



Larissa Neves Lago

**Avaliação geológico-geotécnica de agregados de rocha
granulítica para uso em pavimentação asfáltica**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
da PUC-Rio.

Orientadora: Prof^a. Raquel Quadros Velloso
Co-orientadora: Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande
Co-orientador: Dr. Roberto Carlos da Conceição Ribeiro
Co-orientador: Prof. Ben-Hur de Albuquerque e Silva

Rio de Janeiro

Março de 2018



Larissa Neves Lago

Avaliação geológico-geotécnica de agregados de rocha granulítica para uso em pavimentação asfáltica

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Co-Orientador

Universidade de Brasília - UnB

Prof. Ben-Hur de Albuquerque e Silva

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Dr. Roberto Carlos da Conceição Ribeiro

Co-Orientador

Centro de Tecnologia Mineral

Dr. Luis Gonzaga Santos Sobral

Centro de Tecnologia Mineral

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 02 de março de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, da orientadora e da universidade.

Larissa Neves Lago

Graduou-se em Geologia pela UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro), em dezembro de 2011. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em março de 2016, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a pavimentação.

Ficha Catalográfica

Lago, Larissa Neves

Avaliação geológico-geotécnica de agregados de rocha granulítica para uso em pavimentação asfáltica / Larissa Neves Lago ; orientadora: Raquel Quadros Velloso ; co-orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande ; co-orientador: Roberto Carlos da Conceição Ribeiro ; co-orientador: Ben-Hur de Albuquerque e Silva. – 2018.

102 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Materiais de construção. 3. Agregados. 4. Granulitos. 5. Pavimentação. I. Velloso, Raquel Quadros. II. Casagrande, Michéle Dal Toé. III. Ribeiro, Roberto Carlos da Conceição. IV. Silva, Ben-Hur de Albuquerque e. V. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. VI. Título.

CDD: 624

Dedico essa dissertação
à minha família.

Agradecimentos

À minha família, mãe, pai, irmãos e amigos, pelo incentivo, por estarem ao meu lado nos momentos felizes, e nos de dificuldade. Muito obrigada. Sem vocês eu não chegaria até onde cheguei.

À Michéle Dal Toé Casagrande, pela orientação, pelo aprendizado, e acima de tudo, pela paciência. Muito obrigada.

Ao Ben-Hur, ao Filipe Ribeiro, e a toda equipe do Laboratório de Fortificação e Construção do IME-RJ, por toda ajuda nos ensaios, disponibilidade, e paciência. Muito obrigada.

Ao Roberto Carlos Ribeiro, pelo aprendizado, por toda disponibilidade e atenção. Muito obrigada.

As minhas amigas Renata Hiraga e Sofia Correa, que me ajudaram diretamente no desenvolvimento dessa dissertação.

Ao professor José Renato Nogueira, e ao meu amigo André Fedele do LEPEC (Laboratório de Estudos de Petrologia e Evolução Crustal), pela paciência.

À professora Laura Motta, ao Marcos Fritzen, e ao Alan Moreno Fernandes do Laboratório de Geotecnia da Coppe/UFRJ, que me auxiliaram nos ensaios de adesividade e no AIMS.

Ao Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, e a todos os funcionários que me receberam de braços abertos, e me auxiliaram nos ensaios lá realizados.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Puc-Rio.

