésio e avalia a sua resistência ao intemperismo. Além disso, o agregado deve estar isento de substâncias nocivas como argila e matéria orgânica, caracterizando assim sua limpeza. A durabilidade é afetada por todos os processos que envolvem a alteração das rochas e o ensaio de sanidade tenta imitar as condições encontradas no ambiente externo com relação ao processo de secagem, molhagem, congelamento, expansão dos minerais deletérios alterando o estado de

tensões interna da rocha, descongelamento, aumento do desgaste e da abertura de microfissuras existentes e repetição do ciclo comprometendo assim a durabilidade do material.

A aplicação desse ensaio no Brasil tem sido criticada pelo fato do clima do país não sofrer grandes variações de temperatura, descartando a possibilidade de congelamento do material e reduzindo o desgaste devido a redução da expansão causada pelo processo. No entanto, ainda não foram adotados pelos órgãos fiscalizadores um método substituto de avaliar os agregados quanto a durabilidade até o momento.

A resistência ao choque e ao desgaste superficial simula a ação do tráfego e os movimentos internos das diversas partículas, é avaliada pelo ensaio ao choque com o aparelho Treton e pelo ensaio de Abrasão Los Angeles, seus limites de aceitação dependem do tipo de aplicação do agregado e das exigências dos órgãos viários. Levantamentos realizados nos Estados Unidos indicaram que 94% dos estados utilizam de alguma forma o ensaio de Abrasão Los Angeles como forma de definição das propriedades abrasivas de seus materiais, KANDHAL *et al.* (1997), WU *et al.* (1998). No entanto, em seus estudos, Rogers (1998) diz que o ensaio quantifica mais a resistência a quebra do que ao desgaste, visto que o resultados final considera a diferença entre as massas antes e após o ensaio descartando a avaliação da forma final das partículas.

Uma das características essenciais a se exigir de um agregado a ser usado em revestimento asfálticos é que se tenha boa adesividade, isto é, não haja possibilidade de deslocamento da película betuminosa pela ação da água. Em geral os agregados básicos ou hidrofílicos (calcário e basaltos) têm maior adesividade do que os ácidos ou hidrofóbicos (granitos e gnaisses). A adesividade pode ser melhorada com o emprego de pequenas porcentagens de substâncias que podem ser sólidas como a cal extinta ou líquidas como os dopes. Os mais largamente utilizados são os dopes devido a sua facilidade de aplicação no campo.

De acordo com pesquisadores do SHRP (*Strategic Highway Research Program*), há um consenso de que as propriedades dos agregados têm influência direta no comportamento dos revestimentos asfálticos quanto a deformações permanentes, e afetam, em menor grau, o comportamento relacionado ao trincamento por fadiga. Esses pesquisadores identificaram duas categorias de

propriedades dos agregados que devem ser consideradas: propriedades de consenso e propriedades de origem (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As propriedades designadas de consenso pelos pesquisadores do SHRP, são aquelas consideradas de exigência fundamental para o bom desempenho dos revestimentos asfálticos: angularidade do agregado graúdo e miúdo, partículas alongadas e achatadas, e teor de argila (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Nas propriedades de origem do agregado, seus valores limites de aceitação são definidos localmente por cada órgão ou agência sendo elas a resistência a abrasão, a sanidade e a presença de materiais deletérios. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Gouveia e Fernandes (2006) em estudos publicados em seu artigo faz uma análise crítica dos critérios estabelecidos pelo SHRP para selecionar, avaliar e estabelecer limites das propriedades de consenso e faz a descrição de cada ensaio para avaliação dessas propriedades. Eles alegam que, embora as propriedades identificadas pelos especialistas do SHRP sejam importantes para a pavimentação, algumas propriedades como, forma e textura superficial do agregado grosso, porosidade e absorção não foram consideradas e também são de extrema importância para o bom desempenho dos pavimentos.

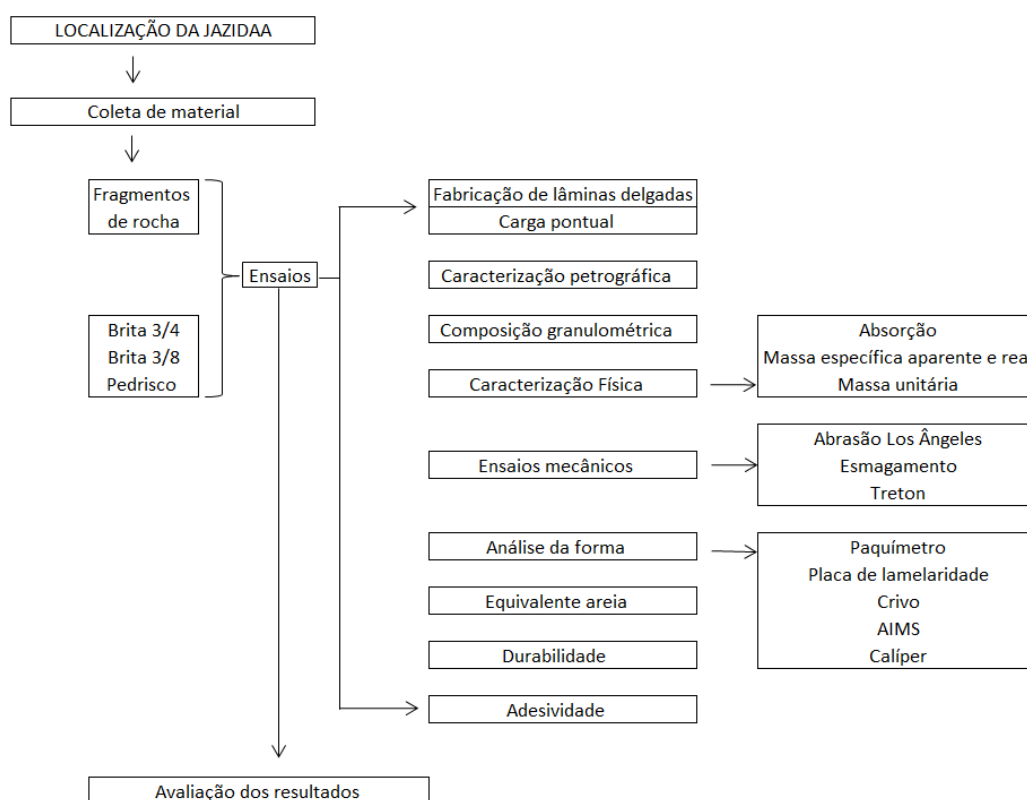
Estudos, com a utilização de um sistema de processamento digital de imagens para avaliação das propriedades do agregado desenvolvido por Eyad Massad e introduzido como método em 2004, foram realizados por Bessa *et al.* (2013) onde ele descreve o passo a passo de como se chega aos valores dos parâmetros (por meio de equações) avaliados pelo software do Aggregate Image Measurement System (AIMS) para a forma das partículas de agregados e cita a norma AASHTO TP 81 – 10 como sendo o órgão responsável normatização do método.

No Capítulo Materiais e Métodos serão apresentados os ensaios que foram executados nesta pesquisa para seis jazidas localizadas na região central do Rio Grande do Sul. Em seguida os resultados são analisados no Capítulo 4.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados na realização da parte experimental do trabalho, que consistiu basicamente em três etapas: (a) coleta em campo com breve observação macroscópica do material na jazida (pedreira), (b) ensaios petrográficos, físicos e mecânicos e (c) análise dos resultados e correlações dos parâmetros obtidos. Os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa foram resumidos no fluxograma da Figura 3.1.

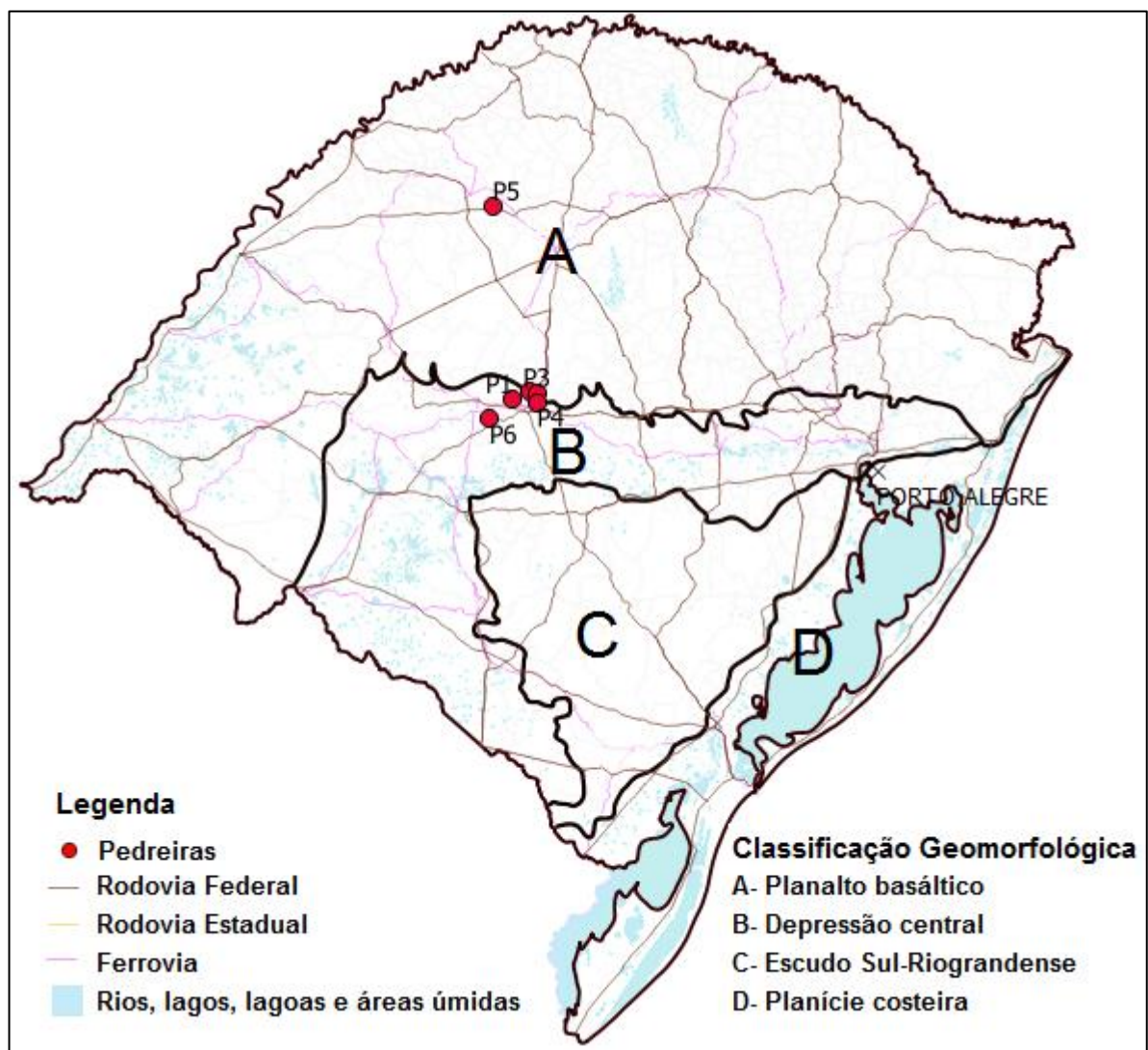
Figura 3.1 - Fluxograma das atividades executadas durante a pesquisa.



3.1. IDENTIFICAÇÃO E COLETA DE AMOSTRAS EM JAZIDAS DE ROCHA

Para esta pesquisa foram selecionadas seis jazidas (pedreiras) constituídas de rochas vulcânicas, com ênfase na região central do estado do Rio Grande do Sul conforme representado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Mapa esquemático com a indicação da localização das jazidas estudadas.



Essa região próxima ao município de Santa Maria caracteriza-se por um relevo típico de transição entre a Depressão Periférica Sul-Rio-grandense e o Planalto da Bacia do Paraná. No contato entre essas duas zonas, encontra-se o Rebordo do Planalto, profundamente dissecado e constituído por escarpas e morros, com testemunhos mantidos por camadas de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, intercaladas por arenitos “intertraps” da formação Botucatu ou Caturrita. As Jazidas localizadas no município de Itaara e Dilermando de Aguiar se encontram nesta região, ainda, segundo representado pelo mapa anterior, observa-se que a jazida de Coronel Barros localiza-se no Planalto Basáltico.

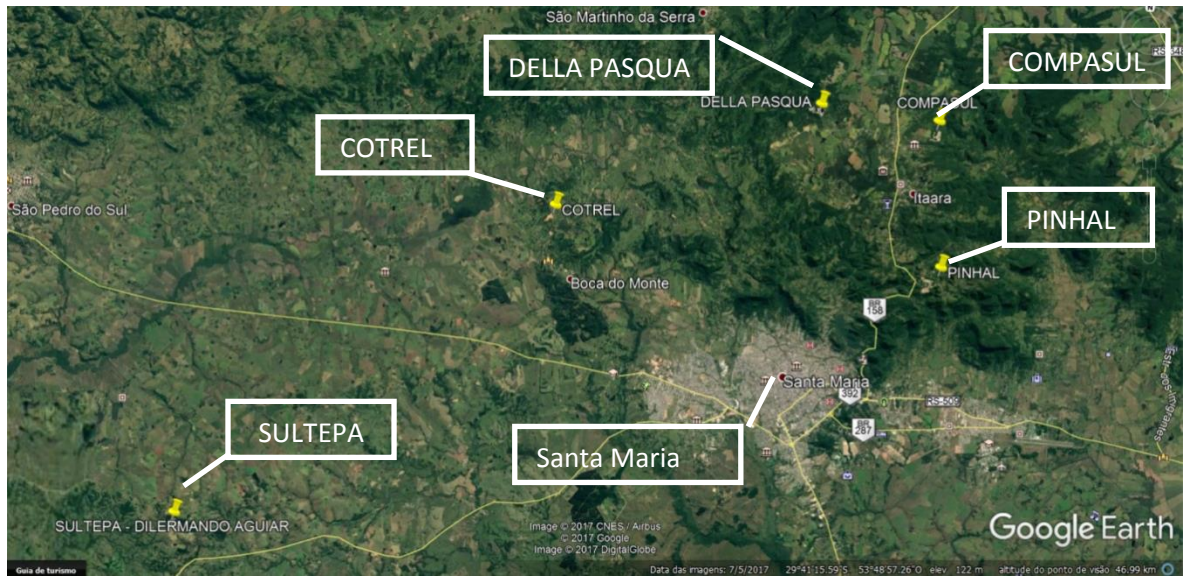
Estas pedreiras produzem agregados para obras de construção civil e pavimentação na região de estudo. A Tabela 3.1 identifica as jazidas com sua denominação comercial, nome da empresa, coordenadas e nomenclatura utilizada para identificação das amostras. Em seguida, as Figuras 3.3 e 3.4 apresentam a localização, em imagem de satélite, das jazidas estudadas nesta pesquisa.

Tabela 3.1 - Identificação das jazidas estudadas

Código	Identificação	Município	Coordenadas Geográfica (UTM)
PIN	Brita Pinhal	Itaara	22J 234247.97m E 6717493.68m S
DPA	Della Pasqua	Itaara	22J 228402.58m E 6724545.40m S
COM	Conpasul	Itaara	22J 233797.53m E 6724070.40m S
COT	Cotrel	Santa Maria	22J 216576.10m E 6719348.25m S
SUL	Sultepa	Dilermando de Aguiar	21J 780167.03m E 6704949.75m S
PAI	Paim	Coronel Barros	21J 786326.61m E 6860019.78m S

Fonte: Autor

Figura 3.3. - Localização das jazidas de Itaara e Dilermando Aguiar



Fonte: Adaptado do Google Earth.

Figura 3.4 - Localização da jazida de Coronel Barros



Fonte: Adaptado do Google Earth.

A jazida da Brita Pinhal (PIN) está localizada na Rodovia Estrada Baú no km 313 da Rodovia Federal BR 158, do lado direito no sentido Santa Maria – Itaara. Seguindo percurso pela BR 158, a jazida da Della Pasqua (DPA) está localizada no mesmo município com entrada pela Av. Guilherme Kurtz até o Distrito Estação Pinhal seguindo pela Estrada do Ibicuí. A jazida da Conpasul (COM) também se localiza no município de Itaara, na Estrada para Três Barras km 306.

A jazida da Cotrel (COT) está localizada na localidade Picada 13 de Maio no distrito de Boca do Monte em Santa Maria RS, seu acesso se dá pela BR 287.

No município de Dilermando de Aguiar, na BR 158 no sentido Santa Maria – Rosário do Sul, em uma via secundário à direita da BR entre o km 359 e 360 situa-se a pedreira da Sultepa (SUL). A jazida PAIM (PAI) está localizada no km 340 da BR-285 município de Coronel Barros – RS.

A Figura 3.5 apresenta uma visão geral das seis jazidas avaliadas nesta pesquisa.

Figura 3.5 – Vista da frente de lavra de cada uma das jazidas estudadas



(a) Brita Pinhal



(b) Della Pasqua



(c) Conpasul



(d) Cotrel



(e) Sultepa



(f) Paim

Fonte: Autor

Os materiais a serem ensaiados foram coletados diretamente nas unidades produtoras de agregado, nas pilhas, silos ou nas correias transportadoras, tendo o cuidado de obter amostras com boa representatividade. A coleta foi feita com a utilização de equipamentos manuais como pás e sacos plásticos e foram armazenados no Laboratório de Materiais de Construção Civil - LMCC (Figura 3.6).

Em todas as jazidas, foram selecionadas amostras classificadas como brita 3/4", brita 3/8", pó de pedra e fragmentos de rocha retirados na frente de detonação. Somente na jazida da Cotrel foram coletados amostras de brita 3/4" e fragmentos de rocha (Figura 3.7).

Figura 3.6 - (a) Coleta de amostra em pilha (SUL) e (b) fragmentos de rocha na frente de detonação (DPA)



(a)

(b)

Fonte: Autor.

Figura 3.7 – Diferentes dimensões de partículas para uma amostra



Fonte: Autora.

3.2. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios tiveram como objetivo a avaliação microscópica das rochas que constituem as várias jazidas estudadas, bem com a caracterização básica dos agregados, avaliação da forma por diferentes metodologias, resistência mecânica e durabilidade. Segundo Frazão (2002) a correta utilização das rochas e demais materiais pétreos na construção civil requer o conhecimento prévio de suas propriedades.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Centro de Tecnologia, no Laboratório de Geologia Ambiental (LAGEOLAM) do Centro de Ciências Naturais e Exatas (CCNE), ambos laboratórios pertencentes a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A avaliação da forma das partículas por imagens digitais foi realizada pelo Laboratório de Geotecnia Professor Jacques de Medina no Setor de Pavimentos na COPPETEC da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Os ensaios foram realizados de acordo com as normas estabelecidas por entidades regulamentadoras nacionais e internacionais, algumas serviram como base para realização dos ensaios, outras foram utilizadas como complemento para melhor entendimento entre os órgãos definidores dos métodos a serem seguidos.

3.2.1. Análise petrográfica

A análise petrográfica foi realizada de forma macroscópica utilizando uma lupa digital USB DIGITAL MICROSCOPE como equipamento auxiliar na caracterização dos fragmentos e microscópica - com uso de lâminas delgadas e microscópio polarizador (petrográfico) da marca Zeiss. A finalidade é a caracterização e o reconhecimento dos minerais constituintes das rochas visando a sua correlação com algumas das propriedades físicas e mecânicas dos agregados estudados. O processo descrito na instrução de ensaio DNER IE 006/94 (Materiais rochosos usados em rodovias – Análise petrográfica) estabelece a metodologia de análise petrográfica, tanto microscópica como macroscópica para materiais rochosos

empregados em rodovias e prescreve requisitos relacionados à apresentação dos resultados.

A descrição macroscópica das amostras consistiu na observação visual dos fragmentos de rocha (figura 3.8a) sem e com o auxílio de lupa no intuito de identificar aspectos de textura e estrutura da rocha. A partir dos fragmentos de rocha coletados no local das jazidas durante a visita a campo foram confeccionadas lâminas delgadas. Nas lâminas delgadas com o uso de microscópio, avalia-se a mineralogia, textura, alteração, estrutura e outras características. A produção da lâmina se deu por meio de serra adiamantada de alta resistência (Figura 3.8b) que serrou o fragmento de rocha deixando-o mais fino possível, Figura 3.8c, em seguida colou-se em uma lâmina de vidro (Figura 3.8d) e realizou-se um polimento através de um disco giratório com pó abrasivo, que vai progressivamente tornando a amostra cada vez mais fina até uma espessura da ordem de micrômetros. O resultado final deste procedimento pode ser observado na Figura 3.8f.

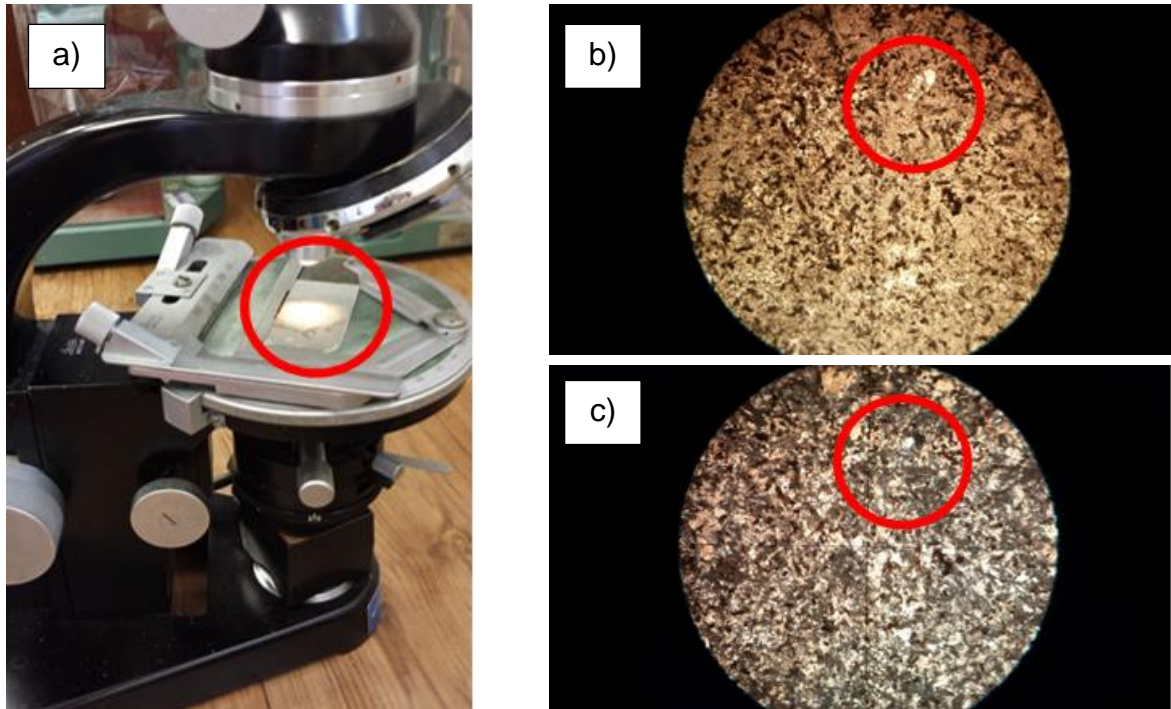
Na análise microscópica quando colocados os filtros polarizantes, pode ser observadas as propriedades ópticas dos minerais que devido aos filtros mudam de cor e intensidade de luz. Como minerais diferentes têm propriedades ópticas diferentes, a maioria dos minerais que compõem as rochas pode ser facilmente identificada. A Figura 3.9 ilustra a observação feita ao microscópio.

Figura 3.8 - Processo para fabricação de lâminas delgadas



Fonte: Autora.

Figura 3.9 – a) Amostra observada sob microscópio em b) com luz natural e em c) com luz polarizada, observe detalhe destacado para o mesmo mineral



Fonte: Autora.

3.2.2. Granulometria

O tamanho dos grãos, representado pela sua distribuição granulométrica, é expressa pela proporção relativa, pela porcentagem em peso, dos diferentes tamanhos dos fragmentos que constituem o total de uma amostra de material. O peneiramento das amostras foi realizado de forma manual e obedeceu a sequência metodológica estabelecida pela norma da ABNT NBR NM 248/2003 (Agregados – Determinação da composição granulométrica) e DNER ME 083/98 (Agregados – análise granulométrica) que descreve a série de peneiras a serem utilizadas, onde foram utilizadas as peneiras da série normal e intermediária.

Após a passagem da amostra por cada peneira da série, realizou-se a pesagem individual das várias frações retidas e com umidade natural de cada material sem que houvesse sido lavado antes ou posteriormente com a finalidade de

obter a porcentagem de cada fração em relação à massa da amostra inicial de modo como se encontrava na pedreira, obtendo-se o traçado da curva granulométrica do material. A Figura 3.10 exhibe diferentes tamanhos de grãos de uma amostra da jazida DPA.

Figura 3.10 – Separação de agregados por diferentes tamanhos de grãos



Fonte: Autora.

3.2.3. Forma das partículas

Os processos mecânicos de britagem fragmentam a rocha formando um produto que é constituído de fragmentos com forma e dimensões variadas (agregados). A forma das partículas ou dos fragmentos depende da estrutura da rocha e secundariamente de sua textura.

Esta propriedade foi caracterizada pelos seguintes métodos: índice de forma pelo método do paquímetro, índice de forma com uso de crivos redutores, índice de lamelalidade, partículas achatadas e alongadas, e por meio do *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*.

3.2.3.1 Índice de Forma (IF)

Este parâmetro foi determinado pelo método do paquímetro (ABNT NBR 7809: 2006) e com o uso de crivos redutores (DNER-ME 086/94)

A determinação do índice de forma do agregado pelo paquímetro é determinado pela média da relação entre o comprimento (c), que é a maior dimensão possível de ser medida e a espessura (e), que é a menor distância entre planos paralelos das faces dos grãos do agregado (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Medição do comprimento e espessura das partículas com uso do paquímetro



Fonte: Autora.

A determinação do índice de forma preconizado pelo DNIT é realizado por meio de uma série de peneiramento em crivos circulares, com a finalidade de separar cada fração, seguido de uma redução em porcentagem das partículas retidas em crivos redutores. O método determina o índice por meio da variação multidirecional dos eixos das partículas do agregado (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Determinação do Índice de Forma com uso de crivos



Fonte: Autora.

A determinação do número partículas é dada pela Equação 3.1:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \times F_i \quad (3.1)$$

Onde:

200 é o número de grãos necessários para a realização do ensaio;

N_i é o número de grãos a serem medidos na fração i ;

F_i é a porcentagem de massa retida individual da fração i ;

O índice de forma varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1 mais elevada será sua cubicidade e quanto mais próximo de 0 mais lamelar será o material. Este índice é obtido pela Equação 3.2.

$$IF = \frac{P_1 + 0,5P_2}{100 n} \quad (3.2)$$

Onde:

IF é o índice de forma;

P₁ é a soma das porcentagens retidas nos crivos I, de todas as frações que compõem a graduação;

P₂ é a soma das porcentagens retidas nos crivos II, de todas as frações que compõem a graduação;

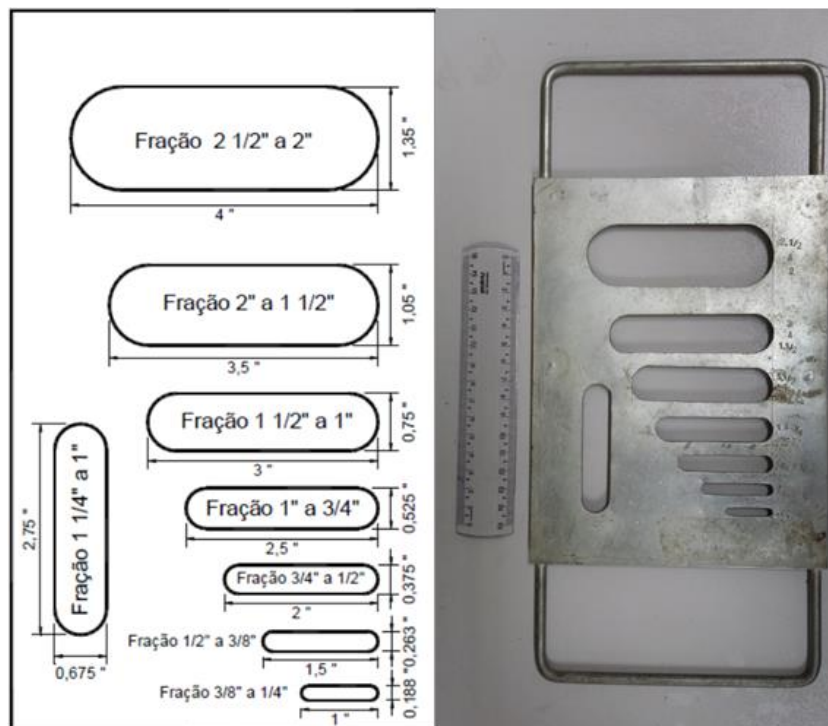
n é o número de frações que compõem a graduação escolhida.

3.2.3.2 Lamelaridade

O índice de lamelaridade é obtido de acordo com a norma DAER/RS-EL 108/01. São utilizadas 200 partículas de cada fração retida de acordo com o tamanho dos grãos da amostra, por exemplo: para a brita de ¾" são ensaiadas as frações retidas nas peneiras com abertura de ½", 3/8" e ¼". Esse índice nos permite classificar o agregado como lamelar ou não-lamelar de acordo com sua espessura que deve ser menor ou igual a 0,6 da sua dimensão nominal.

Determina-se na placa de lamelaridade, (Figura 3.13), as porcentagens passantes e retidas. O índice de lamelaridade correspondeu ao quociente entre a massa das partículas lamelares passantes na abertura da placa pela massa total da amostra, expresso em porcentagem.

Figura 3.13 - Placa para ensaio de lamelaridade.



Fonte: Adaptado do DER.