A minha turma de mestrado, pela força, pelo apoio, pelas noites em claro estudando, pelas lágrimas, e pelos risos desses dois anos de convivência. Muito obrigada.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Lago, Larissa Neves; Velloso, Raquel Quadros; Casagrande, Michéle Dal Toé; Ribeiro, Roberto Carlos da Conceição; Silva, Ben-Hur de Albuquerque e. **Avaliação geológico-geotécnica de agregados de rocha granulítica para uso em pavimentação asfáltica.** Rio de Janeiro, 2018. 102 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os agregados são os bens minerais mais consumidos pela indústria de construção civil. Em pavimentos asfálticos, os agregados consistem em cerca de 85% do volume total, e suas propriedades influenciam diretamente em seu comportamento. O presente trabalho refere-se ao estudo da viabilidade de agregados de rochas submetidas ao processo de metamorfismo em condições de alto grau para utilização em pavimentação asfáltica. Os agregados em questão são originados da Pedreira Itereré, localizada em Campos dos Goytacazes, região norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. A rocha é um granulito félsico, composto majoritariamente por minerais félsicos (aproximadamente 88%), fenocristais de plagioclásio e quartzo, e em menor quantidade pode se observar minerais máficos, piroxênio, biotita e minerais opacos. Sabe-se que rochas são com predominância de quartzo e feldspatos apresentam boa resistência mecânica, contudo tendem a ter problemas na adesividade ao ligante asfáltico. Para avaliar os agregados de granulito realizou-se a análise da rocha em lâmina petrográfica e na difração de raios – X, análise granulométrica, ensaios de massa específica e absorção, abrasão Los Angeles, perda ao choque no treton, análise da forma e da textura superficial no AIMS. Além desses, foram avaliadas propriedades do ligante asfáltico como a análise da composição química no FTIR, fracionamento em maltenos e asfaltenos, e sua interação com o agregado nos ensaios de adesividade e de adsorção. Os resultados mostraram uma moderada resistência a degradação mecânica com 30% de abrasão Los Angeles e 12,6% de perda ao choque no treton. A adesividade foi insatisfatória provavelmente devido ao baixo percentual de asfaleno no ligante, e a baixa capacidade de adsorção do agregado. A graduação e propriedades de massa específica, absorção, forma e textura superficial adequadas para revestimentos tipo camada porosa de atrito, mas para utilizar a rocha em pavimentos deve-se adicionar um aditivo devido à insatisfatória adesividade.

Palavras-chave

Materiais de construção; agregados; granulitos; pavimentação.

Abstract

Lago, Larissa Neves; Velloso, Raquel Quadros (Advisor); Casagrande, Michéle Dal Toé (Co-Advisor); Ribeiro, Roberto Carlos da Conceição (Co-advisor); Silva, Ben-Hur de Albuquerque e (Co-advisor). **Geological-geotechnical evaluation of aggregates of granulitic rock for use in asphalt paving**. Rio de Janeiro, 2018. 102 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Aggregates are the mineral goods most consumed by the construction industry. In asphalt pavements, the aggregates consist of about 85% of the total volume, and their properties directly influence their behavior. The present work refers to the study of the feasibility of aggregates of rocks submitted to the process of metamorphism under high-grade conditions for use in asphalt paving. The aggregates in question originate from the Itereré Quarry, located in Campos dos Goytacazes, northern region of the State of Rio de Janeiro, Brazil. Rock is a felsic granulite, composed mainly of felsic minerals (approximately 88%), phenocrysts of plagioclase and quartz, and to a lesser extent, can observe mafic minerals, pyroxene, biotite and opaque minerals. It is known that healthy rocks with predominance of quartz and feldspars and good mechanical resistance, however tend to have problems in the adhesiveness to the asphalt binder. In order to evaluate aggregates of granulates, analyze the analysis of the rock in petrographic scale and in the X - ray diffraction, granulometric analysis, mass and absorption tests, Los Angeles abrasion, treton shock loss, analysis of the surface texture in the AIMS. In addition, asphaltic binder properties were evaluated, such as the analysis of chemical composition in FTIR, fractionation in maltenes and asphaltenes, and their interaction with the aggregate in the adhesion and adsorption tests. The results showed a moderate resistance to mechanical degradation with 30% Los Angeles abrasion and 12.6% treton shock loss. The adhesiveness was unsatisfactory for the low percentage of asphaltene in the binder, and the low adsorption capacity of the aggregate. The gradation and specific mass properties, absorption, shape and surface texture suitable for porous layer coatings of friction, but to use the rock in pavements add an additive due to unsatisfactory adhesion.

Keywords

Construction Materials; aggregates; granulites; asphalt pavements.