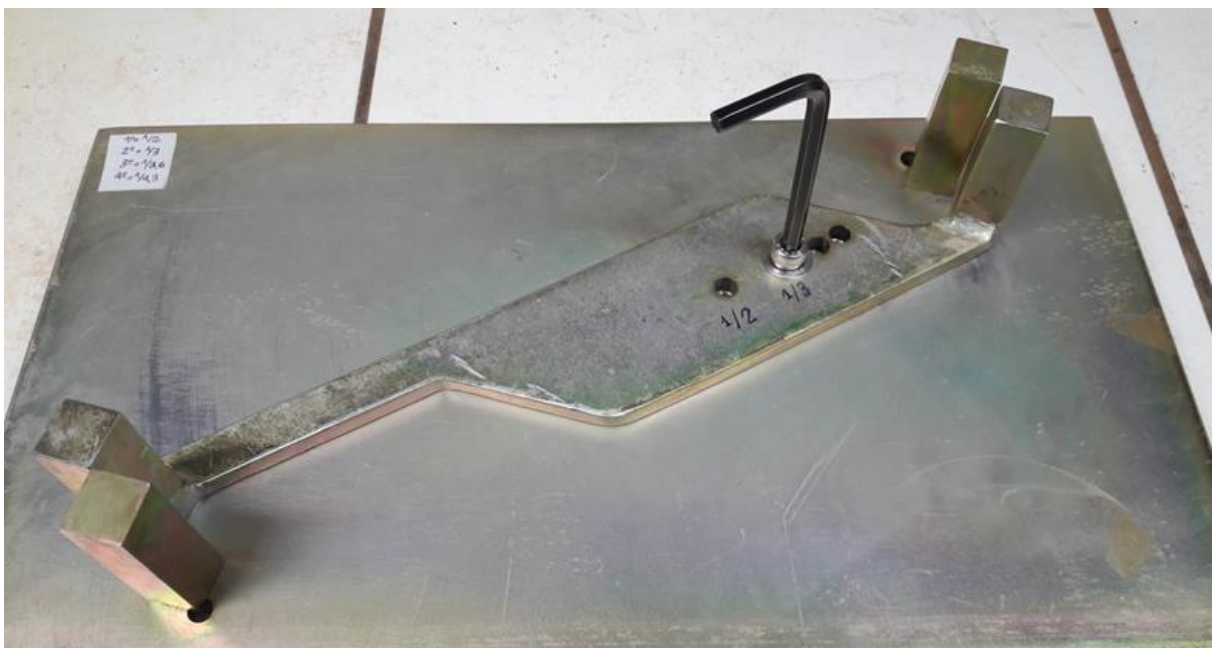
3.2.3.3 Avaliação das Partículas Achatadas e Alongadas (Metodologia SUPERPAVE)

A determinação das partículas alongadas, achatadas (ou planas) e não alongadas-achatadas utiliza os procedimentos descritos pela ASTM d4791/15. A avaliação é realizada usando compasso proporcional (Figura 3.14) que defini por meio de ajuste no calibre, relações entre a maior e menor dimensão da partícula – 2:1, 3:1, 4:1, ou 5:1. Para essa pesquisa, 100 partículas foram ensaiadas para as frações de 3/4", 3/8" e 1/4" com as proporções 3:1 e 5:1.

A planicidade é definida posicionando a abertura maior do compasso igual à largura da partícula e fixando essa abertura para enquadrar a espessura da mesma partícula do outro lado na abertura pré-determinada pela largura, onde, caso haja encaixamento dessa espessura na abertura menor do compasso, será classificada

como sendo plana. O alongamento foi avaliado pela a abertura maior do compasso igual ao comprimento da partícula. A partícula foi considerada alongada quando sua largura se encaixou na abertura menor do compasso. Por final, determinou-se as porcentagens das partículas achatadas e alongadas por contagem. Os valores admissíveis para estes parâmetros são baseados no carregamento esperado para a faixa da rodovia de acordo com a metodologia SUPERPAVE.

Figura 3.14 - Dispositivo de compasso proporcional.



Fonte: Autora.

3.2.3.4 Aggregate Image Measurement System (AIMS)

A análise dos agregados graúdos e miúdos pelo AIMS inclui parâmetros de forma tridimensional, de angularidade, de textura e de razões de achatamento e de alongamento (lateralidade). O ensaio do AIMS é normatizado pela AASHTO TP 81-10, tendo como principal vantagem a possibilidade de um resultado mais preciso pela sua determinação por meio de distribuição e não por meio da média dos valores. Na figura 3.15 é mostrada uma imagem do equipamento utilizado.

Os agregados foram separados de acordo com os tamanhos estabelecidos pela norma em peneiras com aberturas exibidas na Tabela 3.2, em seguida foram lavados para que as impurezas não pudessem interferir nos resultados de imagem. Essa etapa foi desenvolvida no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC e depois o material foi enviado para o Laboratório do CENPES para realização do ensaio.

Figura 3.15 - Equipamento de sistema de medição por imagem AIMS2



Fonte: Federal Highway Administration - U.S. Department of Transportation em <<https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/aims2/hif11030/chap02.cfm#eq.>>

Tabela 3.2 – Massa aproximada da amostra.

Abertura	Tamanho	Massa	Número sugerido de partículas
3/4	19,00	2 kg	50
1/2	12,50	2 kg	50
3/8	9,50	2 kg	50
1/4	6,30	2 kg	50
nº 4	4,75	2 kg	50
nº 8	2,00	200 g	150
nº 16	1,18	200 g	150
nº 30	0,60	200 g	150
nº 50	0,30	200 g	150
nº 100	0,15	200 g	150
nº 200	0,075	200 g	150

Fonte: Adaptado do Manual AIMS.

O AIMS fornece cinco diferentes propriedades, a saber: três apenas para agregado graúdo (esfericidade, lamelaridade e textura), uma para agregado graúdo e miúdo (a angularidade) e uma somente para agregado miúdo (forma 2D).

Ainda conforme Bessa (2013) confirma em seu estudo, o índice para a forma 2D varia de 0 a 20 e apresenta forma de círculo perfeito quanto mais próximo de zero for esse índice, seu cálculo é feito pela Equação 3.3. Para o agregado graúdo, o parâmetro que avalia a forma, porém de modo tridimensional, é a esfericidade que pode variar de 0 a 1 onde uma partícula de agregado é classificada como cúbica quando o índice apresenta valor igual a 1 e é calculada pela Equação 3.4. O parâmetro angularidade quantifica as mudanças ao longo das bordas das partículas, medida através de um gradiente exemplificado na Figura 3.16, esse parâmetro varia de 0 a 10.000, apresentado na Figura 3.17, e quanto mais tende a zero o valor desse gradiente, mais ter-se-á um círculo perfeito. A Equação 3.5 mostra o cálculo da angularidade.

$$\text{Forma 2D} = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[\frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

R_{θ} = raio da partícula no ângulo 0°

$\Delta\theta$ = diferença de incremento no ângulo

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{d_S \cdot d_I}{d_L^2}} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

d_S = menor dimensão do agregado

d_I = dimensão intermediária do agregado

d_L = maior dimensão do agregado

$$\text{Angularidade} = \frac{1}{\frac{n}{3}-1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad \text{Equação 3.5}$$

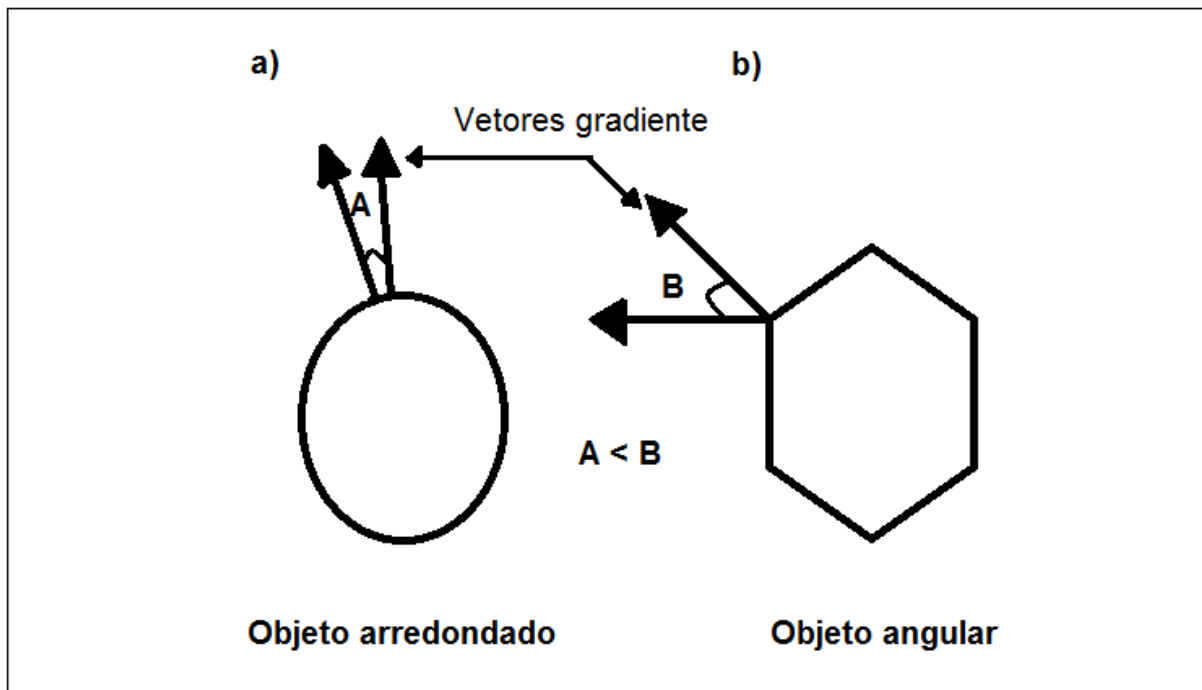
Onde:

Θ = ângulo de orientação dos pontos de borda

n = número total de pontos

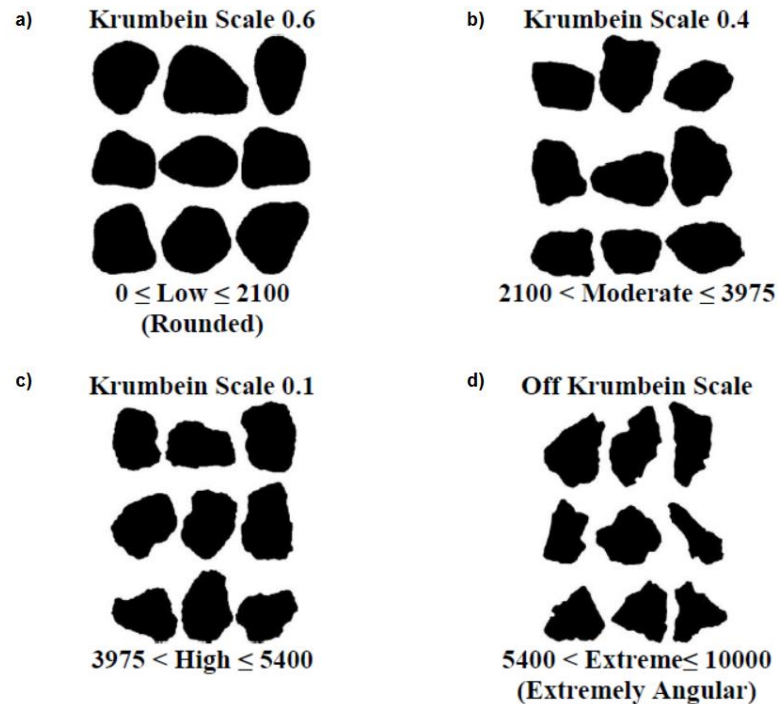
i = i-ésimo ponto de borda da partícula

Figura 3.16 - Vetor gradiente para partículas lisas x angulares de agregados graúdo e miúdo.



Fonte: Modificado do Manual AIMS.

Figura 3.17 – Faixa de angularidade para agregado graúdo e miúdo segundo o manual do AIMS.



Fonte: Modificado do Manual AIMS.

A textura superficial, calculada pela Equação 3.6, é definida pela variação nos *pixels* da imagem gerada. Ela descreve o quanto a superfície do agregado graúdo é lisa ou rugosa através da média e do desvio padrão dos valores dos *pixels* nas imagens analisadas, podendo ser observado no exemplo da Figura 3.18. Seu índice varia de 0 a 1.000 e quanto mais próximo de zero, mais o agregado terá sua superfície classificada como polida.

$$\text{Textura Superficial} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N \left(D_{i,j}(x, y) \right)^2 \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

D = função de decomposição

n = nível de decomposição da imagem

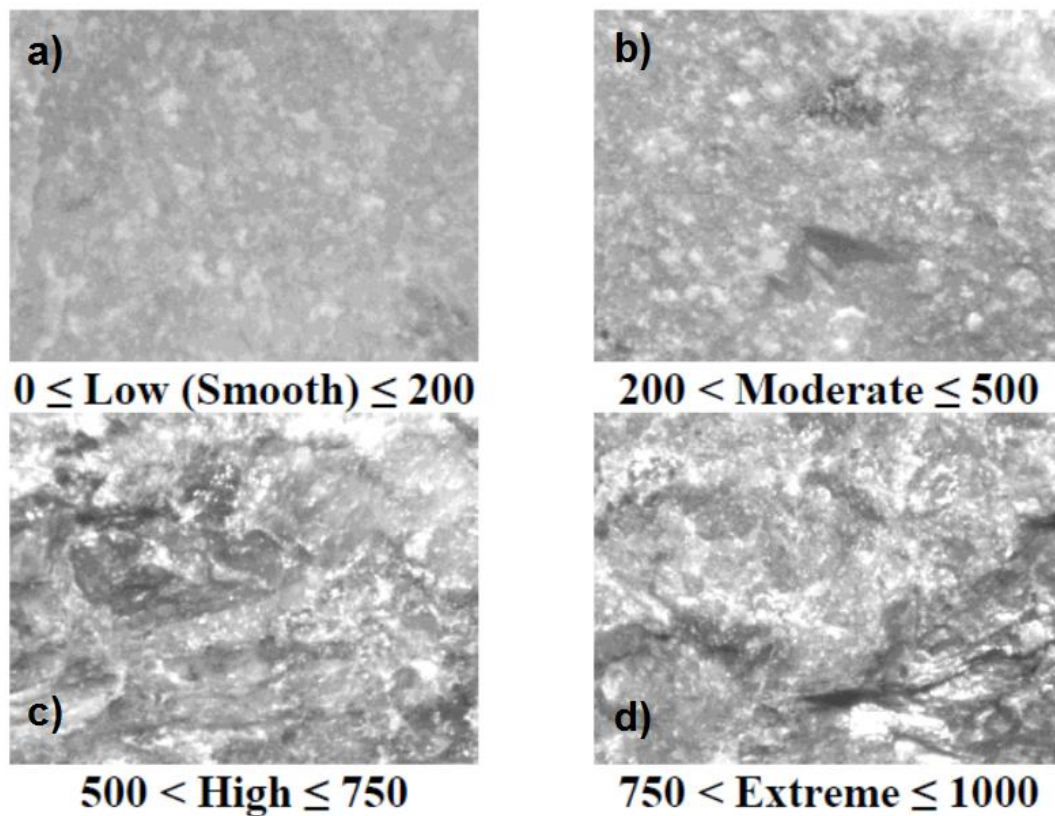
N = número total de coeficientes em uma imagem detalhada

i = direção da textura

j = índice wavelet

x,y = localização dos coeficientes no domínio transformado

Figura 3.18 – Faixa de textura para agregado graúdo.



Fonte: Manual AIMS.

O agregado ainda pode ser classificado com base na relação das dimensões de suas partículas em partículas achatadas e alongadas, achatadas ou alongadas, determinadas pelas Equações 3.7 a 3.9 abaixo:

$$\text{Achatamento: } \frac{d_s}{d_i}$$

Equação 3.7

$$\text{Alongamento: } \frac{d_i}{d_L} \quad \text{Equação 3.8}$$

$$\text{Achatamento e Alongamento: } L/S = \frac{d_L}{d_S} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde:

d_s = espessura da partícula (menor dimensão);

d_i = largura da partícula (dimensão intermediária);

d_L = comprimento da partícula (maior dimensão).

Em seus estudos, Al Rousan (2004) realizou ensaios com diversos tipos de agregados com a finalidade de obter um método de classificação baseado em parâmetros de textura, angularidade e forma para os agregados, incluindo para isso, complexos métodos estatísticos. Sendo assim, a classificação dos agregados com base nos limites propostos por Al Rousan (2004) são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Limites da classificação propostos por Al Rousan.

Propriedade	Valores Limite / Classificação				
Forma 2D	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Esfericidade	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado/ alongado	Pouco esférico	Moderadamente esférico	Muito esférico	-
Angularidade	< 2.100	2.100 – 4.000	4.000 – 5.400	> 5.400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Textura Superficial	< 165	165 – 275	275 – 350	350 – 460	> 460
	Polido	Macio	Pouco rugoso	Moderado rugoso	Muito rugoso

Fonte: Al Rousan, 2004.

3.2.4. Índices Físicos

São denominados índices físicos as propriedades de massa específica, porosidade e absorção de água.

3.2.4.1 Massa específica

Segundo a norma ABNT NBR NM 53: 2009 (Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água), a massa específica do agregado graúdo em condição seca é determinada excluindo os poros permeáveis do agregado. Consiste na relação da massa da amostra em estado seco pelo volume do agregado de acordo com a Equação 3.10 e Equação 3.11.

$$MEA = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (3.10)$$

Onde:

MEA = é a massa específica aparente do agregado seco em gramas por centímetro cúbico,

m = é a massa da amostra seca em gramas,

m_s = é a massa da amostra na condição saturada superfície seca em gramas,

m_a = é a massa em água da amostra em gramas.

$$MER = \frac{m}{m - m_a} \quad (3.11)$$

Onde:

MER = é a massa específica do agregado seco em gramas por centímetro cúbico,

m = é a massa da amostra seca em gramas,

m_a = é a massa em água da amostra em gramas.

Utilizou-se um cesto metálico com abertura de malha menor que o menor grão da amostra para que não houvesse perda de material e mergulhando-o juntamente com o agregado em um balde com água localizado abaixo da balança, com o cesto previamente pesado, foi possível pesar o material.

Para o agregado miúdo, seguiram-se os procedimentos estabelecidos na norma DNER ME 194/98 (Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman).

3.2.4.2 Absorção

A absorção foi dada pela relação da massa do material após um período de 24 horas submerso pela massa inicial da amostra e o ensaio foi estabelecido pela norma ABNT NBR NM 53: 2009 (Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água).

O ensaio foi realizado com o agregado graúdo - brita 3/4” e brita 3/8”. Sabendo que as amostras dessa pesquisa foram armazenadas em sacos mantendo as características de campo, foi necessário lavar o material em água corrente para retirar todo pó presente no material, em seguida secou-se o mesmo em estufa e determinou-se o seu peso seco.

Em um recipiente com água, ficou submerso por um período de 24 horas. Após a retirada do material, realizou-se seu espriamento em um tecido absorvente onde foi possível retirar o excesso de água deixando o material saturado, porém com superfície seca e então se pesou a amostra novamente, o cálculo foi feito conforme a Equação 3.12.

$$a = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \quad (3.12)$$

Onde:

a = absorção de água, (%);

B = massa da amostra na condição saturada superfície seca, (g);

A = massa da amostra seca, (g).

3.2.4.3 Massa unitária

A determinação da massa unitária seguiu os requisitos expostos na norma ABNT NBR NM 45: 2006 (Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios), que define como sendo a relação entre a massa do agregado lançado em um recipiente padronizado e o volume desse recipiente como ilustrado na Figura 3.19. O método empregado foi o Método C pelo qual se determinou a massa unitária do material no estado solto.

Figura 3.19 – Caixa metálica utilizada para determinação da massa unitária em estado solto do agregado.



Fonte: Autora.

A Equação 3.13 fornece o cálculo para obtenção da massa unitária.

$$Pap = \frac{mar - mr}{V} \quad (3.13)$$

Onde:

Pap = Massa unitária do agregado, (kg/m³);

mar = massa do recipiente com o agregado, (kg);

mr = massa do recipiente vazio, (kg).

3.2.5. Resistência

A avaliação das propriedades relacionadas à resistência da rocha ou fragmentos abordará o desgaste, abrasão, tenacidade, esmagamento e resistência pontiforme.

3.2.5.1 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles é descrito pela norma ABNT NBR NM 51: 2001 (Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”). A amostra destinada ao ensaio foi obtida separando por peneiramento, as diferentes frações. Para a brita 3/4, foi utilizado 2,5 kg de material retido na peneira de 1/2” mais 2,5 kg de material retido na peneira 3/8” e seguiu-se o ensaio conforme norma. Também foi realizado abrasão na brita 3/8” e utilizou-se 2,5 kg de material retido na peneira 1/4” mais 2,5 kg de material retido na peneira nº 4 (Figura 3.20).

Figura 3.20 – Equipamento de abrasão Los Angeles e resultado de um ensaio



Fonte: Autora

Durante as rotações do cilindro, as esferas geram impacto na amostra de agregado causando seu desgaste e reduzindo as dimensões de seus grãos. A massa de agregado resultante do desgaste é peneirada na peneira com abertura de 1,7 mm (nº12).

O resultado se dá pela redução de massa dos agregados retidos pela relação entre a massa inicial da amostra ensaiada, em porcentagem, (Equação 3.14).

$$P = \frac{m-m_1}{m} \times 100 \quad (3.14)$$

Onde:

P = a perda por abrasão, (%);

m = massa da amostra seca, (g);

m₁ = massa do material retido na peneira com abertura de malha de 1,7mm, (g).

As especificações brasileiras limitam o desgaste em cerca de 40% a 55% de Abrasão Los Angeles para o uso de agregados em camadas de base e revestimento em pavimentos.

3.2.5.2 Perda ao choque no aparelho Treton

O ensaio de perda ao choque com uso do aparelho Treton foi executado seguindo os requisitos da norma DNER – ME 399/99 que estabelece o procedimento, preparação da amostra e aparelhagem necessária para execução do mesmo.

Para obtenção da amostra, utilizou-se o material da brita $\frac{3}{4}$ ", passante da peneira $\frac{3}{4}$ " (19 mm) e retido na peneira $\frac{5}{8}$ " (16 mm). Em seguida esse material foi lavado e seco em estufa visto que o resultado final depende do peso da amostra.

Como o resultado do ensaio se dá pelo esmagamento das partículas de agregado, devem ser escolhidas partículas mais cúbicas e angulares com tamanhos aproximados. A Equação 3.15 fornece o cálculo para se chegar ao resultado do ensaio. Além disso, foram observadas as seguintes condições simultaneamente: o peso em gramas da amostra deve ser 50 vezes a massa específica aparente das partículas e o número de partículas deve estar dentro do intervalo de 15 a 20. Dessa forma, sua vantagem consiste em uma pequena quantidade de material com relação aos demais métodos de avaliação de resistência mecânica aqui estudados. A Figura 3.21 apresenta imagens durante a realização do ensaio.

$$T = \frac{M_r}{M_i} \times 100 \quad (3.15)$$

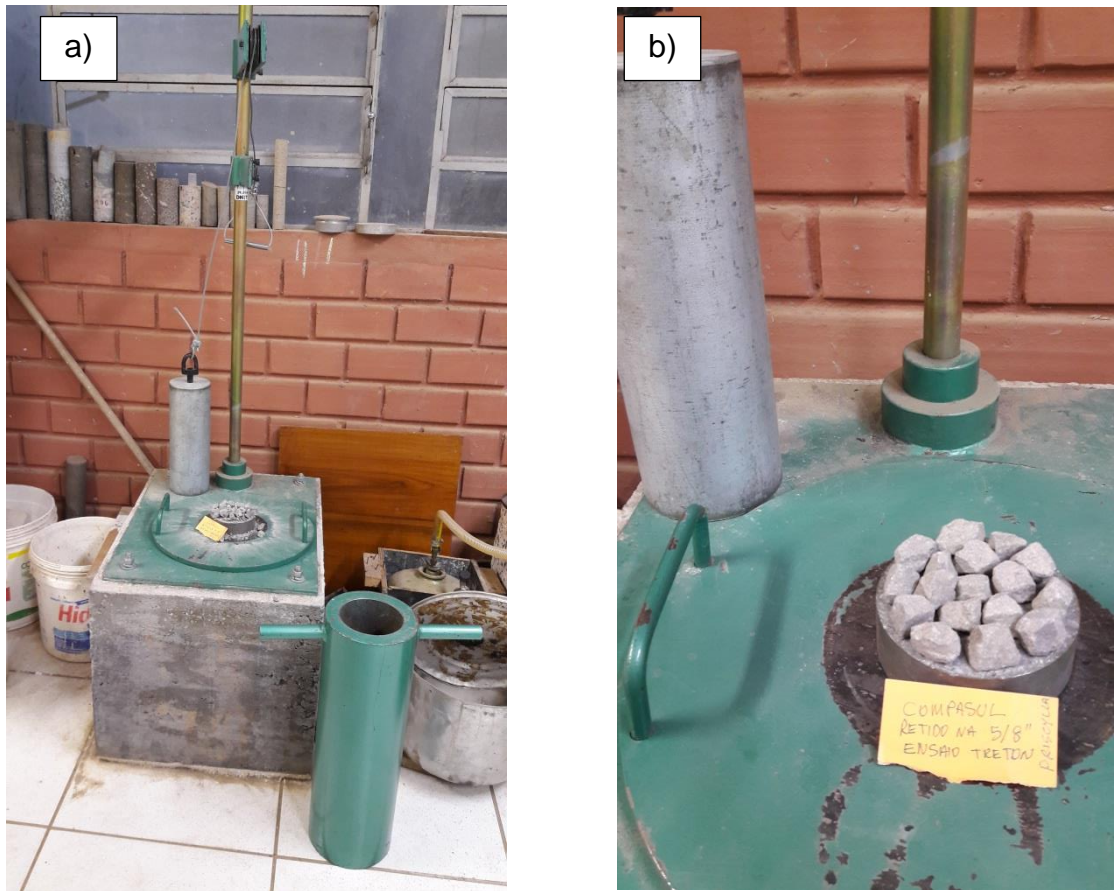
Onde:

T = Perda ao choque no aparelho Treton;

M_i = Massa original da amostra em gramas;

M_r = Massa retida na peneira de 1,7 mm de abertura.

Figura 3.21 – a) Equipamento e b) amostra preparada para o ensaio Treton.



Fonte: Autora.

3.2.5.3 Esmagamento

A norma DNER ME 197/97 (Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos) e a ABNT NBR 9938: 1967 (Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos) simula o efeito da compressão da compactação durante a construção em campo ou pelo tráfego dos veículos no pavimento levando ao desgaste do material pelo atrito interno.

Depois de peneirado e seco, o material foi submetido a compactação por meio de soquete em três camadas de 25 golpes em cada. Em seguida o corpo de prova foi pesado e submetido a um carregamento, que logo após, o material foi

retirado e peneirado na peneira com abertura de 2,4mm. O material retido foi pesado. A resistência do agregado ao esmagamento é calculada pela redução da massa em relação a sua massa inicial em porcentagem conforme a Equação 3.16. A seguir, algumas imagens demonstram os equipamentos e material na Figura 3.22.

$$R = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (3.16)$$

Onde:

R = resistência do agregado ao esmagamento, em (%),

M_i = massa inicial da amostra seca antes do ensaio, em gramas,

M_f = massa final do material retido na peneira 2,4 mm, em gramas.

Figura 3.22 – Equipamento para ensaio de esmagamento



Fonte: Autora.

3.2.5.4 Carga Pontual

Os ensaios de carga pontual ou compressão puntiforme são normatizados pela Internacional Society for Rocks Mechanics (ISRM), através do “Suggested Method for Determining Point Load Strength” (1985).

Descrito nos estudos de Arnold (1993), o ensaio consistiu em aplicar uma carga puntiforme em um fragmento de rocha, coletado em campo, até a sua ruptura exemplificado na Figura 3.23. As amostras foram submetidas à condição seca ao ar e saturadas por imersão, à pressão normal durante sete dias em água.

Figura 3.23 – Posicionamento do fragmento durante ensaio de compressão puntiforme.



Fonte: Autora.

No caso desta pesquisa, as amostras estavam armazenadas no laboratório a mais de um ano, expostas ao ar, em local coberto, portanto, já haviam perdido a condição da umidade natural do local de extração, daí a necessidade e escolha de se ensaiar na condição seca ao ar. A saturação ocorreu durante sete dias para que houvesse total preenchimento dos poros do fragmento de rocha com água e

consequentemente constância de peso verificada, também, nos estudos de Arnold (1993).

O ensaio realizado com umidade natural e de forma saturada permitiu que fosse possível comparar os resultados e verificar o efeito na resistência dos fragmentos com a presença da água.

Foram ensaiados dez fragmentos para a condição seca ao ar e dez fragmentos para a condição saturada. Procurou-se promover o rompimento das amostras através da menor dimensão. A Figura 3.24 mostra parte do equipamento e as amostras utilizadas para compressão.

Figura 3.24 – Ponteiros de aço e amostra de rocha para ensaio de compressão



Fonte: Autora.

A aplicação da carga é feita colocando o fragmento de rocha entre duas ponteiros e em seguida ocorre a aplicação de uma força paralela a espessura da amostra até que ocorra sua ruptura, onde é anotado o valor da carga para que se

possa determinar o índice de resistência à carga pontual, dado pela Equação 3.17, Equação 3.18 e Equação 3.19.

$$I_{s(50)} = F \left(\frac{P}{D_e^2} \right) \quad (3.17)$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad (3.18)$$

$$(D_e)^2 = \frac{4xWxD}{\pi} \quad (3.19)$$

Onde:

F = fator de correção de tamanho;

D_e = diâmetro equivalente - a 50 mm, (mm);

D = distância entre as ponteiros de aplicação da carga;

P = carga de ruptura, (N);

W = largura do fragmento (mm);

I_{s(50)} = índice de resistência corrigido, (Mpa).

3.2.6. Alterabilidade

Existem diversos ensaios utilizados para avaliar a alterabilidade de rochas (FRAZÃO, 2002 e COSTA 2012), contudo em pavimentação adota-se a avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio (DNER ME 089/94). As amostras são separadas em função do tamanho das partículas

(peneiras), inicialmente ficam imersas na solução saturada com sulfato de sódio por 18 horas, e depois secas em estufa por 24h. A avaliação da perda (ou sanidade) se dá por avaliação visual das partículas mais grosseiras e pela perda de peso nas partículas, tanto do agregado graúdo quanto do miúdo.

Quando alguma das frações obtidas na granulometria apresentou peso menor que 5% do peso total da amostra ou não existia, foi considerada a mesma perda das frações imediatamente maior ou menor existente na amostra.

Na Figura 3.25, pode ser observada uma amostra envolvida por cristais de sal, durante o processo de molhagem. Ao final do ensaio, cada fração foi novamente peneirada, pesada e verificada a perda.

Figura 3.25 – Ensaio de sanidade – detalhe dos cristais de sal envolvendo as partículas do agregado



Fonte: Autora.

3.2.7. Equivalente de areia

Com a finalidade de observar a quantidade de elementos finos existentes no agregado miúdo (pó de pedra), foi realizado o ensaio de equivalente de areia regido pela norma DNER-ME 054/97. No total, foram feitas três repetições para que houvesse redução de erros de leitura e execução, por se tratar de um ensaio manual e visual conforme a Figura 3.26. O resultado final consistiu na relação entre a leitura do topo da areia pela leitura do topo do material mais fino sedimentado, dado em porcentagem.

Figura 3.26 – Amostras durante ensaio de equivalente de areia



Fonte: Autora.

3.2.8. Adesividade

Para determinação das características de afinidade a ligante asfáltico, foi considerada a norma DNER ME 078/94 (Agregado graúdo – adesividade a ligante

betuminoso) que avalia o comportamento de partículas de agregados recobertas por ligante asfáltico.

O método consistiu em separar uma amostra de agregado contendo partículas de 1/2" e envolvendo-as em uma quantidade de ligante posteriormente deixando a mistura esfriar. O ligante utilizado em todas as amostras foi o CAP 50/70 sem aditivos. Em seguida foi colocada em um frasco de vidro e totalmente recoberta com água destilada. Logo após, o frasco ficou na estufa a 40°C durante um período de 72 horas.

O resultado foi anotado como satisfatório quando, ao final do ensaio, não houve deslocamento da película betuminosa.

3.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Após execução dos ensaios, foram realizadas as análises dos resultados obtidos e comparados com os valores admitidos nas especificações para utilização e aceitação de materiais em obras rodoviárias. Também foi discutida, a influência da mineralogia, da textura e estrutura nas propriedades tecnológicas e são avaliados em função de recomendações da literatura.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios realizados para os diferentes tipos de agregados e para suas diversas propriedades. Os resultados foram separados em seções nas quais os itens 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os resultados e análises para os ensaios de caracterização dos materiais, os itens 4.5, 4.6 e 4.7 discutem os resultados e análises para os ensaios de resistência além dos itens 4.8, 4.9 e 4.10 que avaliam as demais propriedades e correlações.

4.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA

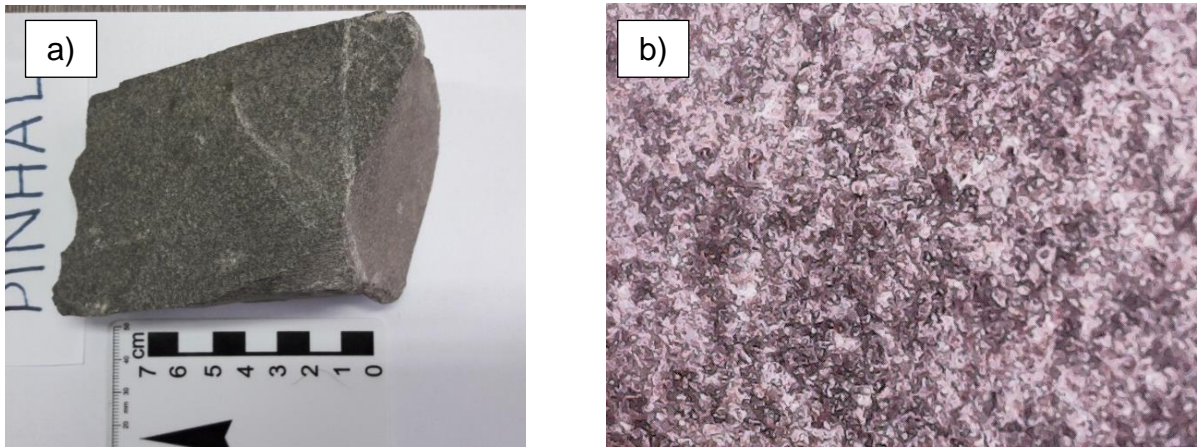
A composição mineralógica dos agregados foi avaliada por meio da observação macroscópica de fragmentos de rochas coletados juntamente com o agregado e microscopicamente com o uso de lâminas delgadas sob microscópio petrográfico.

Esse ensaio visou à obtenção dos principais minerais constituintes das rochas utilizadas nesta pesquisa, não tendo como objetivo o aprofundamento nos detalhes dos minerais, pois foi considerada a possibilidade da realização prática do ensaio. No entanto, sempre que for possível, recomenda-se o uso de métodos para obtenção de valores mais precisos tanto no conhecimento quanto na proporção dos minerais expansivos e não expansivos que possam prejudicar de forma irreversível o meio em que estejam inseridos.

4.1.1. Jazida Pinhal (PIN)

A rocha da jazida **PIN** possui cor cinza médio quando seco (Figura 4.1a) a cinza escuro quando úmida, com textura afanítica demonstrada na figura 4.1b por uma foto de detalhe da textura com aumento de 100 vezes. Macroscopicamente observam-se amígdalas, de tamanho milimétrico, distribuídas pela rocha (Figura 4.2).

Figura 4.1 – a) Amostra macroscópica da superfície do fragmento de rocha da jazida PIN destacando sua textura em b)



Fonte: Autor.

Figura 4.2 – Amostra de fragmento de mão da rocha onde se vê amígdalas milimétricas, destacadas com um círculo

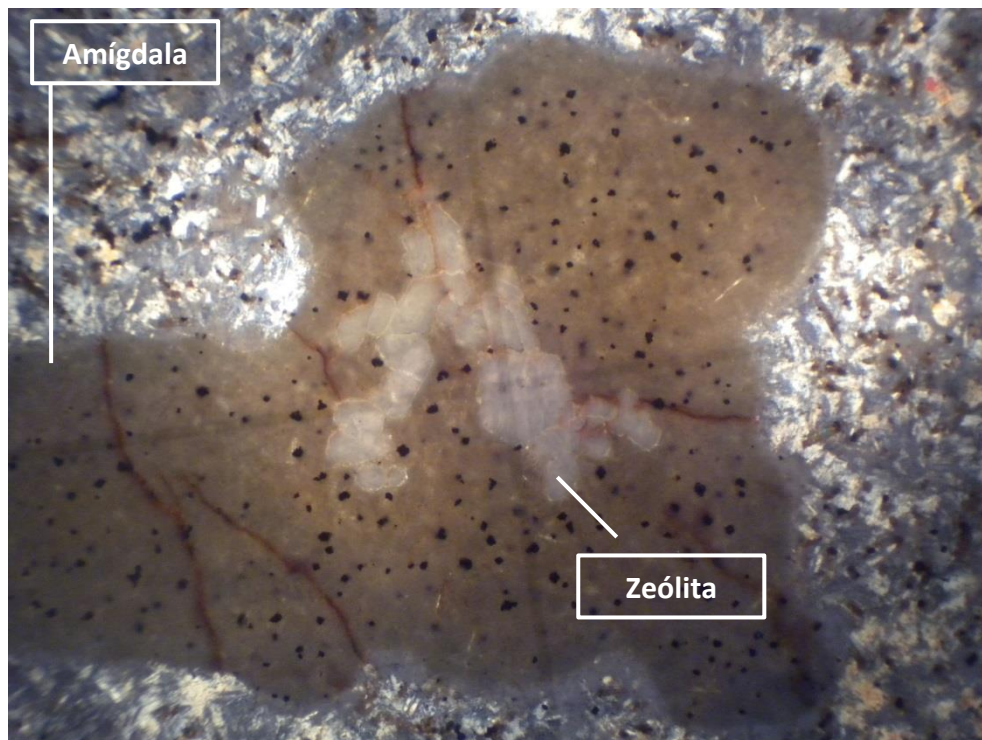


Fonte: Autor

Da observação microscópica, observa-se que a rocha da jazida PIN tem grão fino, apresenta microfraturas preenchidas com quartzo e amígdalas preenchidas com zeolitas (Figura 4.3). Seus minerais estão presentes na proporção de 40% de feldspato, 32% de quartzo, 20% de piroxênios e 8% de minerais opacos, em que os minerais de feldspato aparecem, às vezes, como microfenocristal. Também há a

ocorrência de sílica na forma amorfa em pequena quantidade. É classificada como Riodacito (rocha vulcânica ácida).

Figura 4.3 – Fotografia da lâmina da amostra PIN obtida do microscópio petrográfico destacando a presença de amígdala preenchida com zeólita (Luz Polarizada, aumento de 2,5x 8,0x 4,0 vezes)

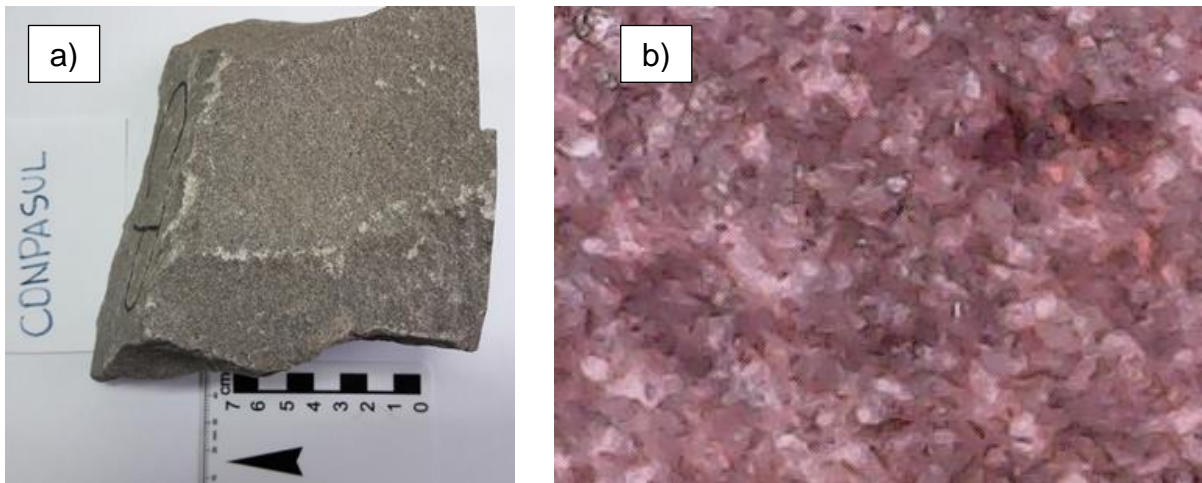


Fonte: Autor.

4.1.2. Jazida Conpasul (COM)

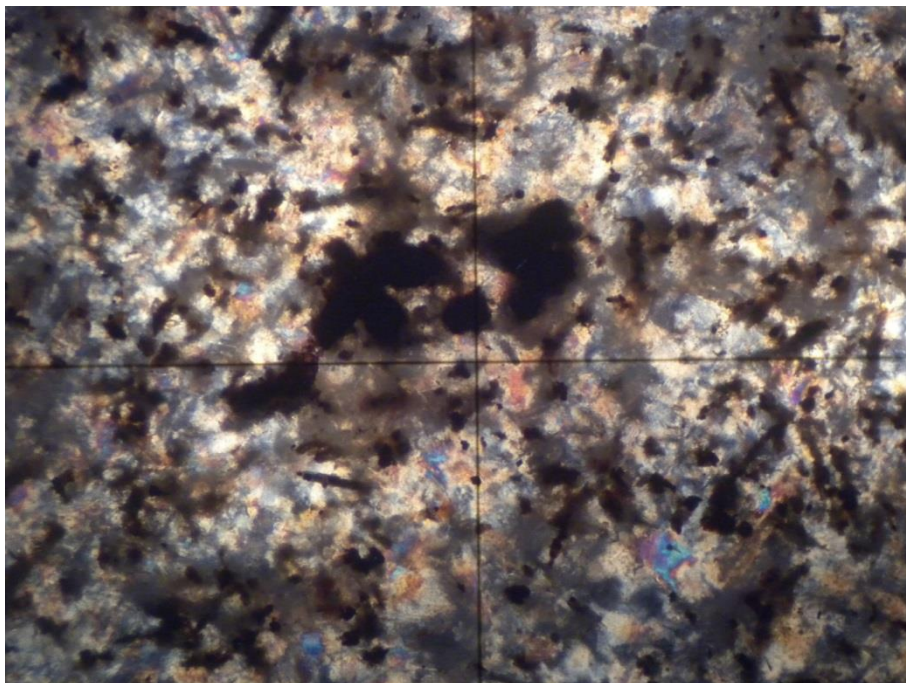
A rocha da jazida **COM** apresenta cor cinza claro quando seca a cinza escuro quando úmida também com pontuações brancas podendo, macroscopicamente, dizer-se que é semelhante a DPA (Figura 4.4a), sua textura afanítica a fanerítica muito fina, pode ser observada com mais detalhe na Figura 4.4b, obtida de lupa digital com aumento de 60 vezes e na Figura 4.5 com lâmina sob microscópio.

Figura 4.4 – a) Amostra de rocha COM e em b) foto obtida de lupa digital com aumento de 60 vezes



Fonte: Autor.

Figura 4.5 – Fotografia da lâmina da amostra COM obtida do microscópio petrográfico (Luz Polarizada com aumento de 2,5x8x04vezes)



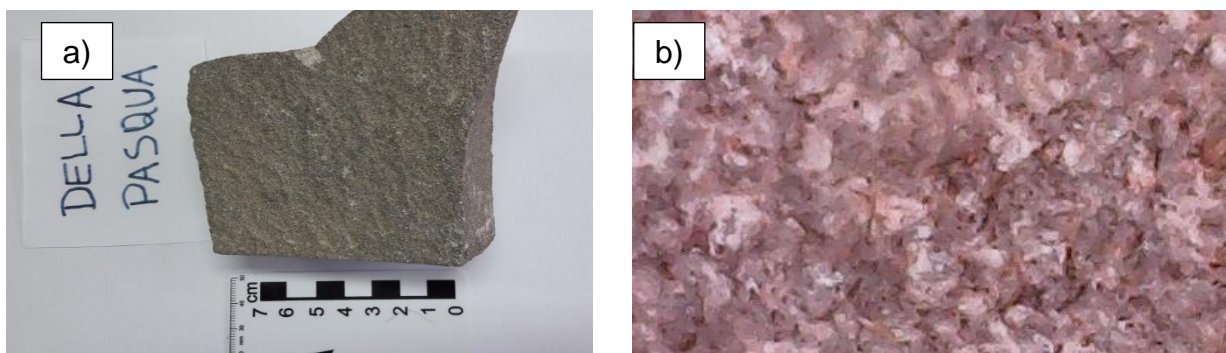
Fonte: Autor.

A rocha COM apresenta intercrescimento de quartzo e feldspato (textura micrográfica) e piroxênios de pequeno tamanho e alterados. Seus minerais opacos possuem diferentes tamanhos e bordas alteradas (Figura 4.5 acima). Pode-se dizer que proporcionalmente possui 38% de feldspato, 30% de quartzo, 22% de piroxênio e 10% de minerais opacos. É classificada como Riodacito (rocha vulcânica ácida).

4.1.3. Jazida Della Pasqua (DPA)

A rocha da jazida DPA apresenta coloração cinza claro no estado seco e cinza escuro quando úmida. Possui textura afanítica a fanerítica muito fina (Figura 4.6a), podendo ser observadas pontuações brancas. Na Figura 4.6(b), em detalhe, a textura da rocha em foto obtida com lupa digital e aumento de 100 vezes.

Figura 4.6 – a) Amostra macroscópica da rocha DPA e em b) detalhe com o uso de lupa digital (aumento 100 vezes)

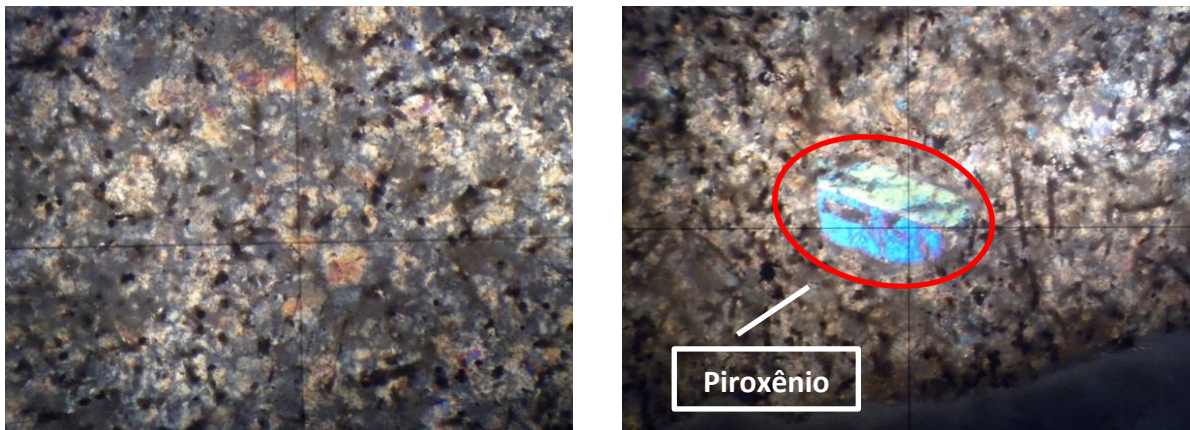


Fonte: Autor.

Para a rocha da jazida DPA observa-se intercrescimento de quartzo e feldspato com textura esferulítica (Figura 4.7); uma pequena proporção de piroxênio alterado com óxidos opacos de pequeno tamanho podendo ser provavelmente ferro-magnetita. Em algumas porções da matriz observar-se desvitrificação com formação

de argilomineral. Possui 35% de feldspato, 32% de quartzo, 25% de piroxênio e 8% de minerais opacos. É classificada como Riodacito (rocha vulcânica ácida).

Figura 4.7 – Fotografia da lâmina da amostra DPA obtida do microscópio petrográfico com detalhe para cristal de piroxênio (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes)



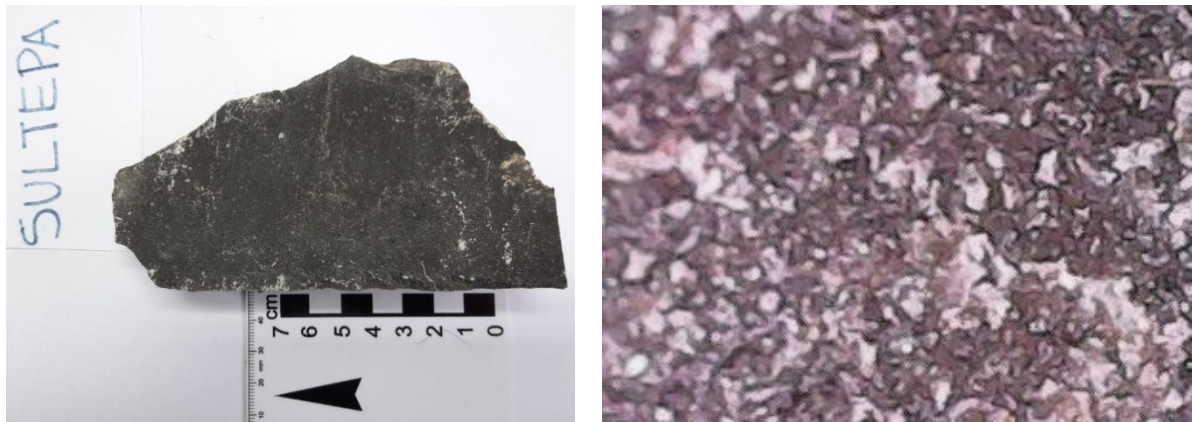
Fonte: Autor.

4.1.4. Jazida Sultepa (SUL)

A rocha da jazida SUL possui cor cinza escuro, tanto seca quanto úmida e manchas esverdeadas de alteração (figura 4.8a). Sua textura fanerítica muito fina pode ser observada com mais detalhe na Figura 4.8b, obtida de lupa digital com aumento de 100 vezes e seus minerais podem ser observados na Figura 4.9 obtida da imagem por microscópio.

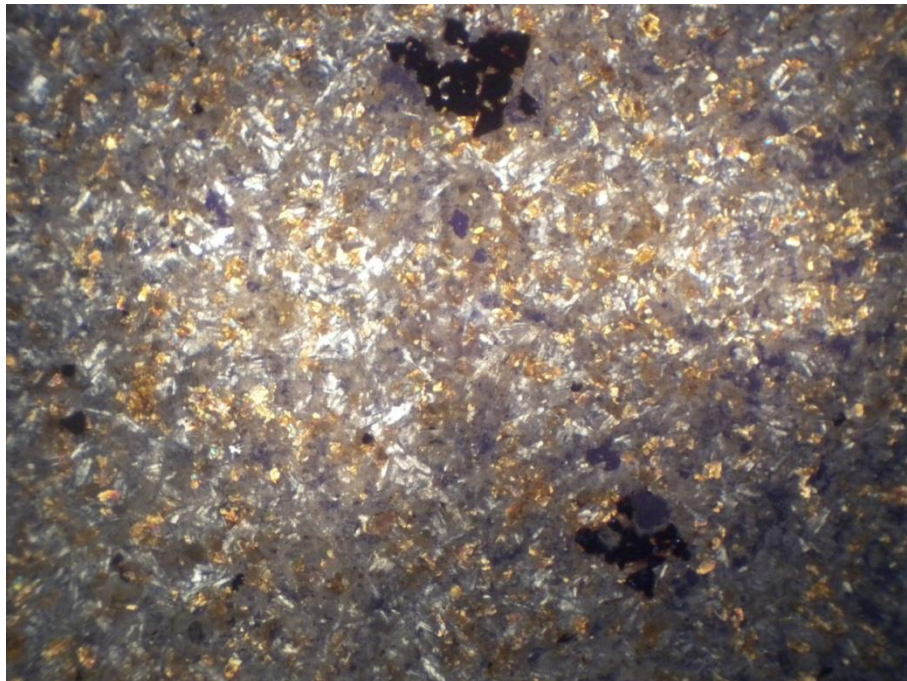
Sua composição apresenta plagioclásio e piroxênio com crescimento subofítico, opacos como fenocristal com bordas alteradas. Possui 55% de plagioclásio, 41% de piroxênios e 4% de opacos. É classificada como Basalto (rocha vulcânica básica).

Figura 4.8 – a) Rocha em amostra de mão e em b) foto obtida por lupa digital com aumento de 100 vezes



Fonte: Autor.

Figura 4.9 – Fotografia da lâmina da amostra SUL obtida do microscópio petrográfico (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes)

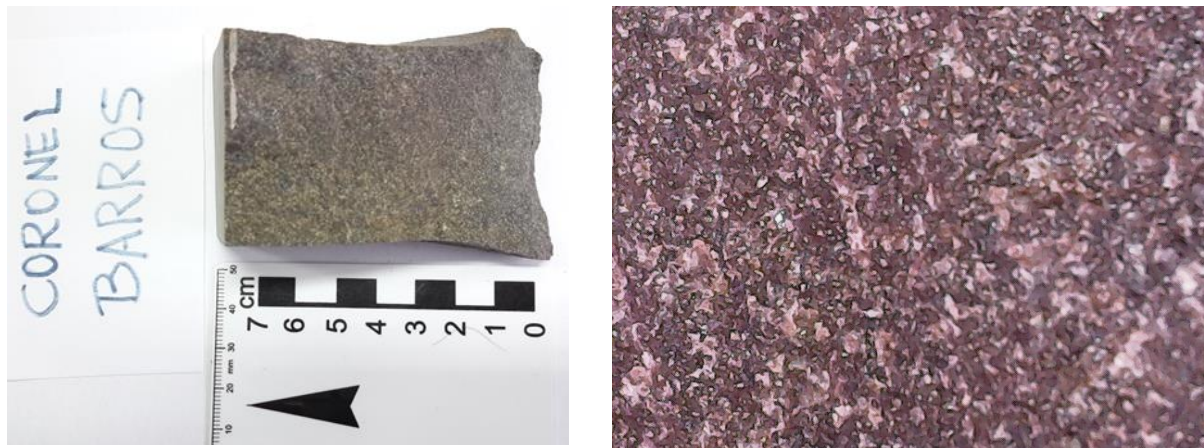


Fonte: Autor.

4.1.5. Jazida Paim (PAI)

A jazida PAI com cor cinza escuro quando seca apresenta manchas esbranquiçadas que podem ser fruto de desvitrificação da matriz e fraturas preenchidas por óxido de ferro. Possui textura afanítica a fanerítica muito fina (Figura 4.10a e 4.10b) com presença de amígdalas e vesículas orientadas segundo a direção de fluxo como pode ser observado na Figura 4.11.

Figura 4.10 – Em a), amostra de mão da jazida PAI e em b), foto de detalhe com o uso de lupa digital, aumento de 80 vezes



Fonte: Autor.

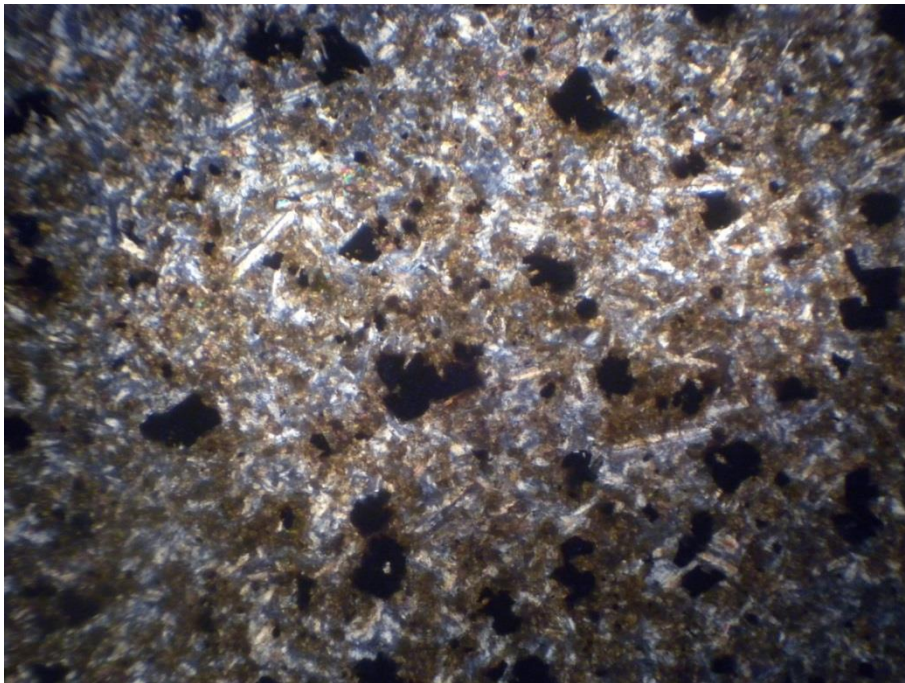
Figura 4.11 - Orientação de vesículas milimétricas indicando direção de fluxo na amostra da jazida PAI



Fonte: Autor.

Ao microscópio observa-se a presença de plagioclásio na forma de ripas, intercrescidos com piroxênio e minerais opacos (Figura 4.12). Possui textura microporfirítica de plagioclásio como microfenocristal com 54% de plagioclásio, aproximadamente 36% de piroxênio e 10% de minerais opacos. É classificada como Andesi-basalto (rocha vulcânica intermediária a básica).

Figura 4.12 – Fotografia da lâmina da amostra PAI obtida do microscópio petrográfico destacando ripas de plagioclásios intercrescidos com piroxênios e minerais opacos (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes)



Fonte: Autor.

4.1.6. Jazida Cotrel (COT)

A jazida COT com material de cor rosa claro quando seca a vermelho mais escuro quando molhada, apresenta alteração esverdeada a esbranquiçadas. Sua textura é fanerítica fina a média (Figura 4.13a e Figura 4.13b). Essa alteração está

relacionada ao fato da brita ser obtida de um *sill* que, pelo processo de resfriamento da lava, expõe muitas faces ao intemperismo.

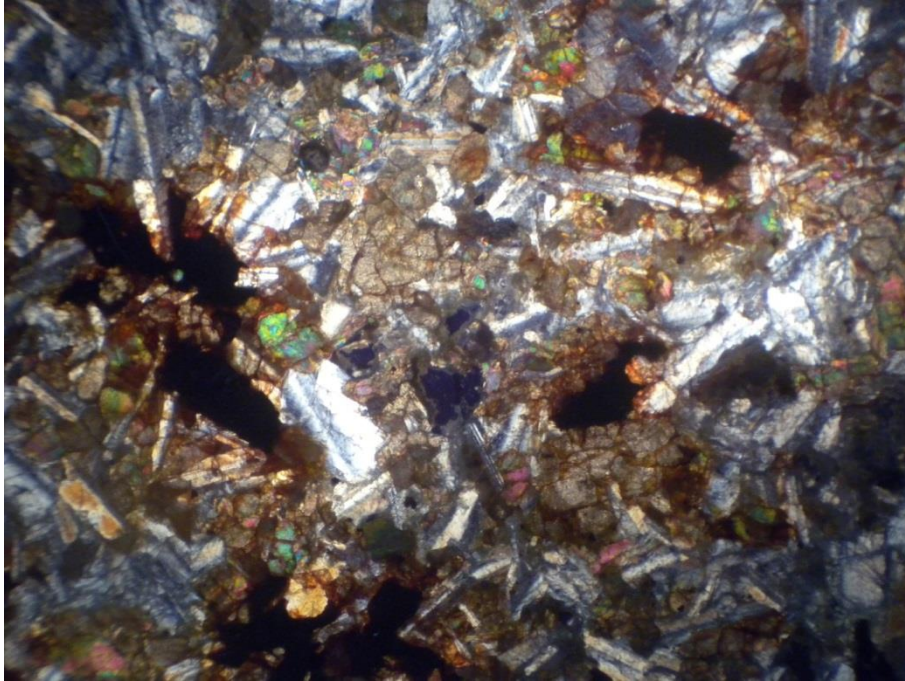
Figura 4.13 – a) Amostra de mão e em b) foto obtida de lupa digital com aumento de 100 vezes



Fonte: Autor.

A rochas da jazida COT é cristalina formada por plagioclásio e piroxênio. Possui textura fanerítica fina a média, com minerais pequenos, mas possível de enxergar a olho nu (Figura 4.14). Suas proporções mineralógicas são: 50% de plagioclásio, 44% de piroxênio e o restante de minerais opacos possuindo bordas liberando muito óxido de ferro. É classificada como Diabásio (rocha hipabissal básica).