Sumário

1.	Introdução	18
1.1	Relevância e Justificativa da Pesquisa	18
1.2	Objetivo	19
1.3	Metodologia	20
2.	Revisão Bibliográfica	22
2.1	Pavimento Asfáltico	22
2.2	Ligante Asfáltico	24
2.3	Agregado Mineral	25
2.3.1	Classificação dos Agregados	26
2.3.2	Características dos Agregados nos Pavimentos Asfálticos	31
2.4	Geologia	38
2.4.1	Rochas Metamórficas	38
2.4.2	Granulito Félsico	41
2.4.3	Mineralogia	42
3.	Pedreira Itereré	48
3.1	Localização	48
3.2	Funcionamento de Britagem	49
4.	Programa Experimental	52
4.1	Materiais Utilizados	52

4.2	Origem do Ligante	52
4.3	Caracterização dos Agregados	53
4.3.1	Geologia Local	53
4.3.2	Separação Litológica	53
4.3.3	Caracterização Granulométrica	53
4.3.4	Descrição Macroscópica	55
4.3.5	Análise Petrográfica	55
4.3.6	Análise Mineralógica na Difração de Raio X	56
4.3.7	Densidade do Agregado Graúdo e Miúdo, e Absorção	57
4.3.8	Forma das Partículas e Textura Superficial	60
4.3.9	Resistência a Abrasão Los Angeles	65
4.3.10	Perda ao Choque no Aparelho Treton	67
4.3.11	Adesividade ao Ligante Asfáltico	69
4.4	Caracterização do Ligante	71
4.4.1	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	71
4.4.2	Separação das Frações Asfálticas e Maltênicas	72
4.5	Interação CAP - Brita	74
4.5.1	Ensaio de Adsorção	74
5.	Resultados e Discussões	75
5.1	Avaliação dos Agregados	75
5.1.1	Geologia Local	75
5.1.2	Separação Litológica	78

5.1.3	Caracterização Granulométrica	79
5.1.4	Descrição Macroscópica	80
5.1.5	Análise Petrográfica	81
5.1.6	Análise Mineralógica na Difração de Raio X	82
5.1.7	Densidade do Agregado Graúdo e Miúdo, e Absorção	84
5.1.8	Forma das Partículas e Textura Superficial	85
5.1.9	Resistência a Abrasão Los Angeles	91
5.1.10	Perda ao Choque no Aparelho Treton	92
5.1.11	Adesividade ao Ligante Asfáltico	92
5.2	Avaliação do Ligante	94
5.2.1	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	94
5.2.2	Separação das Frações Asfálticas e Maltênicas	95
5.3	Interação CAP - Brita	95
5.3.1	Ensaio de Adsorção	95
6.	Conclusão	97
7.	Referências bibliográficas	99

Lista de Figuras

Figura 2.1 Pavimento asfáltico. Fonte: Bernucci, et al. (2010).	22
Figura 2.2 Curvas granulométricas de diferentes tipos de misturas a quente. Fonte: Bernucci, et al. (2010).	23
Figura 2.3 Representação das curvas granulométricas (BERNUCCI <i>et al.</i> 2010)	30
Figura 2.4 Componentes do formato do agregado: forma, angularidade e textura. Fonte: Masad, 2005 (adaptado)	34
Figura 2.5 Grau metamórfico aumentando conforme aumenta a temperatura	39
Figura 2.6 Fácies metamórficas. Fonte: Press, <i>et. al.</i> (2006)	40
Figura 2.7 Classificação metamórfica para granulitos félsicos. Fonte: Winkler (1977)	41
Figura 2.8 Clivagem em relação a formas cristalinas: (a) Cúbica (três direções). (b) Octaédrica (quatro direções). (c) Rombododecaédrica (seis direções). (d) Romboédrica (três direções). (e) Prismática (duas direções). (f) Pinacoidal basal (uma direção)	43
Figura 2.9 Forma cristalográfica do hiperstênio. Fonte: http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/inossilicatos/piroxenios/bdhiperstenio.gif	44
Figura 2.10 Forma cristalográfica da microclina. Fonte: http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdmicroclina.gif	44
Figura 2.11 Forma cristalográfica da Albita. Fonte: http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdalbita.gif	45
Figura 2.12 Forma cristalográfica do quartzo. Fonte: http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdquartzo.gif	46
Figura 2.13 Forma cristalográfica da biotita. Fonte: http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/filossilicatos/bdbiotita.gif	46
Figura 3.1 Localização da Pedreira Itereré. Fonte: Imagem de satélite do software Google Earth.	48