Figura 4.14 – Fotografia da lâmina da amostra COT obtida do microscópio petrográfico destacando as ripas de plagioclásios e textura fanerítica fina a média (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes)



Fonte: Autor.

Após análise de todas as amostras, é possível separá-las em três grupos devido as suas semelhanças texturais e mineralógicas obtendo um grupo formado pela PIN, COM e DPA que possuem diferenças como as microfissuras visualizadas na amostra da PIN, a DPA possuindo menos minerais opacos de tamanhos menores com relação à COM, ambas apresentando menor porcentagem de desvitrificação com relação à PIN, outro grupo formado pela SUL e PAI e por fim a COT diferente das demais, as principais características verificadas após a análise das lâminas podem ser encontradas na Tabela 4.1 onde foi feito um resumo dos resultados encontrados para cada amostra.

Tabela 4.1 – Resumo da análise petrográfica.

Amostra	Textura	Minerais	Classificação
PIN	afanítica	40% feldspato; 32% quartzo; 20% piroxênios; 08% opacos	riodacito
COM	afanítica a fanerítica muito fina	38% feldspato; 30% quartzo; 22% piroxênios; 10% opacos	riodacito
DPA	afanítica a fanerítica muito fina	35% feldspato; 32% quartzo; 25% piroxênios; 08% opacos	riodacito
SUL	fanerítica muito fina	55% plagioclásio; 41% piroxênios; 04% opacos	basalto
PAI	afanítica a fanerítica muito fina	54% plagioclásio; 36% piroxênios; 10% opacos	andesi-basalto
COT	fanerítica fina a média	50% plagioclásio; 44% piroxênios; 06% opacos	diabásio

Fonte: Autor.

4.2. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A granulometria pode afetar importantes propriedades em uma mistura asfáltica, por exemplo: a permeabilidade, trabalhabilidade, rigidez, danos por umidade entre outros. Os resultados da análise granulométrica (média de duas determinações) estão apresentados da Tabela 4.2 a Tabela 4.7 seguidas de sua curva de distribuição.

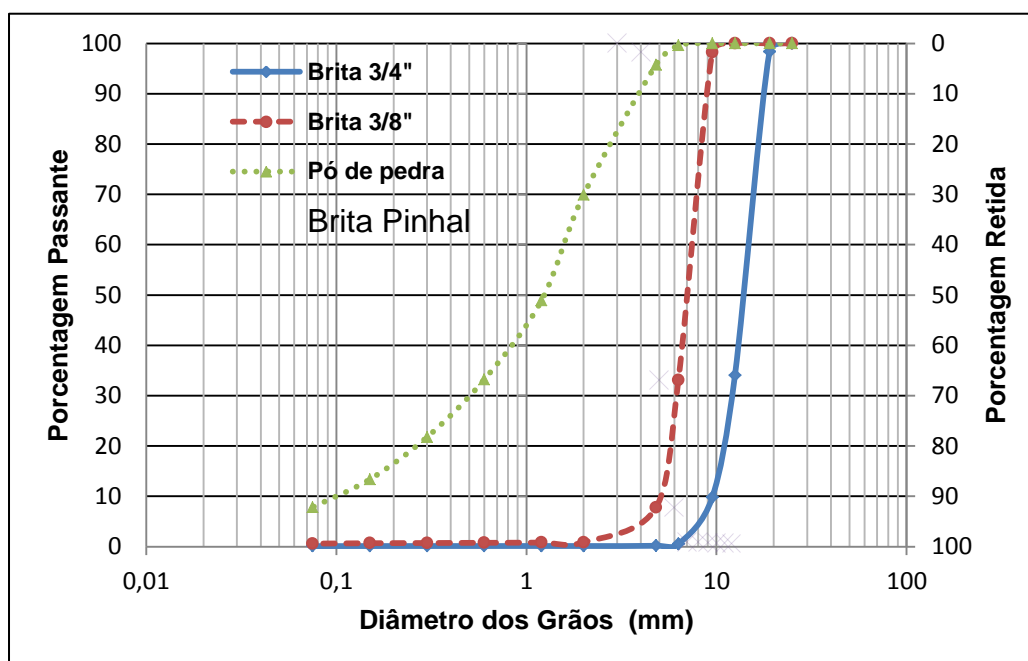
Verifica-se que as jazidas PIN, DPA, COM, SUL e PAI possuem diâmetro dos grãos representativos, com maiores porcentagens retidas acumuladas, aqueles compreendidos entre as peneiras 3/4" e 3/8" enquanto que a jazida COT varia entre a peneira 1/2" a 1/4" e, mesmo dentro desse intervalo de peneiras, para a jazida COT verifica-se uma distribuição mais equilibrada das porcentagens entre elas. Essas observações também são verificadas da Tabela 4.2 a Tabela 4.7 como se segue.

Tabela 4.2 – Características granulométricas dos materiais da brita PIN, porcentagem passante acumulada

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	98,36	100,00	100,00
1/2"	12,50	34,03	100,00	100,00
3/8"	9,50	9,79	98,23	100,00
1/4"	6,30	0,52	33,09	99,59
n 4	4,75	0,17	7,76	95,72
n 10	2,00	0,13	0,85	69,92
n 16	1,18	0,12	0,80	48,92
n 30	0,60	0,12	0,76	33,21
n 50	0,30	0,12	0,72	21,77
n 100	0,15	0,11	0,68	13,37
n 200	0,075	0,11	0,60	7,83

Fonte: Autor.

Figura 4.15 – Distribuição granulométrica do agregado de PIN



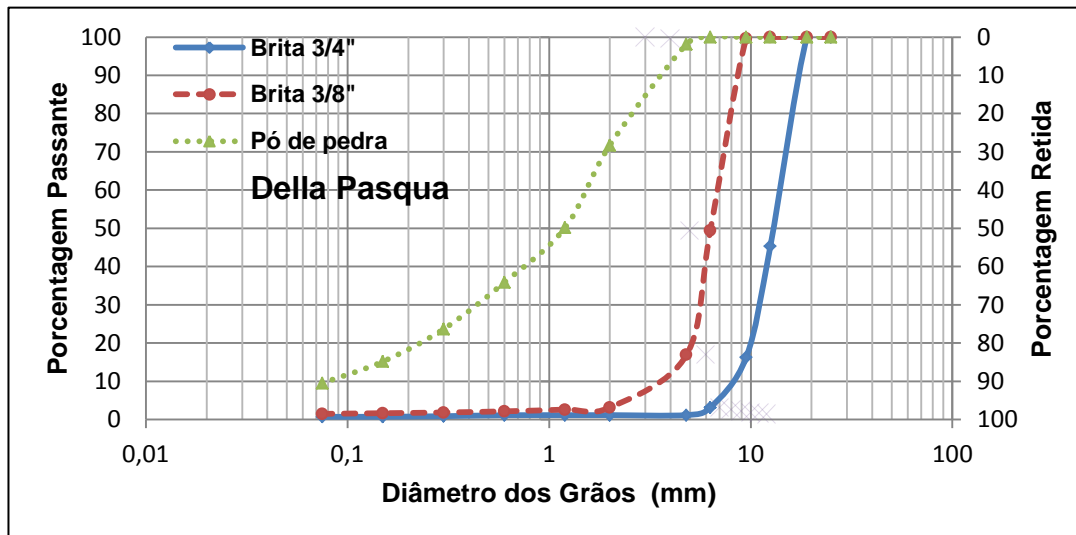
Fonte: Autor.

Tabela 4.3 – Características granulométricas dos materiais da brita DPA, porcentagem passante acumulada

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	99,92	100,00	100,00
1/2"	12,50	45,30	100,00	100,00
3/8"	9,50	16,32	99,64	100,00
1/4"	6,30	3,14	49,42	100,00
n 4	4,75	1,16	16,92	98,17
n 10	2,00	1,15	3,14	71,74
n 16	1,18	1,14	2,60	50,15
n 30	0,60	1,12	2,14	35,85
n 50	0,30	0,87	1,84	23,67
n 100	0,15	0,72	1,65	15,18
n 200	0,075	0,71	1,48	9,53

Fonte: Autor.

Figura 4.16 – Distribuição granulométrica do agregado de DPA



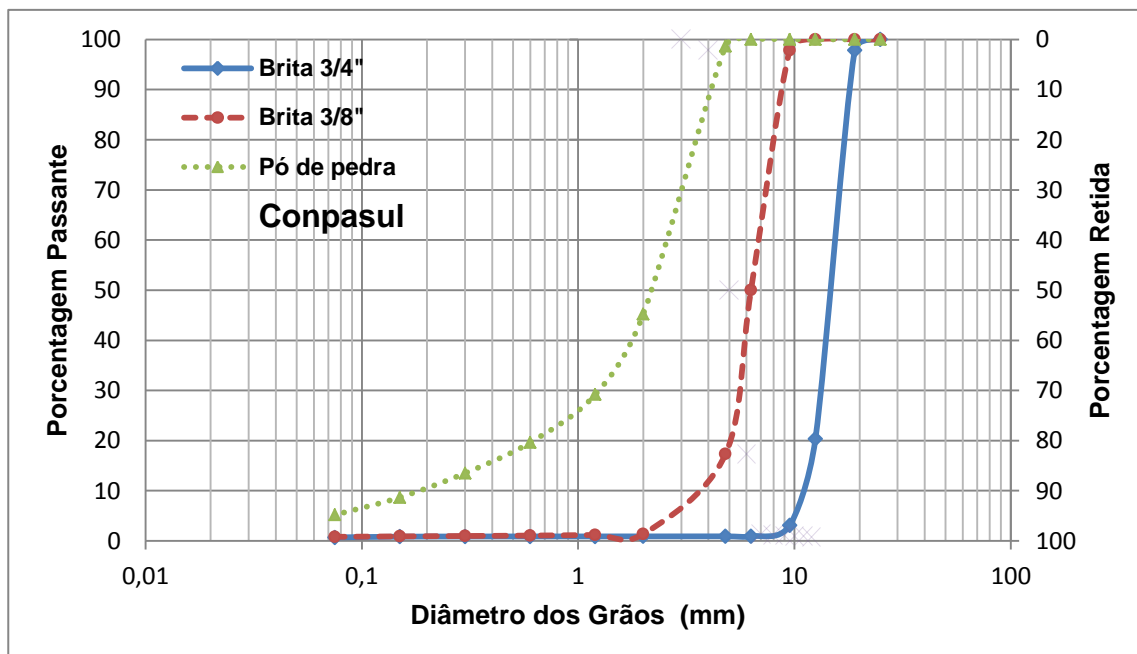
Fonte: Autor.

Tabela 4. 4 – Características granulométricas dos materiais da brita COM, porcentagem passante acumulada

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	97,85	100,00	100,00
1/2"	12,50	20,35	100,00	100,00
3/8"	9,50	3,09	97,83	100,00
1/4"	6,30	0,92	50,05	100,00
n 4	4,75	0,91	17,33	98,66
n 10	2,00	0,90	1,37	45,23
n 16	1,18	0,90	1,19	29,18
n 30	0,60	0,89	1,07	19,63
n 50	0,30	0,89	0,98	13,51
n 100	0,15	0,85	0,91	8,69
n 200	0,075	0,70	0,82	5,19

Fonte: Autor.

Figura 4.17 – Distribuição granulométrica do agregado de COM



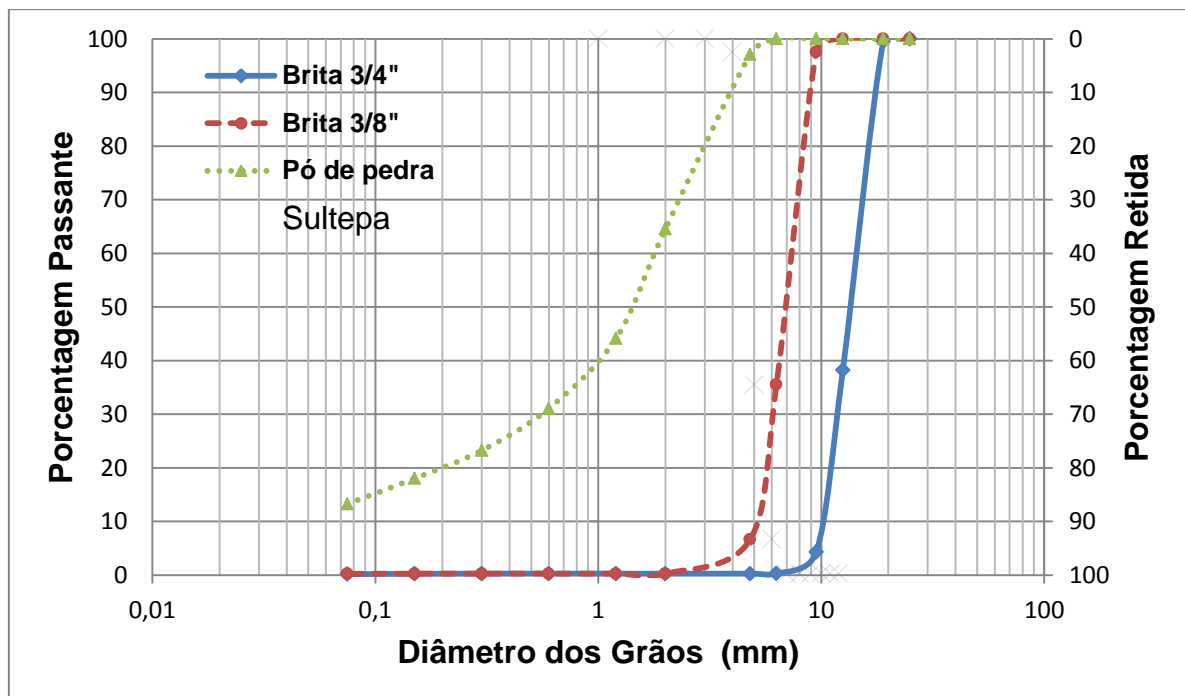
Fonte: Autor.

Tabela 4. 5 – Características granulométricas dos materiais da brita SUL, porcentagem passante acumulada

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	99,54	100,00	100,00
1/2"	12,50	38,24	100,00	100,00
3/8"	9,50	4,33	97,54	100,00
1/4"	6,30	0,29	35,55	100,00
n 4	4,75	0,28	6,66	97,10
n 10	2,00	0,28	0,29	64,56
n 16	1,18	0,28	0,29	44,10
n 30	0,60	0,28	0,29	31,09
n 50	0,30	0,28	0,28	23,25
n 100	0,15	0,25	0,28	18,02
n 200	0,075	0,18	0,26	13,30

Fonte: Autor.

Figura 4.18 – Distribuição granulométrica do agregado de SUL



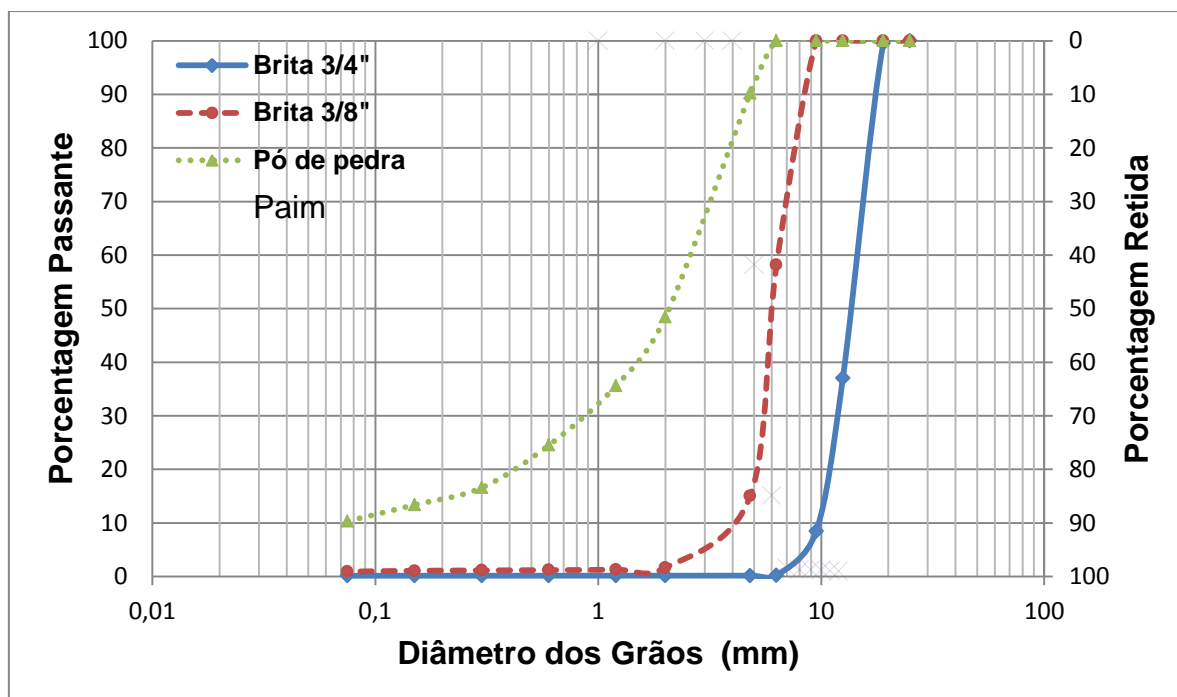
Fonte: Autor.

Tabela 4. 6 – Características granulométricas dos materiais da brita PAI, porcentagem passante acumulada

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	99,51	100,00	100,00
1/2"	12,50	37,03	100,00	100,00
3/8"	9,50	8,49	100,00	100,00
1/4"	6,30	0,23	58,17	100,00
n 4	4,75	0,18	15,03	90,17
n 10	2,00	0,17	1,64	48,42
n 16	1,18	0,17	1,30	35,58
n 30	0,60	0,16	1,21	24,51
n 50	0,30	0,16	1,15	16,59
n 100	0,15	0,16	1,08	13,38
n 200	0,075	0,16	0,93	10,34

Fonte: Autor.

Figura 4.19 – Distribuição granulométrica do agregado de PAI



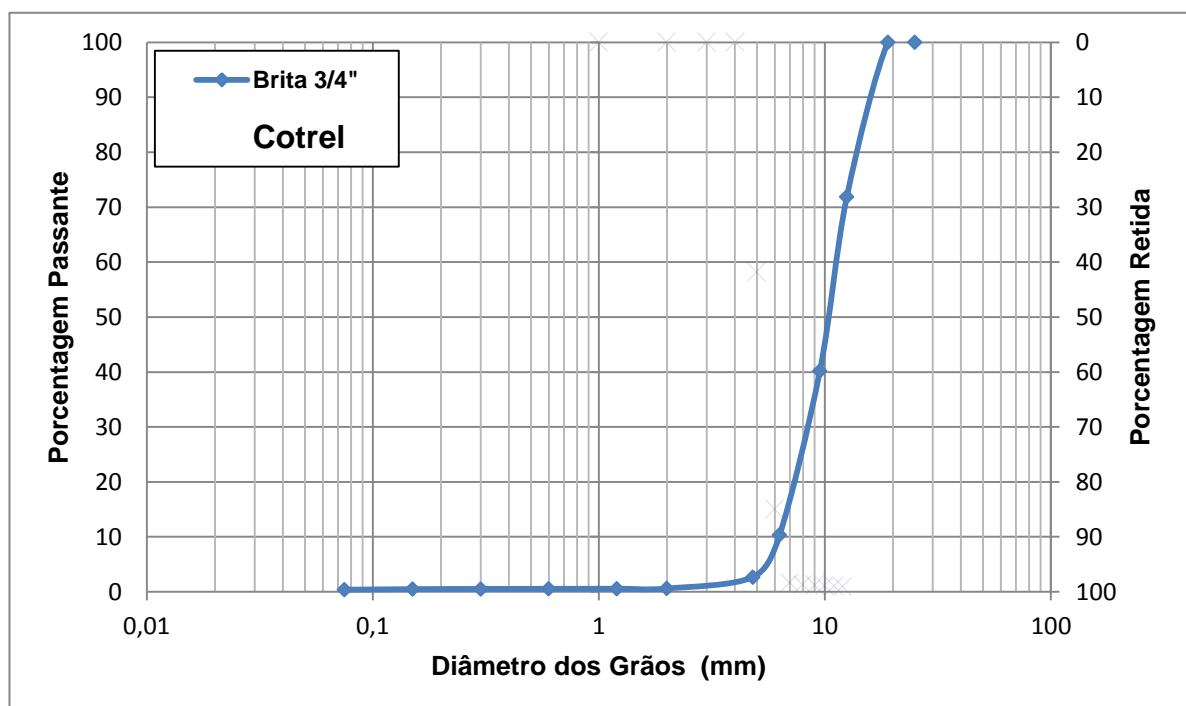
Fonte: Autor

Tabela 4. 7 – Características granulométricas dos materiais da brita COT, porcentagem passante acumulada

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,00	100,00	-	-
3/4"	19,00	100,00	-	-
1/2"	12,50	71,86	-	-
3/8"	9,50	40,19	-	-
1/4"	6,30	10,32	-	-
n 4	4,75	2,69	-	-
n 10	2,00	0,61	-	-
n 16	1,18	0,57	-	-
n 30	0,60	0,55	-	-
n 50	0,30	0,53	-	-
n 100	0,15	0,49	-	-
n 200	0,075	0,38	-	-

Fonte: Autor.

Figura 4.20 – Distribuição granulométrica do agregado de COT

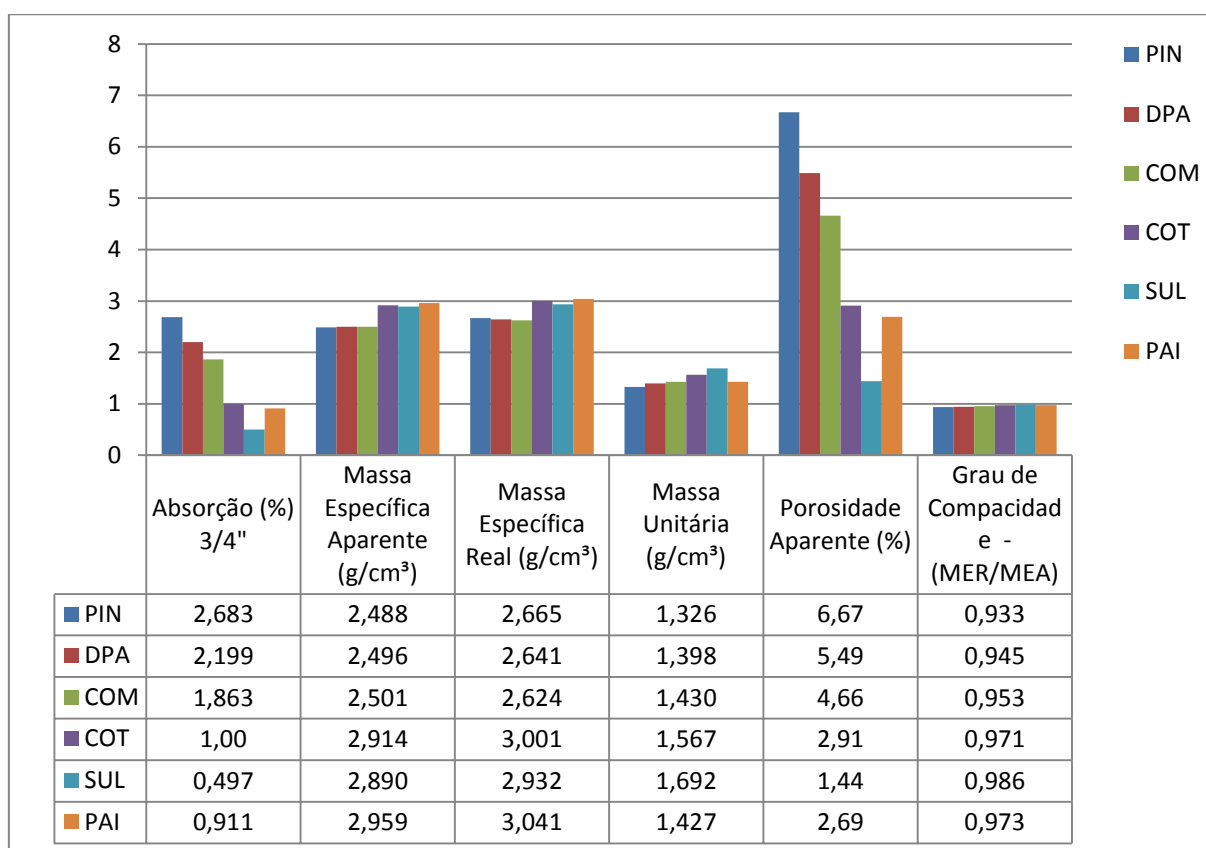


Fonte: Autor.

4.3. ÍNDICES FÍSICOS

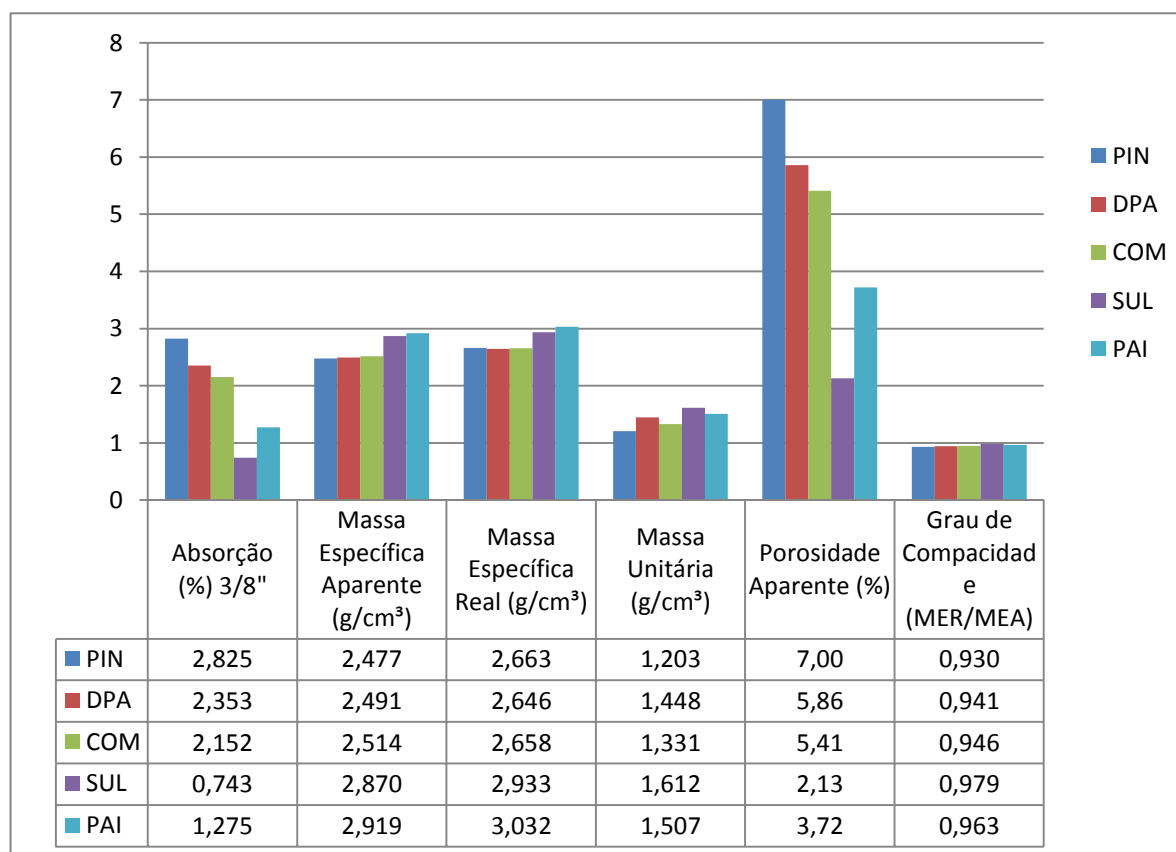
Nas Tabelas 4.8 e 4.9 abaixo, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física das rochas estudadas, junto a elas, podem ser observados os gráficos de barras representativos de cada índice variando de acordo com o resultado encontrado.

Tabela 4.8 – Resultado dos ensaios de absorção, massa específica aparente e massa específica real para as britas 3/4" de cada uma das jazidas estudadas.



Fonte: Autor.

Tabela 4.9 – Resultado dos ensaios de absorção, massa específica aparente e massa específica real para as britas 3/8” de cada uma das jazidas estudadas.



Fonte: Autor.

Os valores mais elevados de porosidade aparente (6,67%) e absorção (2,68%) foram encontrados na amostra PIN (riodacito) referente a presença de grande quantidade de amígdalas preenchidas por zeolitas e vesículas microscópicas além de microfraturas por vezes preenchidas por quartzo. A rocha da DPA apresenta desvitrificação de sua matriz com formação de argilo minerais o que justifica o valor também elevado de porosidade (5,49%) e absorção (2,20%). Todas as demais jazidas de riodacitos também apresentaram porosidade e absorção mais elevadas do que as demais rochas.

A massa específica aparente é condizente com a mineralogia e classificação da rocha. As rochas básicas como das jazidas SUL, COT e PAI compostas predominantemente por piroxênios (densidade entre 2,96 a 3,52) e plagioclásios

(densidade 2,62 a 2,76) deram valores mais elevados de M.E.A. (2,89 a 2,96). Já as rochas ácidas (riodacitos) compostas por quartzo (densidade 2,65) e feldspato (densidade 2,56 a 2,63) apresentaram valores mais baixos de M.E.A. (2,48 a 2,51). Esse fator também é observado nos valores encontrados para a massa específica do pó de pedra por meio do frasco de Chapman, conforme a tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Valores da massa específica do pó de pedra por meio do frasco de Chapman

Amostra	PIN	COM	DPA	SUL	PAI
Massa Específica (g/cm³)	2,628	2,626	2,647	2,928	3,02

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos com o ensaio para massa unitária apresentaram maiores valores para a jazida COT e SUL o que pode ser explicado pelo fato da brita da jazida COT ser lamelar, porém com granulometria bem graduada reduzindo o índice de vazios e a brita da jazida SUL, embora apresentando graduação mais irregular quando comparada com a COT tem a forma mais cúbica. A jazida PIN tem lamelaridade alta e apresenta baixos valores de M.U. (1,33 e 1,20), pois além de sua forma lamelar, ela também não é bem graduada.