Figura 3.2 Desmonte dos matacões pelo martelo demolidor.	49
Figura 3.3 Transporte dos matacões realizado pela retroescavadeira.	54
Figura 4.1 Separador mecânico do Laboratório de Fortificação e Construção do IME- RJ.	54
Figura 4.2 Peneiras dispostas na ordem do ensaio de granulometria no peneirador mecânico do Laboratório de Fortificação e Construção do IME-RJ.	55
Figura 4.3 Equipamento Bruker-AXS D4 Endeavor do Laboratório de Análises Químicas e Mineralógicas do CETEM.	57
Figura 4.4 Agregados submersos em água.	58
Figura 4.5 Recipiente para obtenção da massa submersa.	58
Figura 4.6 Material usado no ensaio de determinação da massa específica do agregado miúdo.	59
Figura 4.2 Equipamento AIMS do Laboratório de Geotecnia da Coppe/UFRJ.	61
Figura 4.3 Classificação de forma e textura no equipamento AIMS. Fonte: Al Rousan (2004) adaptado.	64
Figura 4.4 Equipamento de Abrasão Los Angeles do Laboratório de Fortificação e construção do IME-RJ.	65
Figura 4.5 Agregados após o ensaio de abrasão Los Angeles.	66
Figura 4.6 Agregados no aparelho treton antes do ensaio.	68
Figura 4.7 Agregados após o ensaio de perda ao choque no treton.	69
Figura 4.8 Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico.	70
Figura 4.9 Material recoberto por água destilada.	70

Figura 4.10 Equipamento PerkinElmer Spectrum 400 FT-IR/FT-NIR <i>spectrometer</i> .	71
Figura 4.11 Método de fracionamento de ligantes asfálticos. Fonte: Ribeiro (2006).	72
Figura 4.12 Material utilizado no procedimento.	73
Figura 4.13 Malteno dissolvido no heptano dentro do soxhlet.	73
Figura 4.14 Malteno todo dissolvido no balão e o solvente incolor dentro do soxhlet, no final do procedimento.	73
Figura 5.1 Charnockito com bolsões de leucogranito.	76
Figura 5.2 Paragnaisse encaixante do corpo intrusivo da Pedreira Itereré.	76
Figura 5.3 Biotita gnaisse porfíritico, rocha encaixante do corpo intrusivo da Pedreira Itereré.	76
Figura 5.4 Granulito charnockítico esverdeado da Pedreira Itereré.	77
Figura 5.5 Leucogranito da Pedreira Itereré.	77
Figura 5.6 Proporção entre o granulito (a esquerda), e leucogranito (a direita).	78
Figura 5.7 Curva granulométrica.	79
Figura 5.8 Visão macroscópica do granulito.	81
Figura 5.9 Lâmina de granulito a um aumento de 2,5x. OPX = ortopiroxênio, Plagi = plagioclásio, Biot = biotita, KF = K-feldspato, Quatz = quartzo.	82
Figura 5.10 Lâmina do granulito na luz natural com aumento de 2,5x.	82
Figura 5.11 Difratoograma obtido na análise quantitativa do agregado.	83

Figura 5.12 Classificação do granulito. Adaptado de Winkler (1977).	84
Figura 5.13 Esfericidade dos agregados graúdos no AIMS.	86
Figura 5.14 Forma 2D do agregado miúdo no AIMS.	87
Figura 5.15 Angularidade dos agregados graúdos e miúdos no AIMS.	88
Figura 5.16 Textura superficial dos agregados graúdos no AIMS.	88
Figura 5.17 Agregado envolvido por ligante asfáltico com falhas destacadas em branco após o ensaio de adesividade.	93
Figura 5.18 Espectro obtido na análise química por FTIR.	94
Figura 5.19 Percentual de adsorção versus concentração de CAP e de maltenos no granulito.	96

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Valores de resistência a abrasão Los Angeles segundo a bibliografia.	32
Tabela 2.2 Tabela os parâmetros de forma de diferentes tipos de rocha. Fonte: Bessa, et al. (2015).	35
Tabela 3.1 Granulometria dos agregados produzidos na Pedreira Itereré.	51
Tabela 4.1 Ordem das peneiras usadas para separar o material do AIMS.	61
Tabela 4.2 Graduação dos agregados para o ensaio de abrasão Los Angeles.	67
Tabela 5.1 Porcentagem de material passante nas respectivas peneiras.	79
Tabela 5.2 Porcentagem de minerais na difração de raios-X.	83
Tabela 5.3 Massas específicas, absorção e porosidade do granulito.	84
Tabela 5.4 Massa específica do agregado miúdo.	85
Tabela 5.5 Parâmetros de forma e textura superficial obtidos no AIMS.	89
Tabela 5.6 Resultado da resistência a abrasão Los Angeles.	90
Tabela 5.7 Resultado da perda ao choque no Treton.	92
Tabela 5.8 Comparação entre bandas encontradas na bibliografia e a banda do CAP 50/70.	94

Lista de Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMS	Aggregate Image Measurement System
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNER	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FTIR	Fourier-transform infrared spectroscopy
IME	Instituto Militar de Engenharia
IV	Infravermelho
JVPEC	Joel Valença – Petrologia e Evolução Crustal
LEPEC	Laboratório de Estudos de Petrologia e Evolução Crustal
NBR	Norma Brasileira
PG	Performace Grade
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

Lista de Símbolos

Al	Alumínio
C	Carbono
Ca	Cálcio
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
K	Potássio
Mg	Magnésio
Na	Sódio
O	Oxigênio
Si	Silício

1 Introdução

1.1 Relevância e Justificativa da Pesquisa

Os agregados são os bens minerais mais consumidos pela indústria de construção civil. A relevância do estudo dos mesmos para a indústria justifica-se pelo seu uso diversas áreas, como por exemplo na construção de moradias, ferrovias, hidrovias, portos, saneamento básico, pavimentação asfáltica, entre outras utilidades (Almeida e Luz, 2009).

Sabe-se que os agregados representam cerca de 85% do volume total das misturas asfálticas, por isso suas características influenciam diretamente no desempenho final do pavimento. Alguns fatores como trabalhabilidade, durabilidade, resistência a fadiga, resistência a degradação, e permeabilidade do pavimento podem ser avaliados previamente com a caracterização dos agregados. Por isso, é imprescindível o estudo dos agregados antes dos mesmos serem empregados em obras de pavimentação (Ahlich, 1996; Bernucci, *et al.* 2010).

Em maio do ano de 2017 foram entregues ao tráfego os trechos duplicados da rodovia BR-101, no município de Campos dos Goytacazes, Estado do Rio de Janeiro. Para a pavimentação desses trechos foram utilizados os agregados de rocha britada da Pedreira Itereré, contudo esses agregados não haviam sido submetidos a nenhum estudo prévio para a análise de adequação para pavimentação. No Estado do Rio de Janeiro é comum o estudo de gnaisses e granitos para pavimentação, devido à alta disponibilidade e uso desses litotipos na região. Já os granulitos não são muito estudados como rocha para material de construção, e como são formados em condições geológicas específicas, precisam de um estudo próprio para a obtenção dos seus parâmetros físicos e mecânicos.

Em território brasileiro os agregados de rocha utilizados em pavimentação devem ser submetidos aos seguintes ensaios (DNIT 031/2006 – ES; Bernucci, *et al.* 2010): caracterização granulométrica, resistência a abrasão, índice de forma das partículas, adesividade ao ligante asfáltico, durabilidade, massa específica e absorção. Esses agregados também devem ser classificados quanto à natureza, ao tamanho e à distribuição dos grãos.

O presente trabalho refere-se à análise dos agregados de rocha da Pedreira Itereré com o objetivo de avaliar se esses são adequados para a pavimentação asfáltica, e analisar a influência dos elementos geológicos na qualidade do material. Com isso, busca-se um melhor entendimento do comportamento dos agregados como um todo nos ensaios requisitados. O estudo se aprofunda na relação das características geológicas do material, representadas aqui pelo processo de formação da rocha, mineralogia, estruturas, e composição química, com os resultados dos ensaios de caracterização. Pois, sabendo dessa relação, os engenheiros e geólogos podem escolher as melhores fontes de material para pavimentação ou, até mesmo, antever as prováveis melhorias.