4.4. FORMA DAS PARTÍCULAS

A forma do fragmento é influenciada pela estrutura da rocha e em menor grau pela textura além do processo de britagem. As rochas analisadas são predominantemente vulcânicas (riodacitos, andesibasaltos e basaltos) sendo apenas a rocha da Cotrel hipoabissal (diabásio) e, portanto, a forma esperada das partículas é lamelar. Jazidas como Della Pasqua, Conpasul e Sultepa apresentam formas mais cúbicas relacionadas ao beneficiamento, isto é, passaram por um processo de rebritagem para melhoria desse índice.

Pelo fato de serem vulcânicas e a lava, ao se deslocar propiciar o aparecimento de superfícies de cisalhamento, as formas esperadas são lamelares e alongadas, principalmente os fragmentos menores (3/8") confirmados nos ensaios de lamelaridade o que vem a corroborar FRAZÃO (2002).

As jazidas da PIN e COT apresentaram as maiores porcentagens de lamelaridade com 27,48% e 26,25% respectivamente na brita ¾ confirmado pela lamelaridade proposta nas propriedades SUPERPAVE para análise da forma com 18,71% e 21,35% além do Índice de Forma com o paquímetro com valores maiores do que 1,0 que é o limite indicativo da forma cúbica onde a PIN obteve valor de 3,09 e COT 3,18. Os valores encontrados no ensaio com o uso dos crivos também confirmam a lamelaridade das rochas para a PIN e COT, pois obtiveram menores valores sendo respectivamente 0,76 e 0,73. No item 4.10 deste estudo, são apresentados alguns valores de correlações entre os ensaios realizados e pode ser verificado que há uma boa correlação entre os diferentes métodos de determinação da forma dos agregados estudados.

Os índices que indicam a forma lamelar das rochas dessas duas jazidas são justificáveis por se tratar de rocha vulcânica (PIN) e pelo fato da COT ser proveniente de um *sill* que significa um derrame de pouca espessura e resfriamento muito rápido acentuando as discontinuidades (disjunções horizontais e verticais).

Embora as demais jazidas (DPA, COM, SUL e PAI) também sejam rochas vulcânicas os índices encontrados apresentam valores de crivo próximos de 1,0 e menores índices de lamelaridade (DPA= 11,88; SUL=5,58; COM= 6,83 e PAI= 14,5) indicando uma melhor cubicidade de suas partículas com relação a PIN e COT. Na jazida PAI, pelo fato da rocha apresentar superfície de fluxo seu índice de lamelaridade é mais elevado entre aquelas consideradas mais cúbicas.

Abaixo na Tabela 4.11 é apresentado um resumo com os índices encontrados para as jazidas analisadas nessa pesquisa e as Tabelas 4.12 e 4.13 exibem os resultados calculados com a proporção 3:1 e 5:1 das especificações SUPERPAVE. É importante destacar, segundo Gouveia e Júnior (2006), que o SUPERPAVE determina que se avalie a forma somente quanto a sua lamelaridade, com razão dimensional de 5:1, estabelecendo um limite máximo de 10% de partículas lamelares na produção de misturas asfálticas para pavimentos com volume de tráfego médio a alto ($N > 3 \times 10^6$). Ainda para o SUPERPAVE, Prowell *et al.* (2005)

em sua pesquisa ressalta que atualmente vários grupos de pesquisa , como o *The Stone Matrix Asphalt Technical Working Group*, vêm utilizando limites mais rigorosos, onde: o limite máximo para a razão de 5:1 é de 5% e de 20% para a razão de 3:1.

Tabela 4.11 - Avaliação da forma das partículas dos agregados pelo método do paquímetro, método com uso de crivos, pela placa de lamelaridade e pelo SUPERPAVE 5:1.

Jazida	BRITA	Paquímetro	Crivo	Lamelaridade (%)	Superpave lamelaridade (%)
PIN	3/4	3,09	0,76	27,48	18,81
	3/8	3,43	0,49	36,57	
DPA	3/4	2,09	0,91	11,88	4,31
	3/8	2,24	0,67	39,94	
COM	3/4	2,46	0,89	6,83	3,36
	3/8	2,47	0,62	36,75	
COT	3/4	3,18	0,73	26,25	21,35
SUL	3/4	2,00	0,91	5,56	2,53
	3/8	2,14	0,75	11,96	
PAI	3/4	2,49	0,86	14,50	7,51
	3/8	2,51	0,58	34,64	

Fonte: Autora

Tabela 4.12 - Porcentagem de partículas planas, alongadas, planas e alongadas, não planas ou alongadas - Proporção 3:1

Jazidas	ASTM D 4791 (%)			Superpave (%)	
	planas	alongadas	não planas ou alongadas	planas e alongadas (lamelares)	não lamelares
PIN	15,09	0,47	84,44	39,75	60,25
DPA	2,87	0,14	96,99	13,15	86,85
COM	2,11	0,00	97,89	14,70	85,30
COT	11,72	1,35	86,93	49,78	50,22
SUL	2,34	0,04	97,62	13,68	86,32
PAI	2,24	0,25	97,51	19,54	80,46

Fonte: Autora

Tabela 4.13 - Porcentagem de partículas planas, alongadas, planas e alongadas, não planas ou alongadas - Proporção 5:1

Jazidas	ASTM D 4791 (%)			Superpave (%)	
	planas	alongadas	não planas ou alongadas	planas e alongadas (lamelares)	não lamelares
PIN	4,49	0,00	95,51	18,81	81,19
DPA	1,40	0,00	98,60	4,31	95,69
COM	0,04	0,00	99,96	3,36	96,64
COT	6,29	0,00	93,71	21,35	78,65
SUL	0,68	0,00	99,32	2,53	97,47
PAI	0,91	0,00	99,09	7,51	92,49

Fonte: Autora

Os resultados de forma das partículas com a utilização do equipamento e software AIMS foram obtidos por meio da compilação da média da distribuição de valores encontrados para cada parâmetro, onde posteriormente é possível classificar o agregado conforme os valores sugeridos por Al-Rousan (2004) em sua pesquisa e, para fins de comparação, com os valores fornecidos pelo *software* do equipamento. Nas Tabelas 4.14 a 4.18 abaixo, podem ser verificados os resultados encontrados por tamanho dos grãos, os campos onde não há dados não havia frações para aquele tamanho, não sendo gerados parâmetros. Nestas tabelas são exibidos valores médios e seus respectivos desvios.

Tabela 4.14 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida PIN

Peneira	Parâmetro	¾"	3/8"	Pó de pedra	Média	Desvio Padrão	COV (%)
12,5mm	Esfericidade	-	-	-			
	Angularidade	-	-	-			
	Textura	-	-	-			
9,5mm	Esfericidade		0,59	-			
	Angularidade		3256,4	-			
	Textura		437,4	-			
4,75mm	Esfericidade	-	0,60	0,64	0,62	0,094	15,2
	Angularidade	-	3382,8	3328,4	3355,6	779,75	23,2
	Textura	-	379,7	415,9	397,8	67,25	16,9
2,36mm	Angularidade	-	3614,0	3505,0	3559,5	804,0	19,9
	Forma 2D	-	10,83	8,9	9,87	2,66	26,9
1,18mm	Angularidade	-	-	4024,9	4024,9	1010,6	25,1
	Forma 2D	-	-	9,0	9,0	2,3	25,6
0,60mm	Angularidade	-	-	4207,6	4207,6	1007,2	23,9
	Forma 2D	-	-	8,8	8,8	1,9	21,6
0,30mm	Angularidade	-	-	4719,3	4719,3	1372,6	29,1
	Forma 2D	-	-	9,1	9,1	2,6	28,6
0,15mm	Angularidade	-	-	3317,9	3317,9	1449,3	43,7
	Forma 2D	-	-	7,7	7,7	2,2	28,6
0,075mm	Angularidade	-	-	2069,0	2069,0	1211,6	58,6
	Forma 2D	-	-	8,5	8,5	2,2	25,9
Esfericidade	Média		0,595	0,640			
	Desvio Padrão		0,044	0,088			
	COV (%)		7,4	7,3			
Angularidade	Média		3496,7	3637,9			
	Desvio Padrão		776,8	1405,7			
	COV (%)		22,2	38,6			
Textura	Média		408,5	415,9			
	Desvio Padrão		77,1	71,6			
	COV (%)		18,9	17,2			
Forma 2D	Média	-	10,83	8,66	9,745		
	Desvio Padrão	-	3,11	2,3	2,71		
	COV (%)	-	28,7	26,6	27,8		

Fonte: Autor.

Tabela 4.15 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida DPA

Peneira	Parâmetro	¼"	3/8"	Pó de pedra	Média	Desvio Padrão	COV (%)
12,5mm	Esfericidade	0,77	-	-	0,77	0,08	10,4
	Angularidade	2921,4	-	-	2921,4	544,4	18,6
	Textura	341,5	-	-	341,5	72,4	21,2
9,5mm	Esfericidade	0,72	-	-	0,72	0,08	11,1
	Angularidade	2900,4	-	-	2900,4	598,3	20,6
	Textura	369,7	-	-	369,7	70,9	19,2
4,75mm	Esfericidade	-	0,804	-	0,804	0,086	10,7
	Angularidade	-	3088,1	-	3088,1	594,5	19,3
	Textura	-	370,0	-	370,0	81,5	22,0
2,36mm	Angularidade	-	3241,1	3259,0	3250,1	673,1	20,7
	Forma 2D	-	7,8	7,5	7,65	1,64	21,4
1,18mm	Angularidade	-	-	3372,7	3372,7	745,6	22,1
	Forma 2D	-	-	7,6	7,6	1,7	22,4
0,60mm	Angularidade	-	-	2610,4	2610,4	757,2	29,0
	Forma 2D	-	-	6,8	6,8	2,0	29,4
0,30mm	Angularidade	-	-	4017,1	4017,1	1089,8	27,1
	Forma 2D	-	-	7,8	7,8	1,7	21,8
0,15mm	Angularidade	-	-	3035,0	3035,0	1320,6	43,5
	Forma 2D	-	-	7,5	7,5	2,5	33,3
0,075mm	Angularidade	-	-	3064,8	3064,8	1395,9	45,5
	Forma 2D	-	-	8,9	8,9	2,6	29,2
Esfericidade	Média	0,745	0,804	-	0,775		
	Desvio Padrão	0,085	0,086	-	0,855		
	COV (%)	11,4	10,7	-	11,0		
Angularidade	Média	2910,8	3182,9	3240,3	3111,3		
	Desvio Padrão	572,1	672,5	1114,0	768,2		
	COV (%)	19,6	21,1	35,2	25,3		
Textura	Média	355,6	370,0	-	362,5		
	Desvio Padrão	73,0	81,5	-	77,3		
	COV (%)	20,5	22,0	-	21,3		
Forma 2D	Média	-	7,80	7,65	7,73		
	Desvio Padrão	-	1,68	2,11	1,90		
	COV (%)	-	21,5	27,6	24,5		

Fonte: Autor.

Tabela 4.16 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida COM

Peneira	Parâmetro	¾"	3/8"	Pó de pedra	Média	Desvio Padrão	COV (%)
12,5mm	Esfericidade	0,70	-	-	0,70	0,08	11,4
	Angularidade	2899,2	-	-	2899,2	583,1	20,1
	Textura	320,7	-	-	320,7	62,4	19,5
9,5mm	Esfericidade	0,66	0,70	-	0,68	0,09	13,2
	Angularidade	2905,6	2979,0	-	2942,3	595,15	20,2
	Textura	377,0	323,6	-	350,3	51,9	14,8
4,75mm	Esfericidade	-	0,70	-	0,70	0,10	14,3
	Angularidade	-	2951,6	-	2951,6	554,3	18,8
	Textura	-	336,7	-	336,7	47,9	14,2
2,36mm	Angularidade	-	3243,0	3261,7	3252,35	763,9	23,5
	Forma 2D	-	7,99	7,9	7,945	1,925	24,2
1,18mm	Angularidade	-	-	3322,1	3322,1	719,7	21,7
	Forma 2D	-	-	7,8	7,8	1,90	24,4
0,60mm	Angularidade	-	-	3665,5	3665,5	862,4	23,5
	Forma 2D	-	-	7,8	7,8	1,70	21,8
0,30mm	Angularidade	-	-	4408,2	4408,2	1079,1	24,5
	Forma 2D	-	-	7,4	7,4	1,90	25,7
0,15mm	Angularidade	-	-	3161,8	3161,8	1377,4	43,6
	Forma 2D	-	-	7,7	7,7	2,20	28,6
0,075mm	Angularidade	-	-	2035,4	2035,4	1008,0	49,5
	Forma 2D	-	-	8,1	8,1	2,00	24,7
Esfericidade	Média	0,681	0,72	-	0,70		
	Desvio Padrão	0,087	0,09	-	0,089		
	COV (%)	12,8	12,5	-	12,6		
Angularidade	Média	2902,4	3132,3	3320,1	3118,3		
	Desvio Padrão	584	700,8	1216,1	833,6		
	COV (%)	20,1	22,4	36,6	26,8		
Textura	Média	348,9	330,1	-	339,5		
	Desvio Padrão	66,5	47,3	-	56,9		
	COV (%)	19,1	14,3	-	16,8		
Forma 2D	Média	-	7,99	7,94	7,965		
	Desvio Padrão	-	1,75	1,99	1,87		
	COV (%)	-	21,9	25,1	23,5		

Fonte: Autor.

Tabela 4.17 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida SUL

Peneira	Parâmetro	¾"	3/8"	Pó de pedra	Média	Desvio Padrão	COV (%)
12,5mm	Esfericidade	0,76	-	-	0,76	0,09	11,8
	Angularidade	2855,4	-	-	2855,4	665,8	23,3
	Textura	481,1	-	-	481,1	110,0	22,9
9,5mm	Esfericidade	0,77	-	-	0,77	0,09	11,7
	Angularidade	2673,7	-	-	2673,7	573,8	21,5
	Textura	539,9	-	-	539,9	84,3	15,6
4,75mm	Esfericidade	-	0,805	0,825	0,815	0,078	9,6
	Angularidade	-	2759,0	2634,3	2696,7	708,2	26,3
	Textura	-	624,9	704,9	664,9	133,2	20,0
2,36mm	Angularidade	-	2765,4	3032,9	2899,2	721,55	24,9
	Forma 2D	-	7,38	7,5	7,44	1,895	25,5
1,18mm	Angularidade	-	-	3208,2	3208,2	865,5	26,9
	Forma 2D	-	-	8,1	8,1	2,3	28,4
0,60mm	Angularidade	-	-	2477,6	2477,6	897,3	36,2
	Forma 2D	-	-	6,5	6,5	1,8	27,7
0,30mm	Angularidade	-	-	4616,6	4616,6	1298,9	28,1
	Forma 2D	-	-	8,4	8,4	2,1	29,8
0,15mm	Angularidade	-	-	4247,7	4247,7	1561,9	36,8
	Forma 2D	-	-	8,4	8,4	2,5	29,8
0,075mm	Angularidade	-	-	3055,1	3055,1	1493,7	49,0
	Forma 2D	-	-	9,3	9,3	2,2	23,7
Esfericidade	Média	0,768	0,805	0,825	0,799		
	Desvio Padrão	0,087	0,074	0,081	0,081		
	COV (%)	11,3	9,2	9,8	10,1		
Angularidade	Média	2764,6	2763,8	3414,0	2980,8		
	Desvio Padrão	628,0	624,2	1394,4	882,2		
	COV (%)	22,7	22,6	40,8	29,6		
Textura	Média	510,5	624,9	704,9	613,4		
	Desvio Padrão	102,4	109,8	156,6	122,9		
	COV (%)	20,0	17,6	22,2	20,0		
Forma 2D	Média	-	7,38	8,01	7,695		
	Desvio Padrão	-	1,79	2,33	2,1		
	COV (%)	-	24,3	29,1	26,8		

Fonte: Autor.

Tabela 4.18 – Resultados do AIMS obtidos para o agregado da jazida PAI

Peneira	Parâmetro	¾"	3/8"	Pó de pedra	Média	Desvio Padrão	COV (%)
12,5mm	Esfericidade	0,69	-	-	0,69	0,09	13,0
	Angularidade	2803,6	-	-	2803,6	571,9	20,4
	Textura	515,9	-	-	515,9	115,2	22,3
9,5mm	Esfericidade	0,64	-	-	0,64	0,09	14,1
	Angularidade	2913,3	-	-	2913,3	623,6	21,4
	Textura	576,0	-	-	576,0	135,3	23,5
4,75mm	Esfericidade	-	0,61	0,68	0,645	0,10	15,5
	Angularidade	-	3164,1	3016,5	3090,5	740,15	23,9
	Textura	-	578,8	655,9	617,35	127,5	20,7
2,36mm	Angularidade	-	3259,2	3379,6	3319,4	771,65	23,2
	Forma 2D	-	8,7	8,4	8,55	2,35	27,5
1,18mm	Angularidade	-	3452,9	3511,2	3482,05	860,15	24,7
	Forma 2D	-	9,1	8,2	8,65	2,1	24,2
0,60mm	Angularidade	-	-	3910,5	3910,5	907,5	23,2
	Forma 2D	-	-	8,6	8,6	2,0	23,3
0,30mm	Angularidade	-	-	4800,8	4800,8	1403,0	29,2
	Forma 2D	-	-	8,4	8,4	1,9	22,6
0,15mm	Angularidade	-	-	3684,5	3684,5	1688,2	45,8
	Forma 2D	-	-	7,8	7,8	2,3	29,5
0,075mm	Angularidade	-	-	2932,4	2932,4	1434,2	48,9
	Forma 2D	-	-	8,7	8,7	2,3	26,4
Esfericidade	Média	0,664	0,61	0,68	0,651		
	Desvio Padrão	0,098	0,11	0,09	0,099		
	COV (%)	14,75	18,0	13,2	15,2		
Angularidade	Média	2858,4	3328,4	3688,60	3291,8		
	Desvio Padrão	600,8	812,4	1327,4	913,53		
	COV (%)	21,0	24,4	36,0	27,8		
Textura	Média	545,7	578,8	655,9	593,5		
	Desvio Padrão	129,1	126,1	128,9	128,0		
	COV (%)	23,7	21,7	19,6	21,6		
Forma 2D	Média	-	8,88	8,36	8,62		
	Desvio Padrão	-	2,36	2,12	2,24		
	COV (%)	-	26,6	25,4	26,0		

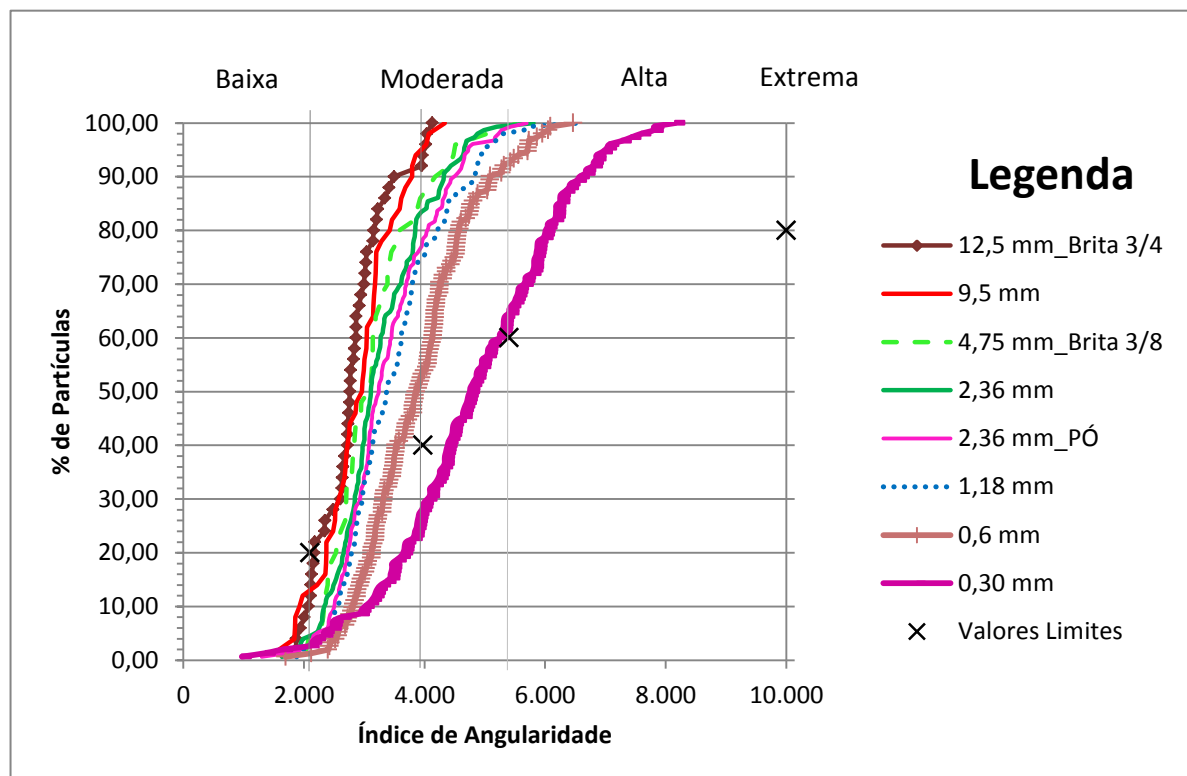
Fonte: Autor.

O software fornece tanto valores numéricos (como aqueles apresentados anteriormente) quanto representações gráficas com a distribuição dos resultados encontrados. Foi tomado como modelo a jazida PAI para apresentação das curvas geradas, nelas podem ser observados os índices de angularidade para o agregado

graúdo e miúdo, índice de esfericidade para o agregado graúdo, forma 2D para o agregado miúdos e as relações de partículas achatadas e alongadas.

Sabe-se que a angularidade é definida pelo número de arestas e vértices acentuados que as partículas possuem assim, quanto maiores a dimensões dos minerais a rocha possuir, mais rugosidade em sua superfície após o processo de britagem ela irá apresentar confirmado em Fernandes e Domigues (1998). Essa propriedade tem influência na trabalhabilidade das misturas e na estabilidade das partículas determinada pelo atrito entre elas. No gráfico abaixo representado na Figura 4.21 nota-se o aumento da angularidade à medida que o tamanho das partículas é reduzido.

Figura 4.21 – Representação gráfica da distribuição da angularidade das diferentes partículas da jazida PAI

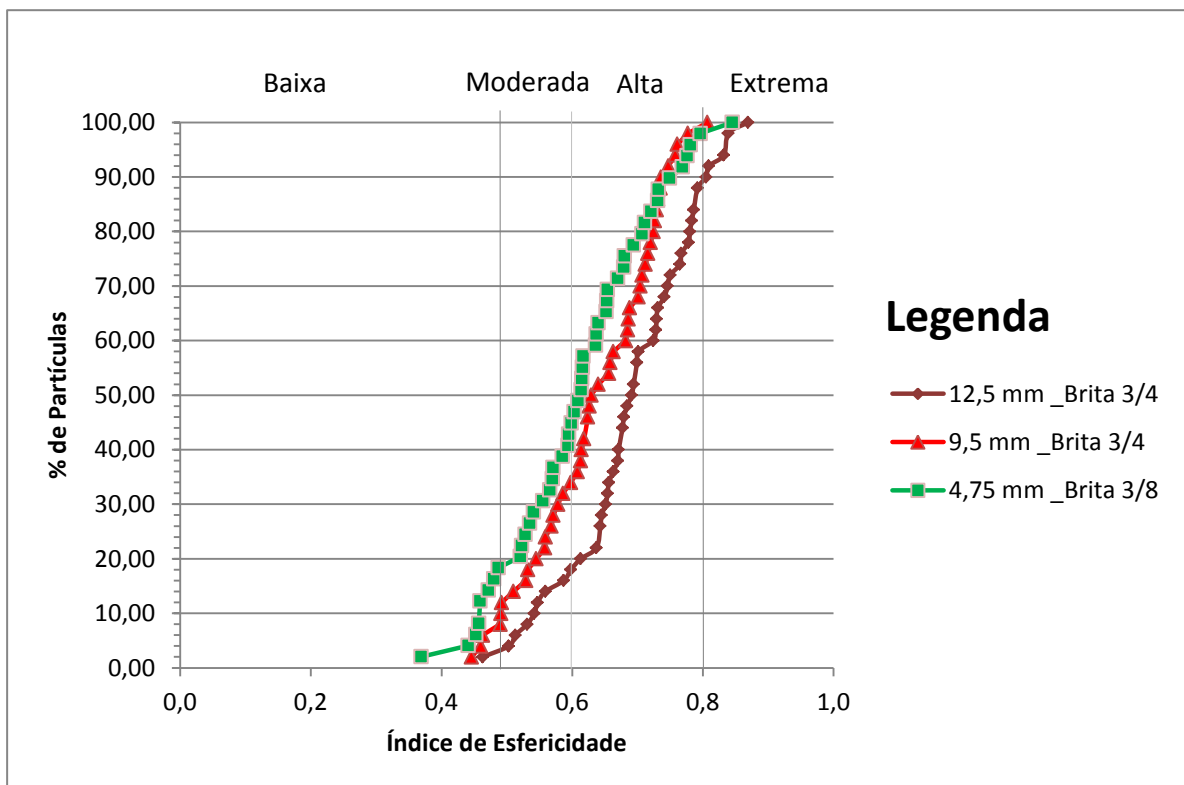


Fonte: Autor.

É importante destacar a diferença entre a angularidade e a esfericidade nas partículas, pois são propriedades distintas. A esfericidade está relacionada com a forma do grão onde ele pode ter uma aparência de dimensões mais próximas

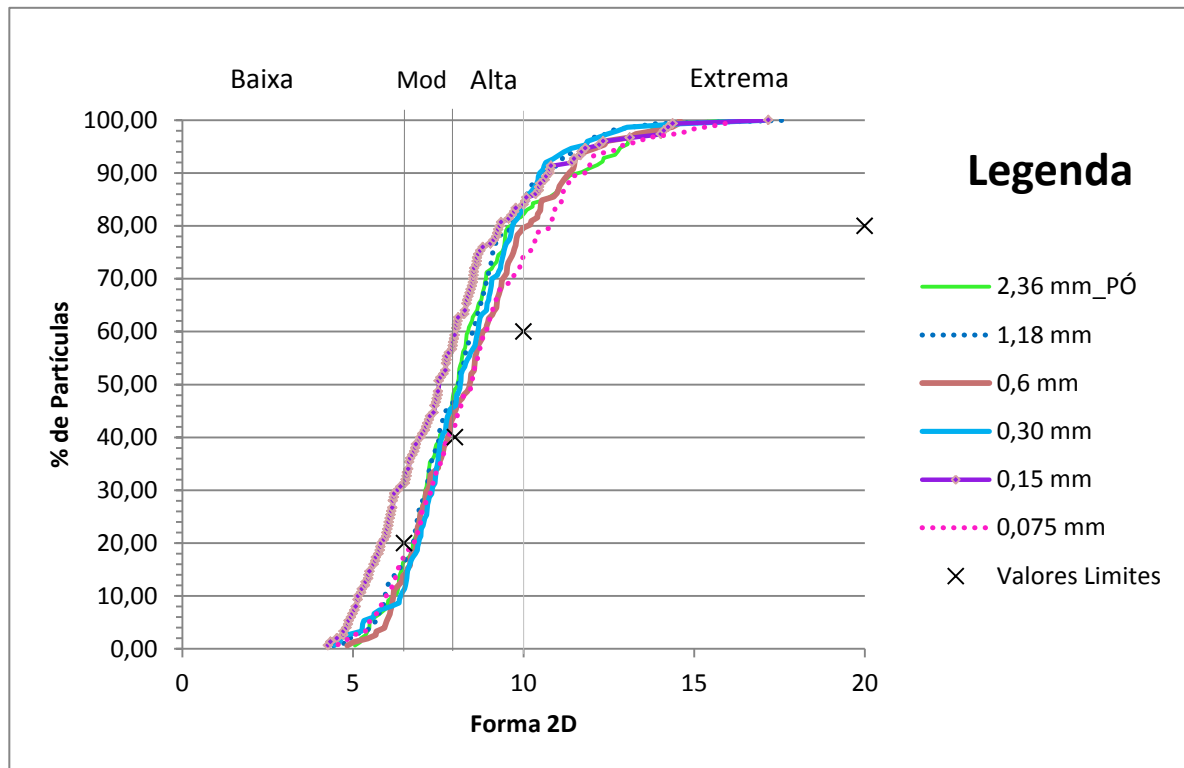
variando de cubos a esferas ou pode parecer visualmente com um prisma retangular, já a angularidade e textura dão aspecto à superfície da partícula e varia de lisa ou arredonda a uma superfície muito angular e/ou texturizada. Na Figura 4.22 a seguir observa-se a variação do índice de esfericidade para a brita $\frac{3}{4}$ e $\frac{3}{8}$ da jazida PAI e na Figura 4.23 está a distribuição da forma 2D para as partículas do pó da mesma jazida.

Figura 4.22 – Representação gráfica da distribuição esfericidade das diferentes partículas da jazida PAI



Fonte: Autor.

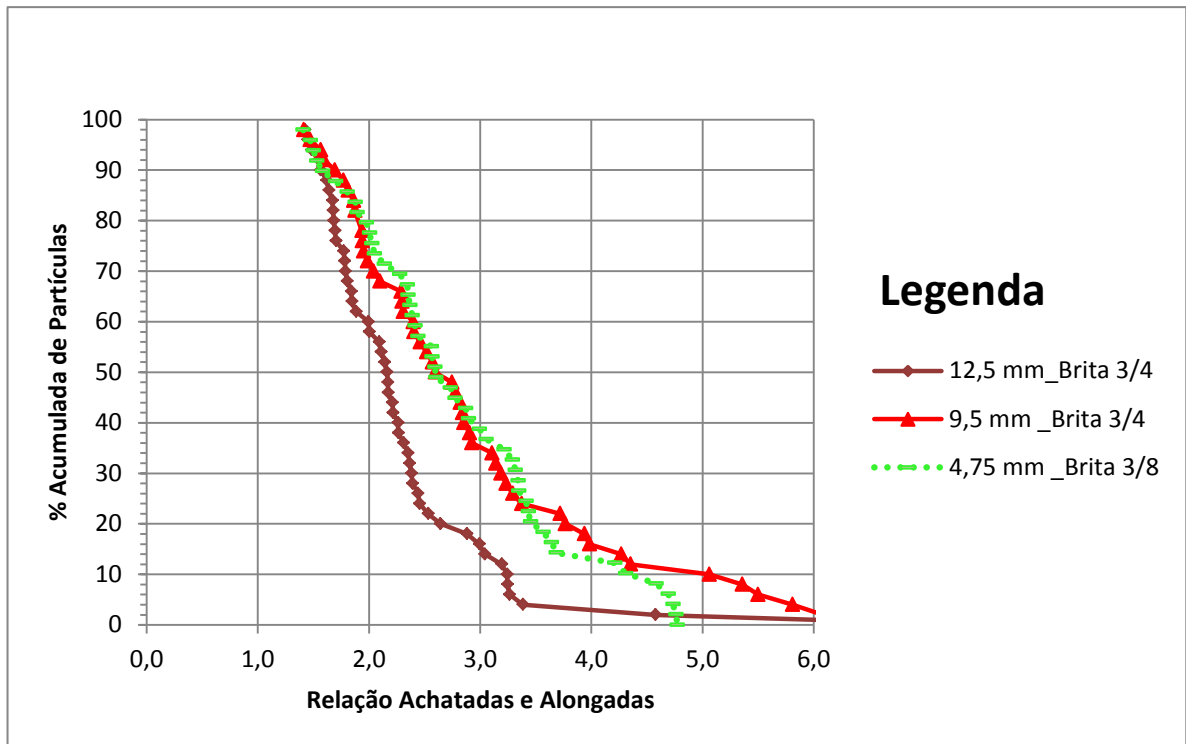
Figura 4.23 – Representação gráfica da distribuição da forma 2D das diferentes partículas da jazida PAI



Fonte: Autor.

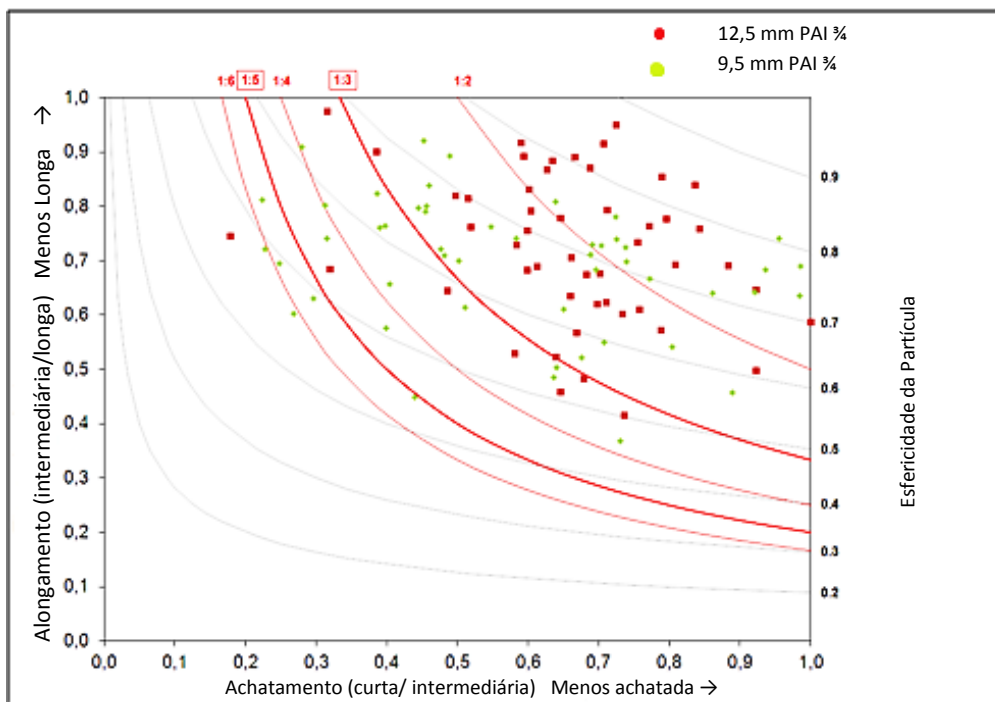
Para as proporções de partículas achatadas e alongadas, são apresentadas as figuras com representações gráficas dos resultados obtidos para o agregado da jazida PAI para as britas 3/4" e 3/8" onde pode ser observado o destaque para as proporções 5:1 e 3:1 das especificações SUPERPAVE. A Figura 4.24 exhibe na forma de distribuição a relação achatamento e alongamento por partículas e os ábacos das Figuras 4.25 e 4.26 mostram os valores representativos para cada proporção e partícula podendo ser verificado a concentração das partículas pelas proporções verificadas pelo equipamento. A Figura 4.27 apresenta os valores obtidos da jazida SUL para a brita 3/8 onde se observa a concentração das partículas abaixo da proporção 1:3 indicando um índice de achatamento e alongamento menor com relação à brita 3/8 da jazida PAI condizente com o método do calíper adotado nesta pesquisa onde os resultados foram anteriormente apresentados nas Tabelas 4.12 e 4.13.

Figura 4.24 – Representação gráfica da relação achatamento e alongamento para a jazida PAI



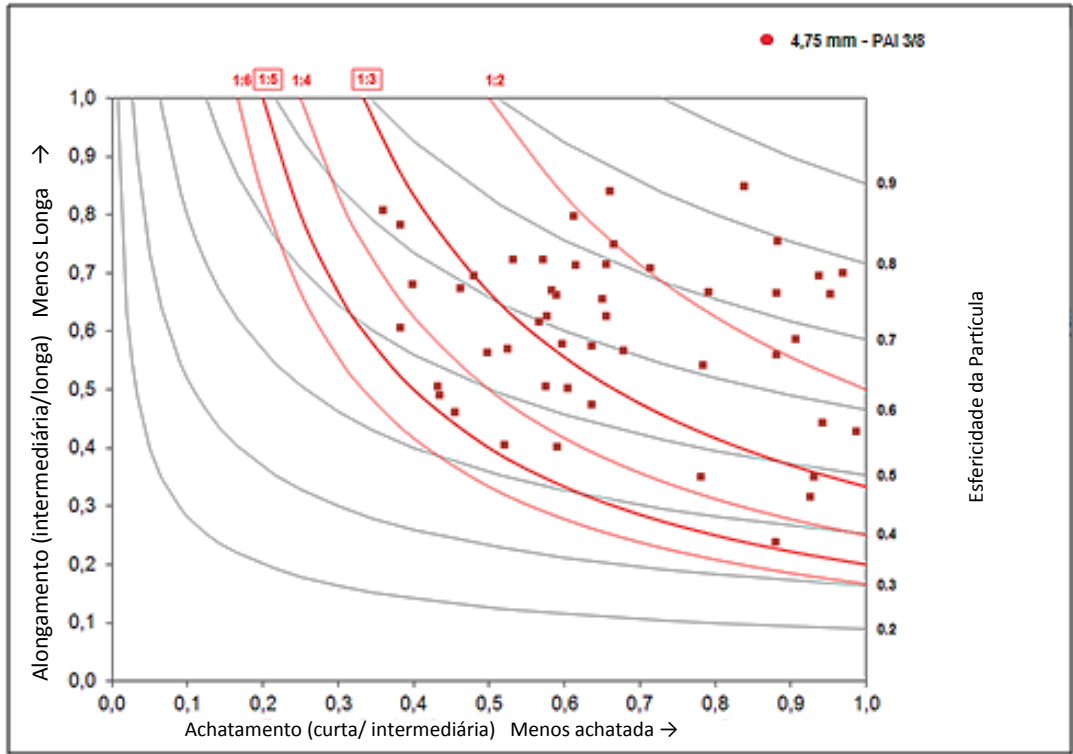
Fonte: Autor.

Figura 4.25 – Proporção partículas achatadas / alongadas para brita ¾ da jazida PAI



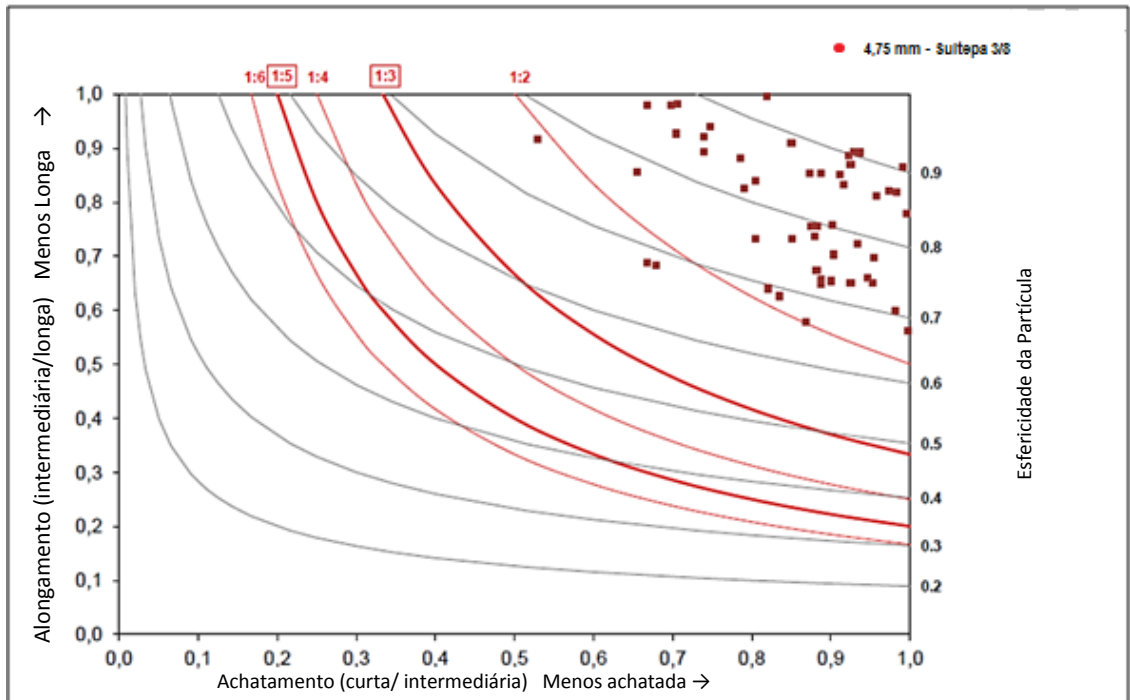
Fonte: Autor.

Figura 4.26 – Proporção partículas achatadas / longadas para brita 3/8 da jazida PAI



Fonte: Autor.

Figura 4.27 – Proporção partículas achatadas/alongadas da brita 3/8 da jazida SUL



Fonte: Autor.

A tabela 4.19 e a tabela 4.20 mostram os valores compilados para cada parâmetro de cada jazida e junto ao resultado encontra-se também o intervalo de classificação adotado por Al Rousan, (2004) na tabela 4.19 e aquele sugerido pelo software (na tabela 4.20).

Tabela 4.19 – Classificação dos agregados avaliados, valores propostos por Al Rousan

Jazida	Esferecidade	Angularidade	Textura Superficial	Forma 2D
PIN	Baixa (0,6-0,7)	Subarredondado (2100 - 4000)	Rugosidade moderada (350 - 460)	Semi alongado (8,0 - 10,5)
	0,6175	3567,3	412,2	9,75
DPA	Moderada (0,7-0,8)	Subarredondado (2100 - 4000)	Rugosidade moderada (350 - 460)	Semicircular (6,5 - 8,0)
	0,775	3111,3	362,5	7,73
COM	Baixa (0,6-0,7)	Subarredondado (2100 - 4000)	Baixa rugosidade (275 - 350)	Semicircular (6,5 - 8,0)
	0,700	3118,3	339,5	7,97
COT	-	-	-	-
SUL	Moderada (0,7-0,8)	Subarredondado (2100 - 4000)	Alta rugosidade (> 460)	Semicircular (6,5 - 8,0)
	0,799	2980,8	613,4	7,70
PAI	Baixa (0,6-0,7)	Subarredondado (2100 - 4000)	Alta rugosidade (> 460)	Semi alongado (8,0 - 10,5)
	0,651	3291,8	593,5	8,62

Fonte: Autora

Tabela 4.20 – Classificação dos agregados avaliados, valores do software do equipamento

(continua)

Jazida	Esferecidade	Angularidade	Textura Superficial	Forma 2D
PIN	Alta (0,6-0,8)	Moderada (2100 - 3975)	Moderada (200-500)	Alta (8 - 10,75)
	0,6175	3567,3	412,2	9,75

DPA	Alta (0,6-0,8)	Moderada (2100 - 3975)	Moderada (200-500)	Moderada (6,5- 8,0)
	0,775	3111,3	362,5	7,73
COM	Alta (0,6-0,8)	Moderada (2100 - 3975)	Moderada (200-500)	Moderada (6,5- 8,0)
	0,700	3118,3	339,5	7,97
COT	-	-	-	-
SUL	Alta (0,6-0,8)	Moderada (2100 - 3975)	Alta (500-750)	Moderada (6,5- 8,0)
	0,799	2980,8	613,4	7,70
PAI	Alta (0,6-0,8)	Moderada (2100 - 3975)	Alta (500-750)	Alta (8 - 10,75)
	0,651	3291,8	593,5	8,62

Fonte: Autora

Como observado nos quadros acima, caso o agregado fosse classificado segundo os intervalos de valores sugeridos pelo software do equipamento, a única propriedade que apresentaria diferença entre as jazidas estudadas seria a textura superficial onde os materiais classificados como riodacitos (PIN, DPA e COM) apresentaram textura mais baixa com relação aos demais materiais que apresentaram textura superficial mais alta, condizente com a textura verificada nas lâminas petrográficas estudadas e descritas no item 4.1. Também seria verificada diferença na classificação da forma 2D para o agregado miúdo que teve variação nos índices de 9,75 para a jazida PIN a 7,70 para a jazida SUL.

Adotada a classificação com valores propostos por Al-Rousan (2004), a diferença entre as jazidas aparecem também para o parâmetro esfericidade que avalia o quanto as partículas se aproximam da forma cúbica quando seu valor se aproxima de um. Assim é possível observar que a jazida que possui as partículas menos cúbicas é a jazida PIN. Com relação à jazida COT, não foi possível a realização do processamento de imagens da requisição para realização do mesmo no laboratório externo ao local de estudo dos demais ensaios, por ter sido requisitado em tempos diferentes das demais amostras em um período de extrema demanda.

4.5. DURABILIDADE AO EMPREGO DE SOLUÇÃO DE SULFATO DE SÓDIO

O procedimento de cálculo da perda de massa no ensaio de resistência à desintegração dos agregados sujeitos a ação do tempo por meio de solução saturada de sulfato de sódio foi feito para cada uma das frações determinadas pelo método corrigindo-as, de forma ponderada, para a curva granulométrica do material de cada jazida. Assim multiplicada a perda de cada uma das frações ensaiadas pelo seu correspondente fator de ponderação, o somatório das perdas de cada uma das frações representa o valor da perda no ensaio.

A maior perda de massa da fração grossa encontrada foi para a jazida COT (16,53%) enquanto a menor perda foi observada na jazida DPA (0,66%). A maior perda encontrada para o agregado na parte fina do material ficou com a jazida PIN (8,39%) e a menor perda foi observada na jazida COM (3,71%). Na Tabela 4.21 podem ser observados os valores encontrados para o ensaio de sanidade com todas as jazidas estudadas nessa pesquisa

Tabela 4.21 – Resultados encontrados após ensaio de sanidade com uso de solução de sulfato de sódio.

Jazida	Sanidade fração graúda (%)	Sanidade fração miúda (%)	Sanidade Ponderada
PIN	4,56	8,39	12,94
COM	2,10	3,71	5,81
DPA	0,66	5,61	6,27
SUL	5,51	4,56	10,07
PAI	3,12	5,31	8,43
COT	16,53	-	16,53

Fonte: Autor.

A perda no ensaio de sanidade com sulfato de sódio foi calculada pelos métodos do DNER e DAER/RS e na tabela 4.22 são apresentadas as especificações exigidas para cada tipo de aplicação do agregado.

Tabela 4.22 – Limites especificados para perda de material após realização de ensaio de durabilidade em ciclos de molhagem e secagem com aplicação de solução de sulfato de sódio.

Especificação	Aplicação	Valores limites
DNIT ES 31/06	Pavimentos flexíveis	≤ 12%
DNIT ES 152/10	Macadame hidráulico	≤ 20%
DAER ES-P 08/91	Base granular	≤ 10%
DAER ES-P 15/91	Tratamento superficial duplo	≤ 10%
DAER ES-P 16/91	Concreto asfáltico	≤ 10%

Fonte: Autor.

4.6. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

A perda de massa por esmagamento foi maior para rochas com valores de lamelaridade elevada como a PIN E COT (15,60% e 20,46% de perda respectivamente) conforme a Tabela 4.23, isso se deve ao fato de que partículas lamelares permitem uma maior quantidade de vazios e possibilitam que as partículas se quebrem e se reorganizem durante o esmagamento. Da observação da Tabela 4.23 e Tabela 4.24, pode-se afirmar que as seis jazidas estudadas estão dentro dos limites de aceitação estabelecidos pelas especificações de materiais do DNIT (DNIT EM 37/97) onde são determinados valores para pavimento rígido com materiais sujeitos a desgaste superficial no máximo de 65% e, para demais concretos 55%.

Tabela 4.23 – Resultado dos ensaios de caracterização para as britas tamanho 3/8 de cada uma das jazidas estudadas.

Amostra	Perda por atrito - Abrasão Los Angeles (%)	Perda por Esmagamento (%)	Perda Devido ao Choque - Treton (%)
PIN	13,86	15,60	7,48
COM	13,97	12,26	10,19
DPA	10,05	13,17	4,66

SUL	12,54	9,34	5,80
PAI	8,67	9,35	4,25
COT	18,71	20,46	16,63

Fonte: Autor.

Tabela 4.24 – Valores especificados para o ensaio de perda de massa por esmagamento.

Especificação	Aplicação	Valores limites
DNIT EM 37/97	Pavimentos rígidos	≤ 55%

Fonte: Autor.

O resultado do ensaio de perda ao choque no aparelho Treton também pode ser observado na tabela 4.23. A perda de massa devido ao choque tem menor valor quanto menor for à geração de finos durante a aplicação do choque e seus valores de aceitação não são especificados quando se trata de agregados para pavimento, no entanto, quando se refere a lastro ferroviários, a perda de massa não deve ultrapassar o valor de 25%.

Ainda de acordo com os resultados obtidos, têm-se as maiores perdas encontradas choque na jazida COT (16,63%) e COMP (10,19%) seguida da PIN (7,48%) ainda assim ficando dentro do grupo dos riadacitos. Isso ocorre devido a jazida COT apresentar uma textura mais grosseira (fanerítica fina) em que seus minerais embora possuam maior dureza apresentem menor resistência a quebra causada por choques e grande lamelariade em seus grãos. Já a jazida PIN além de também apresentar grande lamelaridade, possui em sua estrutura a presença de micro amígdalas (espaços vazios) preenchidas por minerais (zeólitas) de baixa tenacidade.

A maior perda de massa obtida após ensaio de abrasão foi com a jazida COT (18,71%). Também é possível observar que, com exceção da jazida COT, as demais jazidas obtiveram perdas semelhantes entre si, principalmente as pertencentes ao grupo do riadacito como a DPA, PIN e COM com perdas de 10,05%, 13,86% e 13,97% respectivamente.

O DNIT especifica a perda máxima no ensaio por abrasão Los Angeles sendo 55% em base estabilizada granulometricamente, 50% para pavimentos flexíveis, 50% para pavimento rígido e 50% para macadame hidráulico. Também são verificados valores limites adotados pelo DAER onde se tem valor máximo para pavimento flexível e tratamento superficial duplo ambos de 40% como pode ser observado na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Valores especificados para o ensaio de desgaste por atrito com uso do aparelho para Abrasão Los Angeles.

Especificação	Aplicação	Valores limites
DNIT ES 303	Base estabilizada granulometricamente	≤ 55%
DNIT ES 31/06	Pavimentos flexíveis	≤ 50%
DNIT EM 37/97	Pavimentos rígidos	≤ 50%
DNIT ES 152/10	Macadame hidráulico	≤ 50%
DAER ES-P 15/91	Tratamento superficial duplo	≤ 40%
DAER ES-P 16/91	Pavimento flexíveis	≤ 40%

Fonte: Autor.

Com relação aos ensaios apresentados, Alves et al. (2015) estudou o comportamento de agregados por técnicas digitais de imagens antes e após a realização de ensaios de desgaste mecânico e constatou que no Treton há uma produção, após o ensaio, de agregados com tendência mais rugosa devido a quebra das partículas pelo impacto concentrado, enquanto no ensaio de abrasão, o impacto que as partículas sofrem é causado pelo choque entre elas e das esferas dentro do cilindro ocorrendo uma maior produção de finos, verificada também aqui, devido a maior agressividade e também devido o fato de que o novo material originado é formado por quebra de arestas do material original.

4.7. COMPRESSÃO PUNTIFORME (UNIAXIAL)

O ISRM recomenda que seja considerada, para o cálculo do índice de resistência a compressão puntiforme, somente as amostras que tenham sido rompidas com plano de ruptura seguindo a direção transversal do bloco.

Assim, ao se analisar os fragmentos de rocha rompidos, constatou-se que alguns blocos com maior oxidação interna tiveram ora descontinuidades em seus planos de ruptura ora variação significativa em sua resistência a compressão afastando alguns pontos da análise. Devido a essa observação, foi feita análise da influência desses pontos no valor médios das amostras e aqueles cujos valores se afastaram consideravelmente da média, foram descartados.

Os valores do índice de resistência à compressão puntiforme, obtidos para amostras na condição secas ao ar e saturadas, são apresentados na tabela 4.26 juntamente com a razão feita entre eles.

Tabela 4.26 – Resultado dos ensaios de caracterização para as britas tamanho 3/8 de cada uma das jazidas estudadas.

Jazidas	Índice de Compressão Pontual (Mpa)		
	$IS_{(50)} - \text{seco}$	$IS_{(50)} - \text{saturado}$	$IS_{(50)} - \text{sec} / IS_{(50)} - \text{sat}$
PIN	5,66	5,28	1,072
COM	6,80	6,63	1,026
DPA	6,46	5,79	1,116
SUL	8,26	7,18	1,150
PAI	10,38	9,28	1,119
COT	7,81	6,75	1,157

Fonte: Autor.

Para as amostras de mesma jazida, submetidas às mesmas condições de umidade e aplicação de carga, a explicação para as altas discrepâncias entre valores pode ser devida a aplicação da carga de ruptura na direção perpendicular as direções de fluxos e/ou fraturas preenchidas por óxidos e zeólitas.

Com relação às diferentes jazidas, a PIN, por possuir vesículas e amígdalas, apresentou menor resistência para as amostras secas ao ar (5,66 Mpa) e submetidas à saturação (5,28 Mpa) além da não observação na direção de aplicação da carga com relação às fraturas e fluxos durante a execução do ensaio. Os maiores valores encontrados na jazida PAI (10,38 Mpa para as amostras secas ao ar e 9,28 Mpa para as amostras submetidas à condição de saturação) são justificados por quantidades menores ou inexistentes de amígdalas e vesículas além da possível aplicação correta da carga de ruptura. Abaixo, na sequência de fotos exibidas da Figura 4.28 a Figura 4.33, alguns detalhes e particularidades referentes às amostras após seu rompimento podem ser observados, descritos anteriormente, para os fragmentos a serem rompidos.

Figura 4.28 – Amostra saturada da jazida PIN com alto índice de alteração e linhas de fratura após rompimento.



Fonte: Autor.

Figura 4.29 – Amostra seca da jazida PIN com rompimento perpendicular as linhas de fratura.



Fonte: Autor.

Figura 4.30 – Amostra seca da jazida PIN com presença de vesícula preenchida por zeólita.



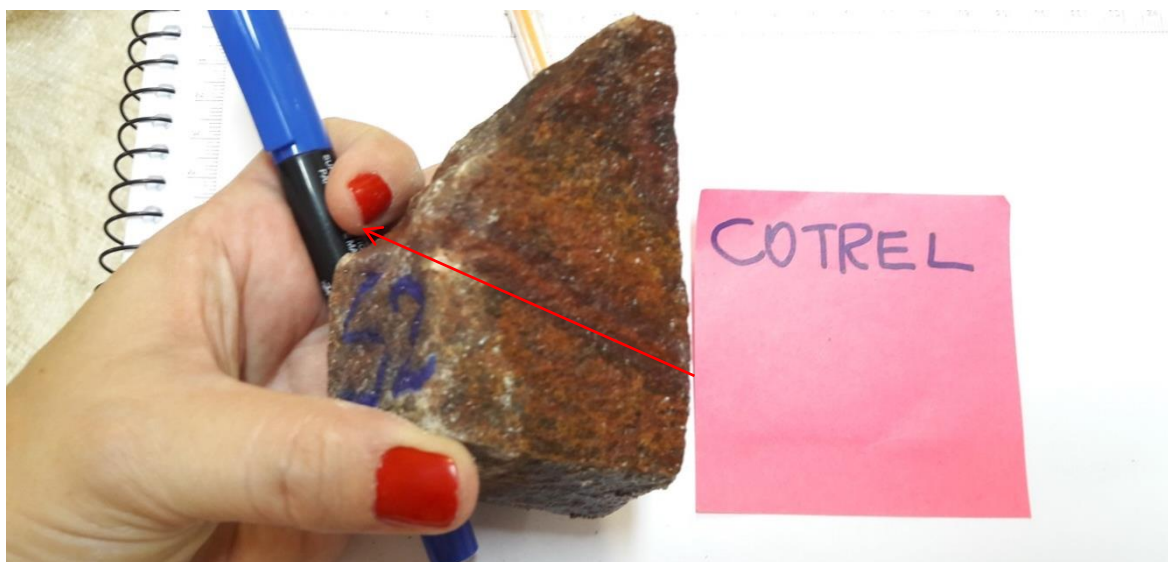
Fonte: Autor.

Figura 4.31 – Amostra saturada da jazida PAI rompida de forma perpendicular a possível face direção de fluxo



Fonte: Autor

Figura 4.32 – Amostra saturada da jazida COT após rompimento em direção paralela a face alterada.



Fonte: Autor.

Figura 4.33 – Amostra saturada da jazida COT com pior índice de compressão pontual de 0,8 Mpa.



Fonte: Autor.

4.8. ADESIVIDADE

Conforme apresentado na Figura 4.34, a adesividade nas rochas ácidas (jazidas PIN, COM, e DPA) foi insatisfatória apresentando descolamento da película de ligante ao final do ensaio. Já as rochas básicas permaneceram com a película de ligante aderida a superfície do agregado. A Tabela 4.27 fornece a avaliação final.

Tabela 4.27 – Aderência obtida após ensaio de adesividade para cada jazida

JAZIDA	TIPO DE ROCHA	ADERÊNCIA
PIN	Ácida	Má
COM	Ácida	Má
DPA	Ácida	Má
COT	Básica	Boa
SUL	Básica	Boa
PAI	Básica	Boa

Fonte: Autor.

Figura 4.34 – Amostras ao final do ensaio de adesividade

a) PIN



b) COM



c) DPA



d) COT



e) SUL



f) PAI



Fonte: Autor.

O resultado é justificado pelo fato de que as rochas ácidas possuem teor de sílica suficiente para interferir nas propriedades de atração entre as moléculas constituintes das rochas e do ligante, nesse caso por possuírem a mesma polaridade, as moléculas das rochas ácidas, ao serem quebradas durante o processo de corte ficam instáveis, adsorvem a água e repelem o ligante betuminoso com mesma carga polar. Como as rochas básicas possuem átomos de elementos alcalinos, sua carga polar é oposta a carga do ligante mantendo a película aderida a sua superfície, conforme estudado por Piccolo e Adissy (1970) e confirmado por Frazão (2002).

4.9. EQUIVALENTE AREIA

Sendo o objetivo do ensaio de equivalente areia avaliar a quantidade dos finos presentes nas amostras de agregados, pode-se observar na tabela 4.28 que os valores encontrados para as diferentes jazidas estão todos dentro dos limites aceitáveis para as especificações tanto do DAER quanto do DNIT, indicando uma proporção equilibrada da presença de material fino no agregado.

Tabela 4.28 – Valores obtidos a partir do ensaio de equivalente areia e seus limites especificados segundo sua aplicação pelos órgãos fiscalizadores

Jazida	PIN	DPA	COM	SUL	PAI
Equivalente Areia (%)	74,7	67,65	71,31	66,67	83,48
Especificação	Aplicação		Limites		
DAER ES-P 16/91	Concreto asfáltico		≥ 50%		
DNIT ES 31/06	Pavimentos flexíveis		≥ 55%		
DNIT ES 152/10	Macadame hidráulico		≥ 55%		

Fonte: Autor.

4.10. CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS OBTIDOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Com a finalidade de se verificar a existência de correlação entre as propriedades das rochas estudadas, após obtenção dos resultados foram feitas análises de relação entre os ensaios, embora com o número reduzido de amostras. A seguir, são apresentadas as principais relações observadas, principais no sentido de que apenas os coeficientes de correlação acima de 50% foram exibidos.

4.10.1. Absorção e Massa Específica

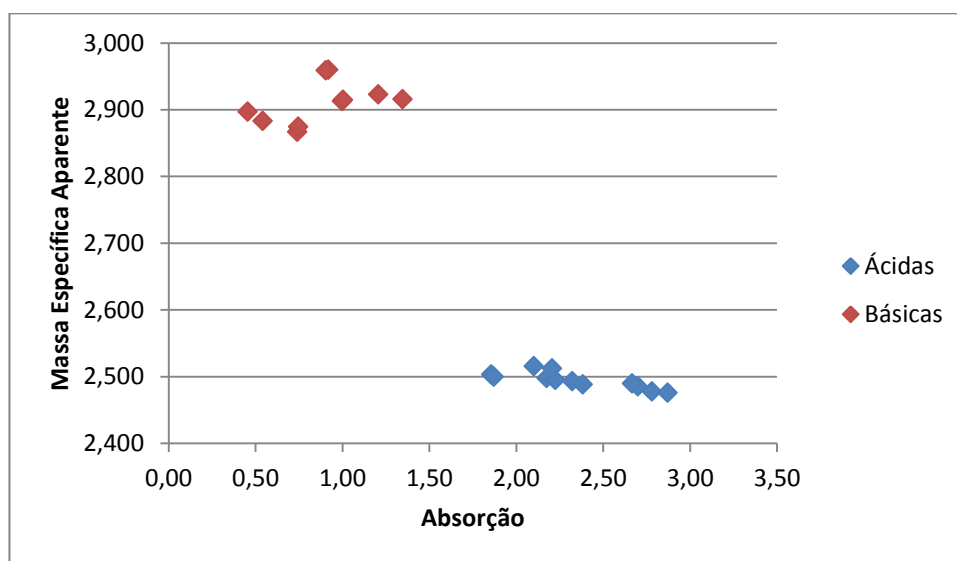
O cálculo final da absorção e massa específica aparente dos agregados é feito por meio da média de dois valores encontrados na realização de dois ensaios. Ao se considerar todos os valores obtidos conforme tabela 4.29 e não apenas a média final, pode-se verificar uma ligeira divisão por tipo de rochas quando se coloca esses números em gráfico conforme a Figura 4.35.