A Pedreira Itereré está localizada em Campos dos Goytacazes - RJ, e seus agregados são compostos, principalmente, por rochas granulítica/charnoquítica. Essa é uma rocha metamórfica de alto grau, essencialmente quartzo-feldspática com presença do mineral hiperstênio, formada em condições de intensa desidratação. Essas rochas apresentam um empacotamento denso, e minerais de boa resistência mecânica e ao intemperismo.

A pedreira fornece para a empresa responsável pela pavimentação da rodovia BR-101 britas no tamanho 0, 1 e pó de pedra. Essas britas foram submetidas aos ensaios de caracterização e classificação como visto adiante no trabalho.

1.2 Objetivo

O principal objetivo do trabalho é fazer a caracterização dos agregados de rocha da Pedreira Itereré, para determinar se eles são ou não adequados para serem utilizados em pavimentação asfáltica. Ainda, analisar a influência que as características geológicas dos agregados têm sobre os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, para um melhor entendimento de como a natureza das rochas e suas características podem funcionar como insumo para a previsão do comportamento do material nos ensaios recomendados.

1.3 Metodologia

O presente trabalho desenvolveu-se seguindo os seguintes passos:

(a) Revisão bibliográfica;

(b) Trabalho de campo na Pedreira Itereré:

- Execução da geologia local;

(c) Caracterização dos agregados:

- Descrição macroscópica do agregado;
- Descrição petrográfica segundo a norma DNER-IE 006/94;
- Análise mineralógica por Difração de Raios-X;
- Caracterização Granulométrica segundo a norma DNER-ME 083/98;
- Determinação da massa específica do Agregado Graúdo segundo a norma DNER-ME 081/98;
- Determinação da absorção do agregado graúdo segundo a norma DNER-ME 081/98;
- Determinação da densidade do agregado miúdo segundo a norma DNER-ME 194/98;
- Forma das Partículas e Textura Superficial utilizando o aparelho AIMS;
- Resistência a Abrasão segundo a norma DNER-ME 035/98;
- Perda ao choque no aparelho Treton segundo a norma DNER-ME 399/99;
- Determinação da adesividade ao ligante asfáltico segundo a norma DNER-ME 078/94;
- Análise dos resultados obtidos para determinar se o agregado é adequado para ser utilizado em pavimentos flexíveis;

(d) Caracterização do Ligante

- Infravermelho (FTIR) do ligante asfáltico;
- Separação do ligante asfáltico em asfaltenos e maltenos.

(e) Análise da interação CAP/Brita.

- Ensaio de adsorção;

(g) Conclusão.

2

Revisão Bibliográfica

2.1

Pavimento asfáltico

Pavimentos asfálticos são aqueles cuja camada de revestimento é constituída por agregados e ligante asfáltico, basicamente. Esse tipo de pavimento é formado por quatro camadas principais, revestimento asfáltico ou camada de rolamento, base, sub-base e reforço de subleito (Bernucci *et. al.*, 2010) (Figura 2.1).