Tabela 4.29 – Absorção e massa específica aparente dos agregados

Jazida	Absorção	MEA (g/cm ³)	Jazida	Absorção	MEA (g/cm ³)
PIN	2,700	2,486	COT	0,997	2,913
	2,667	2,490		1,003	2,915
	2,779	2,478		-	-
	2,870	2,476		-	-
DPA	2,174	2,498	SUL	0,540	2,883
	2,224	2,495		0,453	2,897
	2,322	2,493		0,740	2,867
	2,383	2,488		0,745	2,874
COM	1,856	2,503	PAI	0,917	2,960
	1,870	2,500		0,904	2,959
	2,205	2,512		1,205	2,923
	2,100	2,516		1,345	2,916

Fonte: Autor.

Figura 4.35. – Gráfico da Absorção x Massa específica aparente

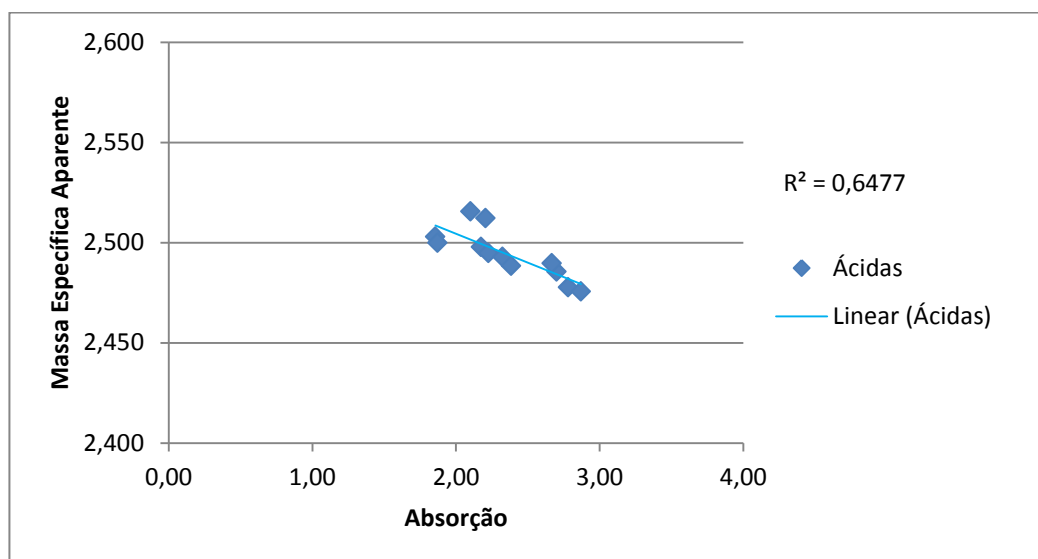


Fonte: Autor.

Conforme representado no gráfico anterior da figura 4.35, verifica-se que as rochas classificadas como ácidas (PIN, DPA e COM) apresentaram menores valores para massa específica aparente em relação as demais rochas (SUL, PAI e COT). Para a absorção, verifica-se o processo inverso, onde as rochas ácidas obtiveram maiores valores de absorção.

Indo além com o traçado da linha de tendência, é possível encontrar um bom resultado para o R-quadrado gerado no caso das rochas ácidas (Figura 4.36), no entanto, o mesmo procedimento não foi verificado no caso das rochas básicas.

Figura 4.36. – Gráfico Absorção x Massa específica aparente para as rochas ácidas.



Fonte: Autor.

4.10.2. Métodos de Determinação da Forma do Agregado

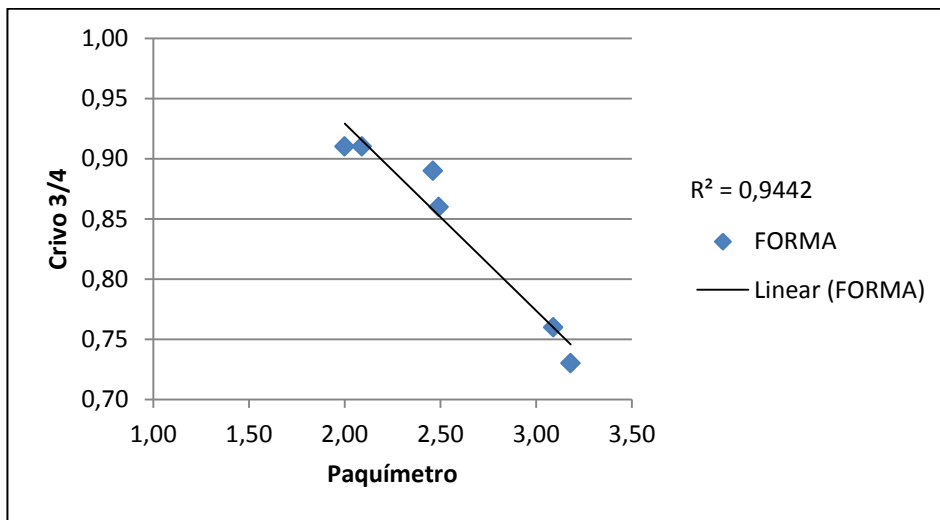
Seguindo o mesmo procedimento de verificação de correlação entre os parâmetros estudados, também foi encontrado uma boa relação entre os diferentes métodos de determinação da forma das partículas dos agregados estudados. Abaixo na Tabela 4.30 são apresentados os dados obtidos em cada método de determinação da forma estudada no item 4.4 anteriormente, em seguida são apresentados os gráficos gerados com suas respectivas linhas de tendência e valores de correlação nas Figuras 4.37 a 4.39.

Tabela 4.30 – Diversos métodos de avaliação da forma dos agregados

Jazida	Paquímetro	Crivo - 3/4	Lamelaridade - 3/4
PIN	3,09	0,76	27,48
DPA	2,09	0,91	11,88
COM	2,46	0,89	6,83
COT	3,18	0,73	26,25
SUL	2,00	0,91	5,58
PAI	2,49	0,86	14,5

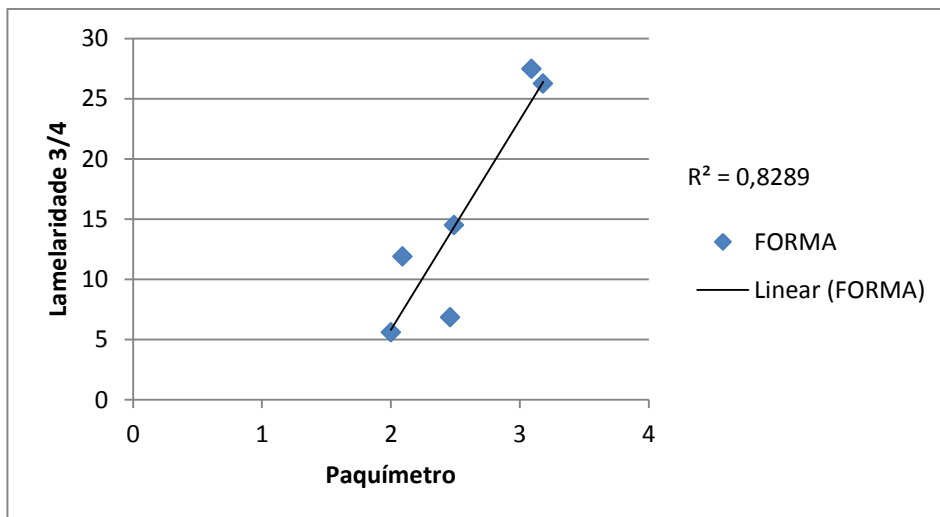
Fonte: Autor.

Figura 4.37. – Gráfico da correlação entre o método com Paquímetro x Crivo 3/4



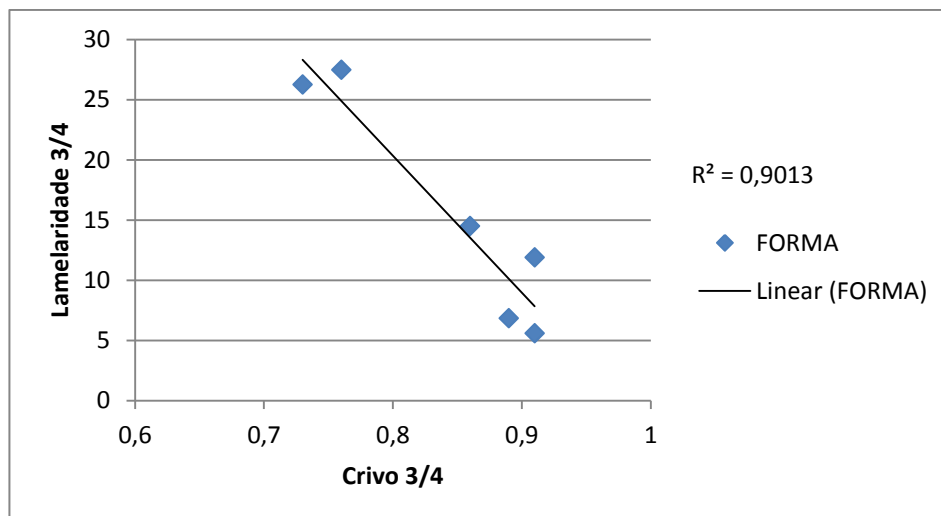
Fonte: Autor.

Figura 4.38 – Gráfico da correlação entre o método com Paquímetro x Lamelaridade



Fonte: Autor

Figura 4.39 – Gráfico da correlação entre o método com Crivo x Lamelaridade



Fonte: Autor

4.10.3. Compressão Pontual

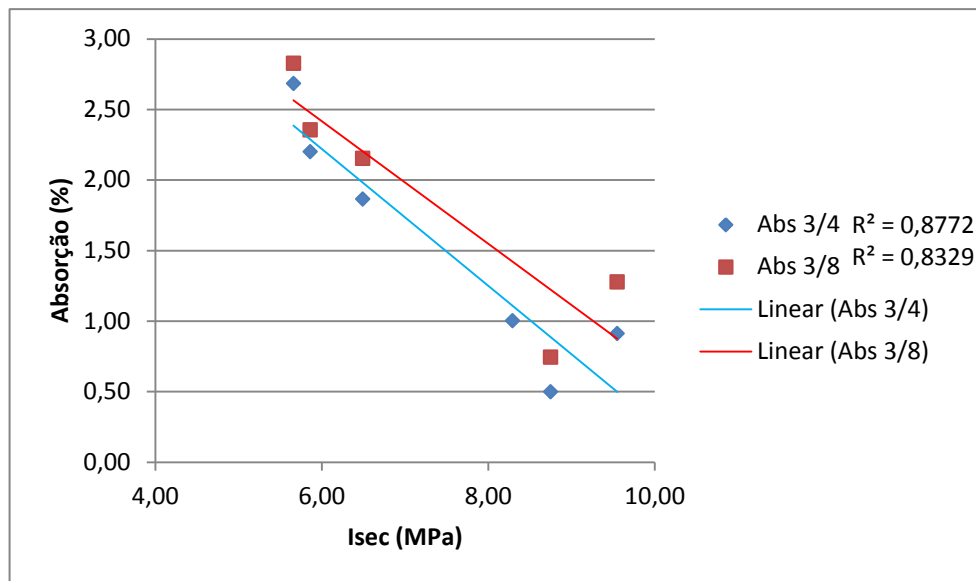
A tabela 4.31 apresenta o resumo das correlações feitas entre a variável compressão pontual e demais variáveis com seus correspondentes coeficientes de correlação R^2 , logo após são exibidas suas representações gráficas pela Figura 4.40 a Figura 4.44.

Tabela 4.31 – Correlações com o parâmetro Índice de Compressão Pontual Seca (Isec)

Variáveis correlacionadas	R^2	Tipo de correlação
Absorção (3/4)	0,88	linear
Absorção (3/8)	0,83	linear
MEA (3/4)	0,94	linear
MEA (3/8)	0,98	linear
MER (3/4)	0,89	linear
MER (3/8)	0,97	linear
Esmagamento	0,87	linear
Isat	0,90	linear

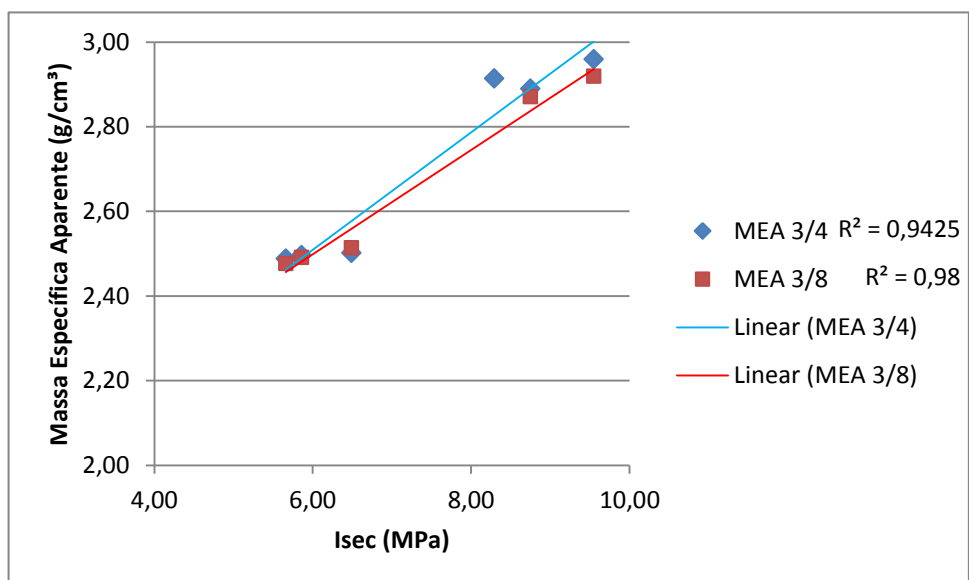
Fonte: Autor.

Figura 4.40 – Gráfico da correlação entre Isec x Absorção



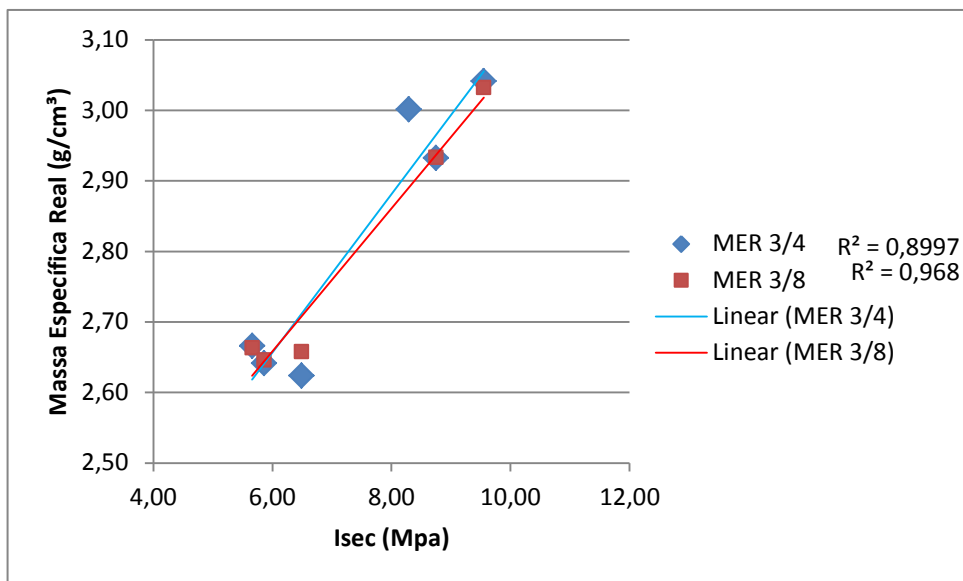
Fonte: Autor.

Figura 4.41 – Gráfico da correlação entre Isec x Massa específica aparente



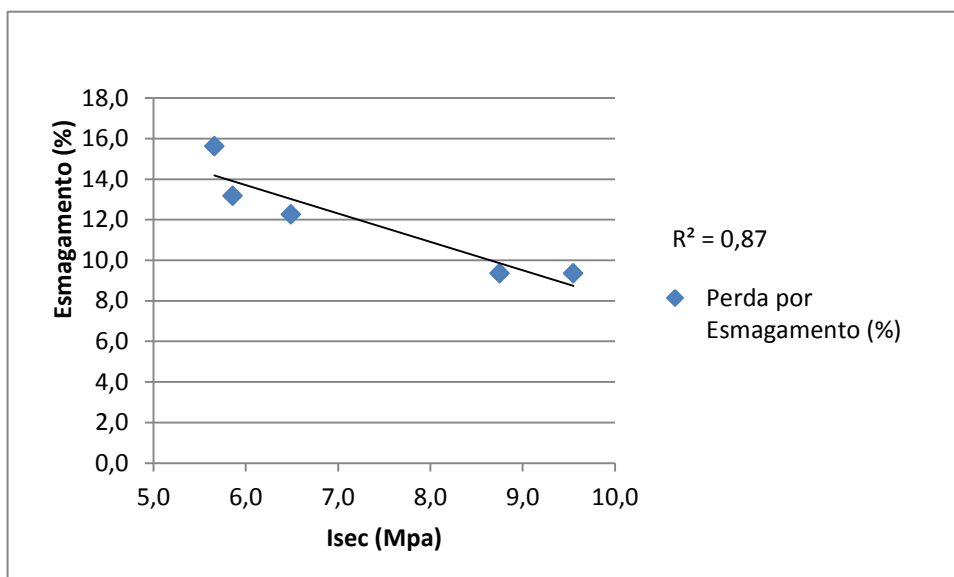
Fonte: Autor.

Figura 4.42 – Gráfico da correlação entre Isec x Massa específica real



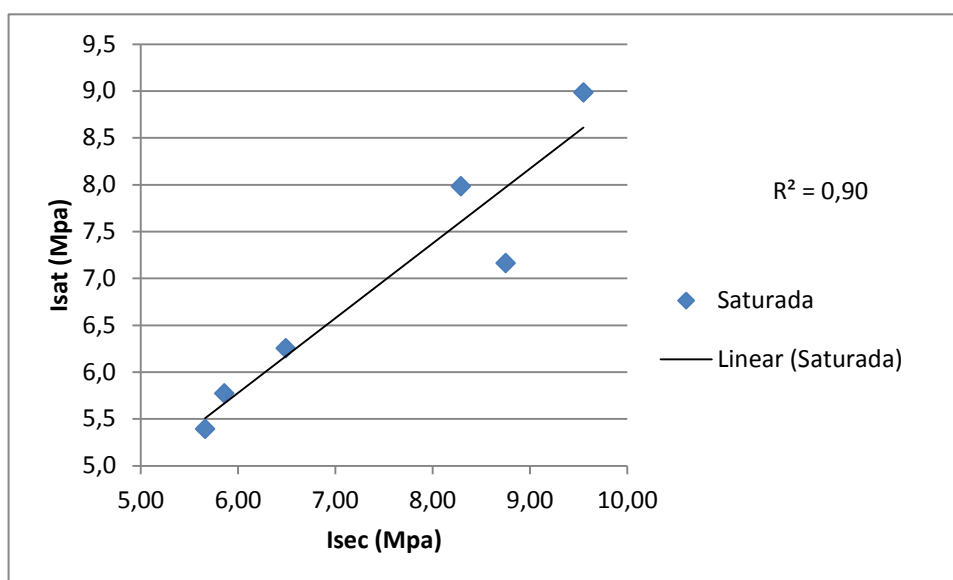
Fonte: Autor.

Figura 4.43 – Gráfico da correlação entre Isec x Perda por Esmagamento



Fonte: Autor.

Figura 4.44 – Gráfico da correlação entre Isec x Isat



Fonte: Autor.

4.10.4. Perda por Esmagamento

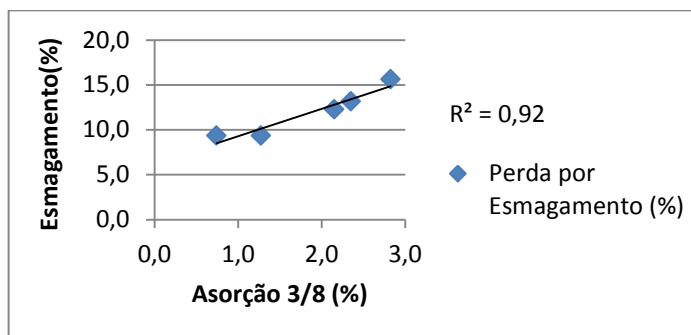
A tabela 4.32 apresenta o resumo das correlações feitas para a variável perda por esmagamento com seus correspondentes coeficientes de correlação R^2 , logo após são exibidas suas representações gráficas pela Figura 4.45 a Figura 4.51.

Tabela 4.32 – Correlações com o parâmetro perda por Esmagamento

Variáveis correlacionadas	R^2	Tipo de correlação
Abs (3/8)	0,92	linear
MEA (3/8)	0,83	linear
MER (3/8)	0,75	linear
Perda por Abrasão	0,68	linear
Perda por choque Treton	0,69	linear
Isec	0,87	linear
Isat	0,74	linear

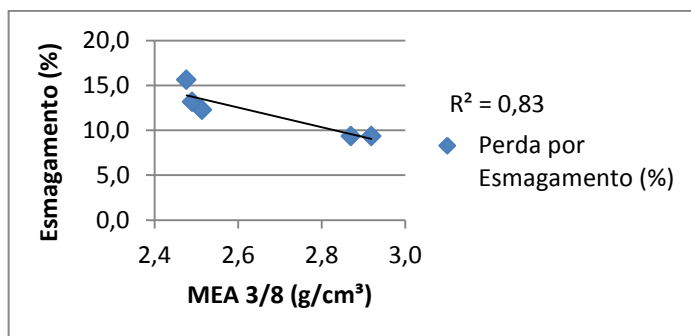
Fonte: Autor.

Figura 4.45 – Gráfico da correlação entre Absorção 3/8 x Perda por Esmagamento



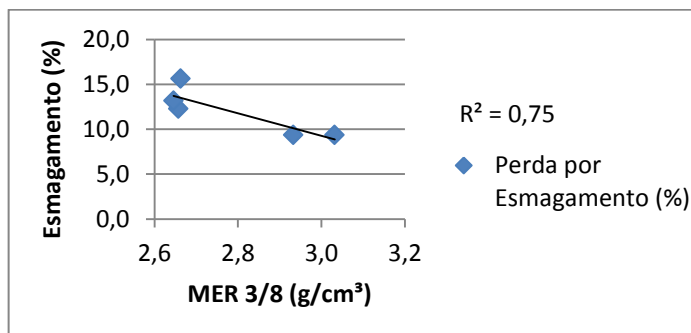
Fonte: Autor.

Figura 4.46 – Gráfico da correlação entre Massa específica aparente 3/8 x Perda por Esmagamento



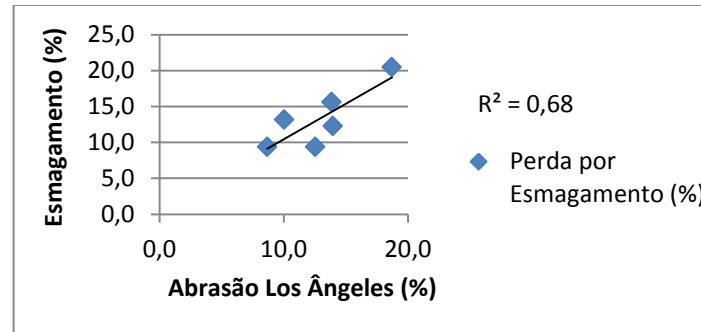
Fonte: Autor.

Figura 4.47 – Gráfico da correlação entre Massa específica real 3/8 x Perda por Esmagamento



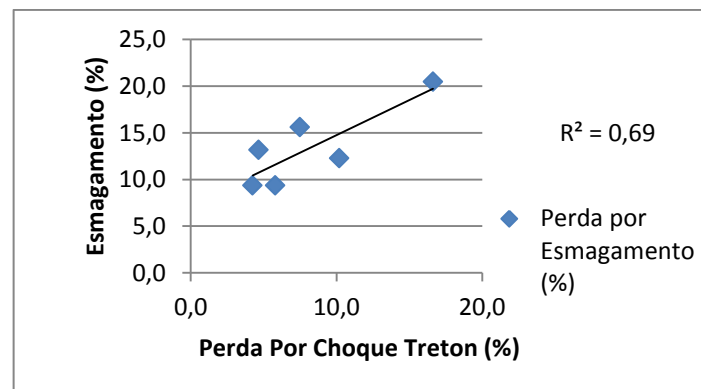
Fonte: Autor.

Figura 4.48 – Gráfico da correlação entre a Perda por Abrasão Los Angeles x Perda por Esmagamento



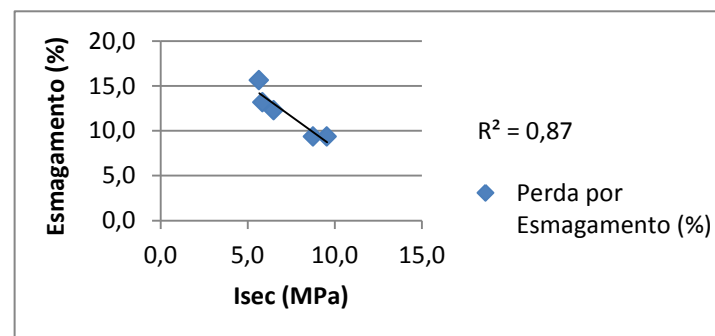
Fonte: Autor.

Figura 4.49 – Gráfico da correlação entre a Perda por Esmagamento x Perda por Choque Treton



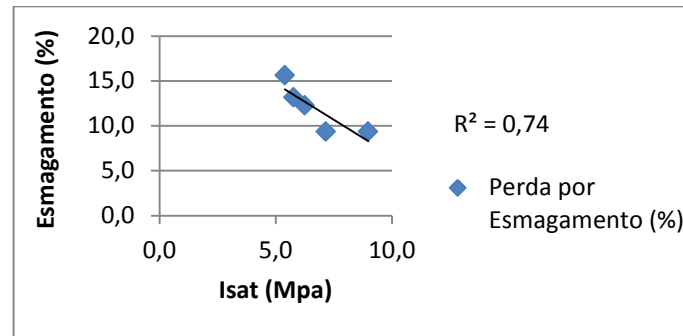
Fonte: Autor.

Figura 4.50 – Gráfico da correlação entre Isec x Perda por Esmagamento



Fonte: Autor.

Figura 4.51 – Gráfico da correlação entre Isat x Perda por Esmagamento



Fonte: Autor.

4.10.5. Perda por Abrasão Los Angeles

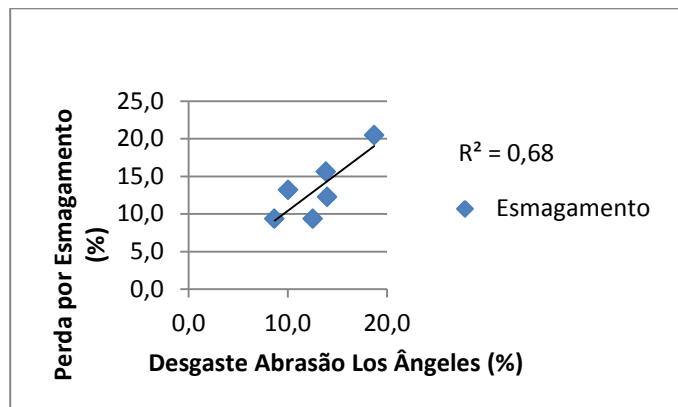
A tabela 4.33 apresenta o resumo das correlações feitas para a variável perda por abrasão Los Angeles com seus correspondentes coeficientes de correlação R^2 , logo após são exibidas suas representações gráficas pela Figura 4.52 a Figura 4.55.

Tabela 4.33 – Correlações com o parâmetro perda por Abrasão Los Angeles

Variáveis correlacionadas	R^2	Tipo de correlação
Esmagamento	0,68	linear
Treton	0,94	linear
Sanidade graúdo	0,69	linear
Sanidade total	0,54	linear

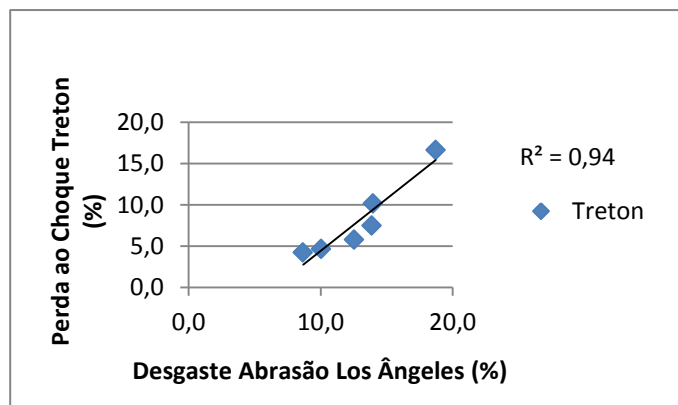
Fonte: Autor.

Figura 4.52 – Gráfico da correlação entre Abrasão x Esmagamento



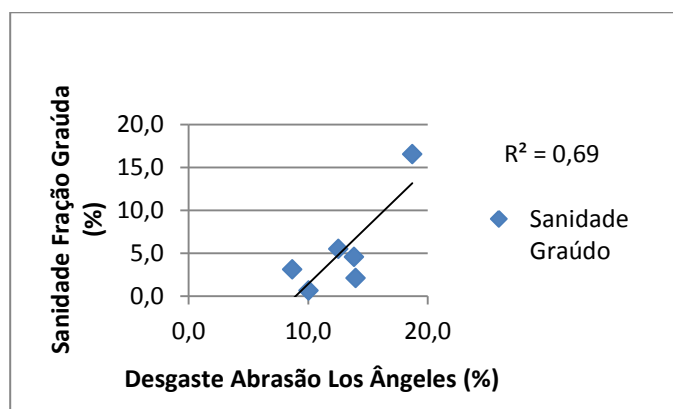
Fonte: Autor.

Figura 4.53 – Gráfico da correlação entre Abrasão x Treton



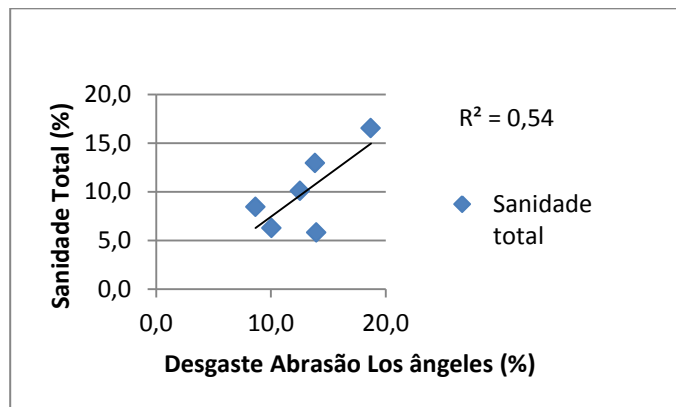
Fonte: Autor.

Figura 4.54 – Gráfico da correlação entre Abrasão x Sanidade Graúdo



Fonte: Autor.

Figura 4.55 – Gráfico da correlação entre Abrasão x Sanidade Total



Fonte: Autor.

4.10.6. Perda por Choque Treton

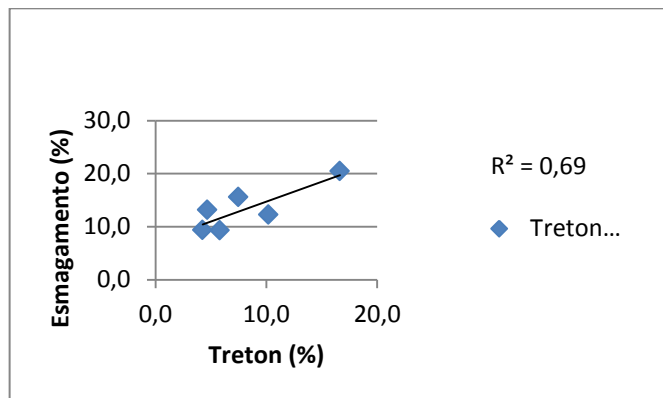
A tabela 4.34 apresenta o resumo das correlações feitas para a variável perda por choque Treton com seus correspondentes coeficientes de correlação R^2 , logo após são exibidas suas representações gráficas pela Figura 4.56 a Figura 4.58.

Tabela 4.34 – Correlações com o parâmetro perda por choque com uso do Treton

Variáveis correlacionadas	R^2	Tipo de correlação
Esmagamento	0,69	linear
Abrasão	0,94	linear
Sanidade Grossa	0,72	linear

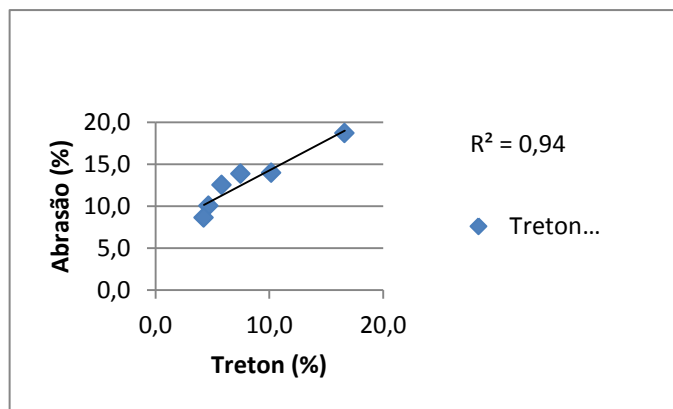
Fonte: Autor.

Figura 4.56 – Gráfico da correlação entre Treton x Esmagamento



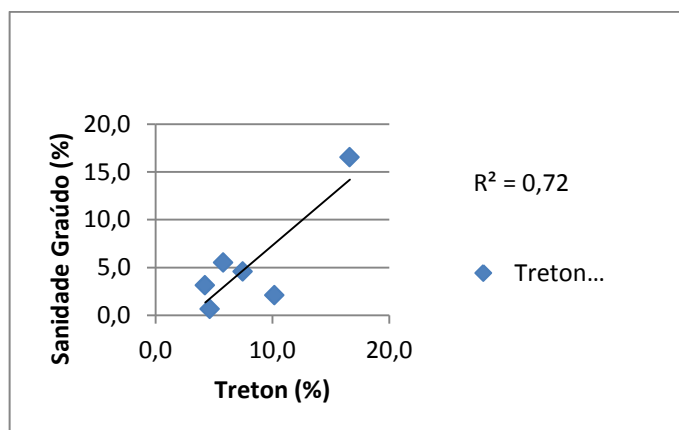
Fonte: Autor.

Figura 4.57 – Gráfico da correlação entre Treton x Abrasão Los Angeles



Fonte: Autor.

Figura 4.58 – Gráfico da correlação entre Treton x Sanidade do Graúdo



Fonte: Autor.

4.10.7. Ensaio de Sanidade

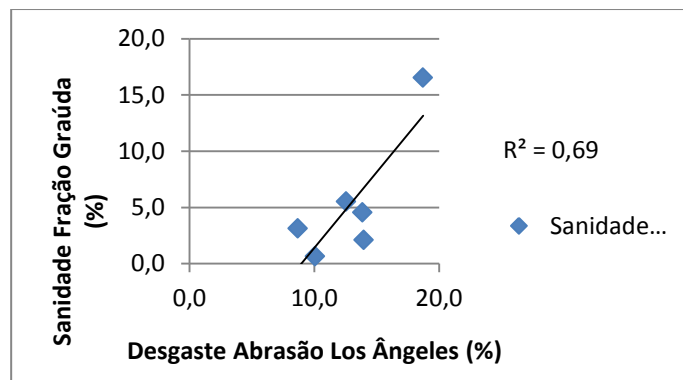
A tabela 4.35 apresenta o resumo das correlações feitas para a variável perda por sanidade com seus correspondentes coeficientes de correlação R^2 , logo após são exibidas suas representações gráficas pela Figura 4.59 a Figura 4.60.

Tabela 4.35 – Correlações com o parâmetro ensaio de Sanidade

Variáveis correlacionadas	R^2	Tipo de correlação
Abrasão Los Angeles	0,69	linear
Treton	0,72	linear

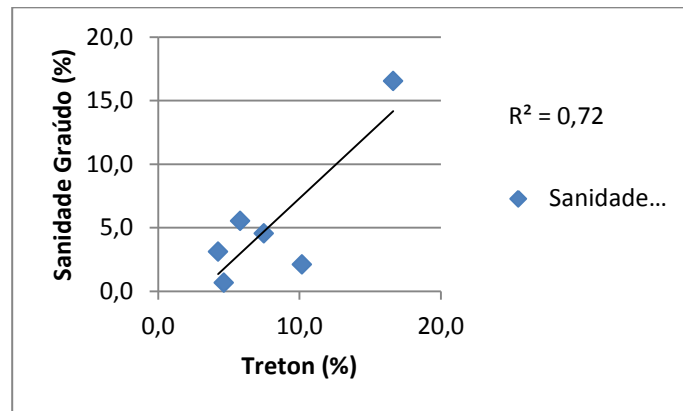
Fonte: Autor.

Figura 4.59 – Gráfico da correlação entre Abrasão Los Angeles x Sanidade do Graúdo



Fonte: Autor.

Figura 4.60 – Gráfico da correlação entre Desgaste Treton x Sanidade do Graúdo



Fonte: Autor.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste item, são apresentadas as conclusões decorrentes da realização dos ensaios e de suas propriedades compiladas seguindo com breves sugestões observadas no decorrer da execução dos métodos empregados e valores obtidos.

5.1. CONCLUSÕES

A análise petrográfica forneceu bons indicativos da composição mineralógica das rochas estudadas auxiliando na interpretação dos resultados e completando a caracterização dos materiais.

Quanto aos ensaios físicos, as rochas básicas compostas predominantemente por piroxênios e plagioclásios obtiveram maiores massas específicas do que aquelas com quartzo em sua composição. Além disso, devido à presença de amígdalas, vesículas e microfraturas, a jazida do grupo dos riodacitos apresentou maior absorção de água quando comparada com as rochas básicas e de modo geral, há uma boa relação entre os índices físicos da brita 3/4, brita 3/8 e pó de pedra. Também ao se avaliar a relação com a resistência a compressão, o esmagamento e os índices físicos, houve uma boa correlação entre eles, diferente da correlação com as propriedades de desgaste abrasivo onde não houve correlação.

Quanto aos métodos de avaliação da forma das partículas dos agregados, ao se comparar as especificações SUPERPAVE recomendadas para a análise da forma dos agregados com aquelas extraídas da classificação proposta por Al Rousan (2014) ou até mesmo os limites fornecidos pelo próprio AIMS, nota-se um número maior de variáveis que podem explicar de forma mais detalhada a variação da forma das partículas desses agregados. Com os dados retirados do processamento digital de imagens AIMS pode-se analisar inclusive o quanto a amostra é angular, o quanto a amostra é rugosa, o quanto a amostra é achatada e a proporção entre suas próprias partículas fornecendo, assim, mais informações além de apenas classificar as partículas como lamelar ou não lamelar.

Comparando os resultados encontrados pelos diferentes métodos de avaliação da forma das partículas, é possível observar uma boa correlação entre os valores obtidos, onde a maior lamelaridade foi encontrada na jazida pinhal e Cotrel tanto pela determinação descrita pelo DAER, quanto pela determinação descrita nas especificações SUPERPAVE, confirmada ainda pela determinação do índice de forma com o uso do paquímetro descrito pela ABNT e pelo índice de forma por meio de crivos adotado pelo DNIT e pelos parâmetros encontrados pelo AIMS.

Ao se observar a perda ocorrida após o ensaio de sanidade com uso de sulfato de sódio, é possível notar que, a exceção da amostra sultepa, as demais amostras tiveram aumento de perda na fração miúda com relação a fração graúda para a mesma jazida ensaiada. Isso deve ao fato de que ao aumentar a superfície de contato, uma maior porção de grãos irá ter contato com a solução acarretando maior desgaste. Essa maior perda na fração fina também foi responsável por elevar a perda no resultado ponderado do ensaio de sanidade onde o DAER leva em consideração, para o cálculo da sua porcentagem, tanto a fração fina quanto a fração grossa.

Quanto às propriedades mecânicas de desgaste avaliadas pela abrasão Los Angeles, treton e esmagamento, observou-se uma excelente correlação entre a dupla treton e abrasão Los Angeles, pois ambas geram os finos pelo desgaste das arestas das partículas, embora o desgaste pela abrasão seja maior. Já o esmagamento ao promover a quebra das partículas, obteve maiores valores nos agregados mais lamelares além de também ter tido boa correlação com o índice de compressão pontual.

Quanto ao índice de compressão pontual, da observação dos fragmentos rompidos, constatou-se uma presença considerável de direção de fluxo, vesículas e fraturas que podem ter influenciados nos resultados principalmente por não ter sido observada direção de aplicação de carga com relação a essas alterações sendo necessária a avaliação dos resultados somente nos blocos que visivelmente após o rompimento estavam coerentes com os procedimentos corretos de realização dos ensaios reduzindo, assim, o número de amostras. Contudo, o ensaio permitiu avaliar de modo satisfatório, a resistência mecânica das amostras obtendo valores semelhantes entre as rochas pertencentes ao grupo dos riodacitos, valores semelhantes entre as rochas básicas e pouca variação com relação a diferentes

jazidas tendo também excelente correlação com os índices físicos, com o esmagamento, e também, com as amostras submetidas à saturação em água.

Comparando as amostras submetidas à compressão no estado seco ao ar com as amostras submetidas à saturação, também foi possível observar uma redução de resistência nas amostras saturadas, porém, não de forma prejudicial visto que a relação entre o índice seco e o índice saturado ficou acima de 1,0 para todas as jazidas, onde de acordo com Arnold (1993), uma relação acima de 0,7 pode ser um bom valor para indicar boa resistência as forças internas provocadas pelo processo de expansão de minerais argilosos.

Por fim, com relação à aceitação dos agregados para uso na construção civil em concretos, pavimentos ou lastro ferroviário segundo as recomendações de órgãos regulamentadores, tem-se a seguinte situação:

- O valor exigido para o ensaio de equivalente areia é que seja $\geq 50\%$, assim todas as jazidas estudadas estão dentro desse intervalo;
- O menor valor exigido, independente da aplicação do agregado, para o ensaio de abrasão Los Angeles é que seja $\leq 30\%$, dessa forma, todas as jazidas estão dentro do limite aceitável;
- Para o ensaio de esmagamento a perda de massa permitida depende da aplicação do agregado variando de 65% para concretos sujeitos a desgaste superficial a 30% para aplicação em lastro ferroviário, colocando todas as jazidas dentro do limite de aceitação;
- O impacto Treton é especificado somente para aplicação em lastro ferroviário com valores menores de 25%, também tendo aprovadas todas as jazidas para essa especificação;
- Nos índices físicos a massa específica tem limite inferior de $2,5 \text{ g/cm}^3$ e as jazidas ficaram dentro do permitido. A absorção não tem valores estabelecidos para obras de pavimentação permitindo a aplicação dos agregados em tais obras, já para a aplicação em lastro ferroviário é estabelecido um valor máximo de 0,8% para a absorção e 1,5% para a porosidade, deixando quase na totalidade todas as jazidas fora dessa aplicação;
- Com a avaliação da durabilidade com a solução de sulfato de sódio analisada pela média da fração graúda e limitada pelo valor máximo de 12%

para aplicação em pavimentos flexíveis, a jazida Cotrel ficou abaixo do recomendado e atingiu uma perda de 16,53%, o que já era esperado principalmente pela grande quantidade de óxidos de ferro encontrada na observação das lâminas, no entanto as demais jazidas se mantiveram dentro do limite estabelecido. Quando avaliadas pelo método que utiliza a ponderação com a perda também ocorrida no ensaio para a fração do pó de pedra, a jazida pinhal tem seu valor de perda elevado e fica fora das especificações.

- Os resultados encontrados no ensaio de adesividade ficou dentro do esperado, dividindo as amostras em grupos com má aderência devido a acidez de suas rochas (Pinhal, Della Pasqua e Conpasul) e as amostras com boa aderência para as rochas básicas da Cotrel, Paim e Sultepa. No entanto, é comprovado em várias pesquisas que a adição de determinados produtos como a cal, melhoram a adesividade entre o agregado e ligante, mesmo assim alguns agregados ainda continuam a apresentar má adesividade como os agregados de Itaara estudados por Boeira (2014), sendo necessária uma avaliação com aplicação de ligantes modificados e dope para corrigir a falta de adesividade;
- A avaliação da forma pelo método do crivo (com índice variando de 0 a 1, onde quanto mais próximo de um, tem-se melhor cubicidade e valores aceitáveis de $IF > 0,50$) permite a utilização de todas as jazidas da forma em que se encontram suas partículas. Porém, ao se analisar a forma pelo método do uso com paquímetro, as jazidas Pinhal com $IF = 3,09\%$ e Cotrel com $3,18\%$ mostraram valores acima do recomendado que é $IF < 3$, ainda assim, com o processo de rebitagem que corrige a forma das partículas, esses agregados podem vir a ficar dentro das especificações esperadas, também foi informado que a pedreira da Pinhal já tem desenvolvido esse processo para seus agregados que tenham uso em concretos.
- Da avaliação da lamelaridade com uso da placa adotada no método nacional e com valores aceitáveis menores que 40% e 50% para uso em tratamento superficial duplo e concreto asfáltico respectivamente, todos os agregados estudados estão dentro das especificações. Mas para utilização em lastro ferroviário, os agregados das jazidas Pinhal e Cotrel com lamelaridade de

27,48% e 26,25% respectivamente, estão fora das especificações que estabelece valores de até 15%. As partículas dos materiais dessas jazidas, caso se tenha a necessidade de serem empregados em lastro ferroviário, podem sofrer alteração para melhorar suas características se passarem por processos de rebitagem e forem reavaliadas suas propriedades.

- Com relação a lamelaridade ensaiada pelo método descrito nas especificações SUPERPAVE que estabelece o valor máximo de 10% para a proporção 5:1, pode ser considerada as mesmas observações descritas anteriormente para as jazidas que ficaram fora do resultado exigido.

Por fim, ficou comprovado por meio dos ensaios realizados que partículas lamelares têm maior desgaste quando submetidas a esforços mecânicos, também foi confirmado que a resistência dos fragmentos de rochas é reduzida quando submetidos à condição de saturação e, por observação das correlações, o esmagamento é um bom índice para prever o comportamento dos agregados graúdos junto aos demais ensaios de resistência mecânica.

5.2. SUGESTÕES

Como sugestões têm-se os questionamentos surgidos durante o desenvolvimento e análises dos resultados, entre elas:

- Verificar a influência e variação dos resultados quando se aplica a carga de compressão de forma perpendicular as linhas de fraturas visíveis nas amostras a serem ensaiadas e compará-las a amostras com aplicação da carga de forma paralela as linhas de fratura ou fluxo;
- Submeter amostras de fragmentos de rochas a ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio com a finalidade de promover o rompimento dos fragmentos e comparar os índices de resistência à compressão em amostras antes e em amostras depois dos ciclos de imersão na solução;
- Coletar os fragmentos de rochas de pontos o mais variado possível do maciço e coletar fragmentos escolhendo apenas um lado do maciço para comparar a intensidade da presença de microfraturas existentes ao se observar as

lâminas ao microscópio e avaliar a relevância no modo de se coletar as amostras dos fragmentos de rochas com relação a identificação de amígdalas, vesículas e fraturas microscópicas;

- Aumentar o número de amostras submetidas ao ensaio de compressão pontual e verificar a influência de um tamanho amostral maior, visto que durante a pesquisa, algumas amostras rompem de modo indesejado;
- Aumentar o número de amostras a serem submetidas e confirmar a existência das correlações entre os ensaios de resistência mecânica;
- Durante a coleta do material nas unidades produtoras de agregado, verificar o tipo de britagem e se há processos de rebitagem para melhoramento da forma das partículas do agregado;
- Avaliar a significância das correlações entre os parâmetros estudados por meio do uso de software estatístico;
- Por fim, sempre que possível, realizar ensaios que possam constatar presença de minerais expansivos e classifica-los;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

____ABNT. **Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto** - NBR 7389: 1992 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992.

____ABNT. **Agregados – Amostragem** - NBR NM 26: 2009 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009.

____ABNT. **Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório** - NBR NM 27: 2001 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001.

____ABNT. **Agregados – Determinação da composição granulométrica** - NBR NM 248: 2003 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003.

____ABNT. **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”** - NBR NM 51: 2001 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001.

____ABNT. **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro** - NBR 7809: 2006 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006.

____ABNT. **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água** - NBR NM 53: 2009 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009.

____ABNT. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente** - NBR NM 52: 2009 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009.

____ABNT. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios** - NBR NM 45: 2006 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006.

_____ ABNT. **Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos** - NBR 9938: 1967 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1967.

_____ ABNT. **Rochas para revestimento – Análise petrográfica** - NBR NM 12.768: 1992 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992.

_____ DAER– **Determinação do índice de lamelaridade** - DAER/RS-EL 108/01. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. Rio Grande do Sul: 2001.

_____ DNER. **Materiais rochosos usados em rodovias – Análise petrográfica** - DNER IE 006/94 – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1994.

_____ DNER. **Coleta de amostras de agregado** - DNER PRO 120/97 – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1997.

_____ DNER. **Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório** - DNER PRO 199/96 – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1996.

_____ DNER. **Agregados – análise granulométrica** - DNER ME 083/98 – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1998.

_____ DNER. **Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio** - DNER ME 089/94 – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1994.

_____ DNER. **Agregado em estado solto – determinação da massa unitária** - DNER ME 152/95 – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1995.

_____ DNER. **Agregado miúdo – Determinação da densidade real** - DNER ME 084/95 – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1995.

_____ DNER. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman** - DNER ME 194/98 – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1998.

_____. DNER. **Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos** - DNER ME 197/97 - Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, Rio de Janeiro: 1997.

ALMEIDA, S.L.M.; LUZ, A.B. **Manual de Agregados para a Construção Civil**. Tratamento de Minérios 5ª edição, pág. 143-211. Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

AL ROUSAN, T. M. – **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system**. Dissertacion. Texas A&M University, 2004.

ALVES, V. A.; BARROSO, E.V.; MOTTA, L.M.G. Avaliação de Agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por Técnicas Digitais de Imagens. **Asfalto em revista**, 2015.

AMERICAN GEOSCIENCES INSTITUTE, **What are the main methods of mining?** Disponível em: <<http://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-are-main-mining-methods>> Acesso em: 2016

ARNOLD, G.P. **Estudo do Comportamento Mecânico de Basaltos Alterados do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado, 1993. 145 p. (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 1993.

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F.F.; LUZ, A.B. Diagnóstico do Pólo Gesseiro de Pernambuco (Brasil) com Ênfase na Produção de Gpsita para Fabricação de Cimento. **IV Jornadas Iberoamericanas, 2004**.

BESSA, I. U.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J.B. **Análise da influência do tamanho nas propriedades de forma de agregados analisados através do processamento digital de imagens**. In: 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2013, Santos, SP.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. 2014. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 504 f. 3ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2010.

BITARAFAN, M.R.; ATAEI, M. Mining method selection by multiple criteria decision making tools. **The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, p. 493-498, 2004.

BOYD, Ken.; **Crushing Plant Design and Layout Considerations**, Disponível em: tecnology.infomine.com/hydrometmine/papers/Kboyd.pdf /

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Métodos de Lavra**. [S.I.] [200-]. Acesso em: <http://www.redeaplmineral.org.br/pormin/noticias/legislacao/metodos_de_lavra.pdf> Acesso em: 2016.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Excursão virtual aos Aparatos da Serra – RS**. Disponível em: < ww.cprm.gov.br/publique/media/Gestao-territorial/.../Aparados/imagens/aparados.pdf>. Acesso em: 2015.

BRASIL CASA CIVIL, PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, **DECRETO Nº 62.934, DE 2 DE JULHO DE 1968 – Aprova o Regulamento do Código de Mineração**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1950-1969/D62934.htm> Acesso em: 2015

CAVALCANTI, V.M.M.; PARAHYBA, R.E.R. **A Indústria de Agregados para Construção Civil na Região Metropolitana de Fortaleza**. Programa de Avaliação de Distritos Mineiros – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Fortaleza 2012.

CHANG, M.K.; CHEN, J.; LIN, K.Y. **Influence of Coarse Aggregate Shape on the Strength of Asphalt Concrete Mixtures**. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 1062 – 1075, 2005.

COLE, W.F.; SANDY, M.J. – **A proposed secondary mineral rating for basalt road aggregate durability**. Australian Road Research. V. 10, n3, sept. 1980.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352p.

CUCHIERATO, C. **Caracterização Tecnológica de Resíduos da Mineração de Agregados da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), Visando Seu Aproveitamento Econômico**. 2000. 201 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, São Paulo, SP, 2000.

DAMÁSIO, D. **Caracterização laboratorial de agregados para aplicação em camadas de apoio de vias férreas**. Dissertação de Mestrado, 2011. 118 p. (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, 2011.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – U.S. Department of Transportation. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/aims2/hif11030/chap02.cfm#eq>>. Acesso em: 2017.

FERNADES, E.S.; DOMINGUES, F.A.A. O comportamento dos agregados rochosos nas relações de aderência pneu e pavimento, no estado de São Paulo. **31ª Reunião de Pavimentação**, São Paulo – SP, pp 132-153, v1, 1998.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil** – São Paulo: ABGE, 2002, 132p.

FRAZÃO, E. B.; CARUSO, L.G. Síntese do conhecimento sobre alterabilidade de rochas basálticas como material de construção em algumas barragens da bacia do Alto Paraná. In: Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, 1983, São Paulo. **Anais**, São Paulo: ABMS/ABGE, 1983 v. 2A, p. 21-33.

FREIRE, R. A. **Evaluation of the coarse aggregate influence in the fatigue damage using fine aggregate matrices with different maximum nominal sizes**. Dissertação de Mestrado, 2015. 86 p. (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2015.

GILL, R. **Rochas e Processos Ígneos: um guia prático**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

GOLALIPOUR, A. *et al.* **Effect of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements.** SIIV – 5th International Congress – Sustainability of Road Infrastructures, 2012.

GOUVEIA, L.T.; FERNADES JUNIOR, J.L. **Considerações a Respeito das Propriedades de Consenso do Superpave para Agregados de Misturas Asfálticas.** In: XX ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2006, Brasília. Anais da XX ANPET, 2006.

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

IVANOFF, M.D.; TOLDO, E.E.; FIGUEIRA, R.C.L. **Sedimentação da Lagoa Itapeva, RS, Brasil.** Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

KANDHAL, P.S.; PARKER JR, F.; MALLICK, R. B. - **Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of the Practice.** NCAT Report nº 97-6. 1997.

LAMAS, R. I. R. **Caracterização Petrográfica de agregados ígneos para betão.** Dissertação de Mestrado, 2012. 127 p. (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto – 2012.

LEAL, S.M.F. **Caracterização petrográfica de agregados sedimentares e metamórficos para betão.** Dissertação de Mestrado, 2012. 182 p. (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, 2012.

LEITZKE, F.P.; SOMMER, C.A.; LIMA, E.F.; MATTÉ, V. **O Vulcanismo alta-sílica da região do Tupanci, NW do Escudo Sul-Rio-Grandense: faciologia, petrografia e litoquímica.** Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2015.

LUZ, A.B.; FRANÇA, S.C.A.; SAMPAIO, J.A. **Britagem e Moagem.** Tratamento de Minérios 5ª edição, pág. 143-211. Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

MACÊDO, A.J.B.; BAZANTE, A.J.; BONATES, E.J.L. Seleção do Método de Lavra. **Revista Escola de Minas** vol. 54 nº3 Ouro Preto – MG, Julho/Setembro 2001.

MACIEL FILHO, C.L.; NUMMER A.V., **Introdução à Geologia de Engenharia** – Santa Maria: Editoraufsm, 2014.

MANUAL: **Aggregate Image Measurement System**, Model LMAFA2 – Version 2.07. Pine Instrument Company, 2011.

MATTÉ, V. *et al.* **Rochas dioríticas do Platô da Ramada, Rio Grande do Sul, e sua relação com o vulcanismo alcalino da Formação Acampamento Velho, Neopoterozóico do Escudo Sul-Rio-Grandense.** Revista Brasileira de Geociências, Volume 42 (2), 2012.

MENEGAT, R.; PORTO, M. L.; CARRARO, C. C.; FERNANDES, L. A., - **Atlas Ambiental de Porto Alegre.** - Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1998.

MONASTIER, M.S. **A Produção de Brita e a Ocupação Urbana na Região Metropolitana de Curitiba – Problemas e Readequação.** 2004. 188 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geologia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004.

MULOCHER, E. R. **Estudo das Argilas das Rochas Basálticas da Formação Serra Geral no Rio Grande do Sul. Argilominerais em lavas portadoras de ametista na região do Alto Uruguai (RS), Província Magmática do Uruguai.** Dissertação de Mestrado, 2013. 72 p. (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Geociências. Porto Alegre - RS, 2012.

NASCIMENTO, V.B. *et al.* Compartimentação do Relevo de um Setor a Leste da Área Urbana de Santa Maria – RS, no Bairro de Camobi. **Revista Geonorte**, Edição Especial, V.2, N.4, p.310 – 319, 2012.

OLIVEIRA, A.M.; BRITO, S.N. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 586p., 1998.

PINHEIRO, R.J.B. **Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da serra geral no estado do Rio Grande do Sul.** 2000, 318 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

PRICE, D.G. - Weathering and weathering processes. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, n. 28, p. 243-252, 1995.

REINERT, D.J.; *et al.* **Principais Solos da Depressão Central e Campanha do Rio Grande do Sul – Guia de Excursão**. Segunda Edição. Santa Maria – RS, 2007.

RENNER, L.C. **Geoquímica de Sills Basálticos da Formação Serra Geral, Sul do Brasil, com Base em Rocha Total e Microanálise de Minerais**. 2010. 226 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RETORE, T.S. **Comportamento Mecânico de Agregados de Basaltos Alterados para Pavimentação, Rejeitos de Garimpo de Ametista**. 2005. 127 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ROISENBERG, A.; MARQUES, J.C.; BACHI, F.A.; FRANTZ, J.C.; **Geologia da Folha de Gravataí*SH.22-X-C-V**. Programa Geologia do Brasil. Levantamentos Geológicos Básicos. Brasília, 2008.

ROGERS, C. - **Canadian Experience with the Micro-Deval Test for Aggregates**. Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation 13, 139-147, 1998.

RUSSO, M.L.C. **Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração de Quartizito**. 2011. 172 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, 2011.

SECRETARIA DA COORDENAÇÃO E PLANEJAMENTO. **Atlas Sócio-Econômico do Estado do Rio Grande do Sul**. 2ª edição 2006.

SILVA, R.C.; CARVALHO, I. S.; FERNANDES, A.C.S. **Pegadas de dinossauros do Triássico (Formação Santa Maria) do Brasil**. Ver. Asoc. Paleontol. Argent. – Buenos Aires, 2008.

SOBRINHO, A. C. P. L. *et al.* **Balanço Mineral Brasileiro – Gipsita**. 2001.

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.

TOMAZELLI, L.J.; VILLWOCK, J.A. Mapeamento Geológico de Planícies Coesteiras: o Exemplo da Costa do Rio Grande do Sul. Gravel - Porto Alegre, 2005.

VIEIRO, A. C.; SILVA, D.R.A. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul: Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade. Porto Alegre – RS, 2010.

WINTER, J. D. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. Pearson New International Edition, Second Edition, 2010.

WU, Y.; PARKER, F.; KANDHAL, K. - Aggregate Toughness/Abrasion resistance and durability/soundness tests related to Asphalt concrete performance in pavements. NCAT Report.nº 98-4, 1998.