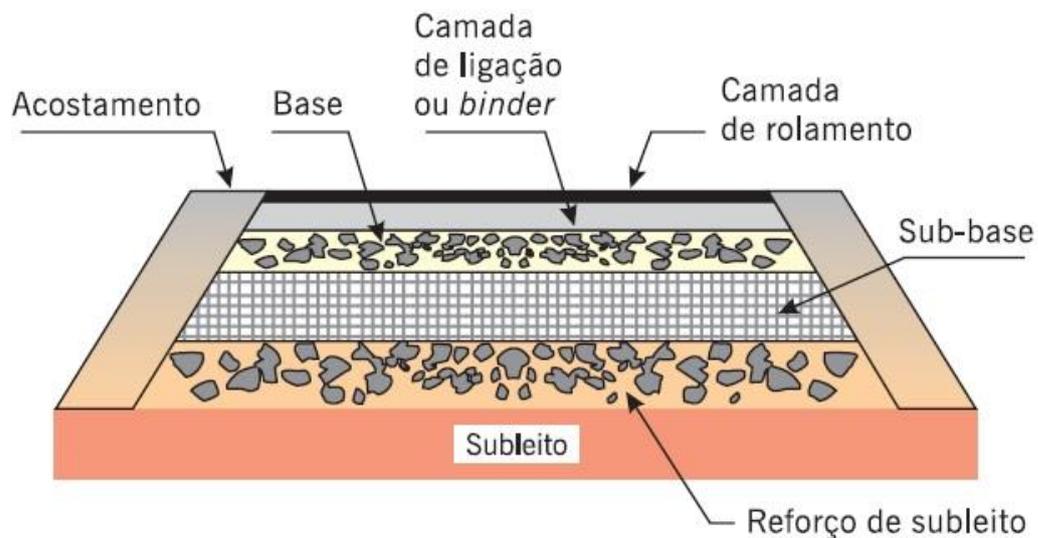


Figura 2.1 Pavimento asfáltico. Fonte: Bernucci, *et al.* (2010).

A camada de revestimento recebe diretamente a carga do tráfego de veículos. Os revestimentos asfálticos são geralmente formados por uma mistura de agregados com vários tamanhos e um ligante asfáltico, de modo que essa mistura atenda aos requisitos exigidos no projeto, como flexibilidade, durabilidade, resistência a fadiga, resistência a derrapagem, entre outros (Bernucci *et. al.*, 2010).

As misturas asfálticas são processadas em usinas estacionárias, e posteriormente transportadas por caminhão para a pista que receberá o tratamento. Misturas asfálticas a quente são diferenciadas pelo padrão granulométrico empregado e por suas exigências mecânicas. As principais misturas a quente podem ser divididas pela graduação dos agregados e *filer* (Bernucci *et al.*, 2010) (Figura 2.2), como visto a seguir.

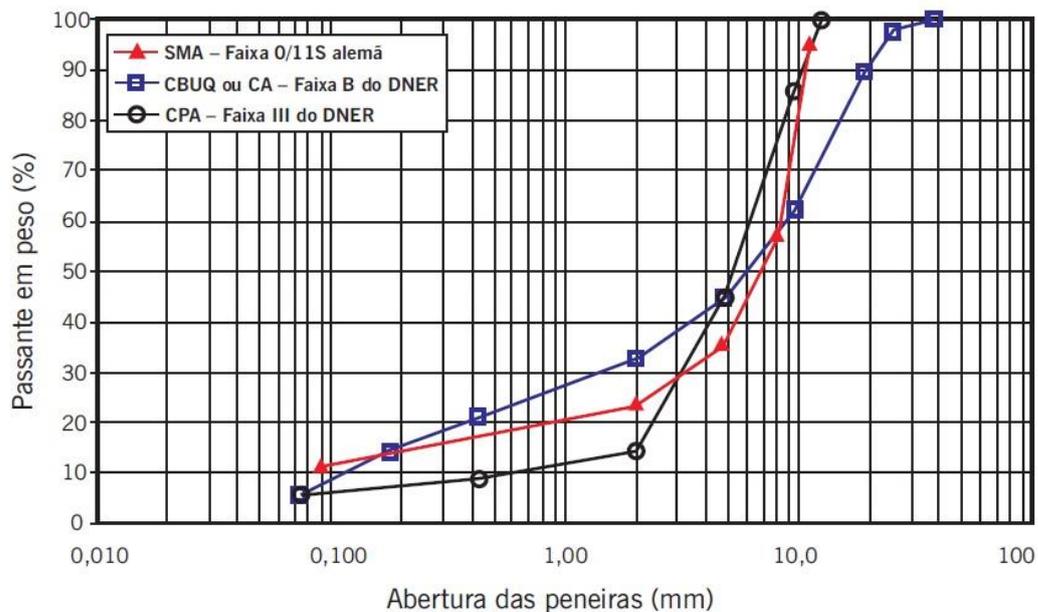


Figura 2.2 Curvas granulométricas de diferentes tipos de misturas a quente. Fonte: Bernucci, *et al.* (2010).

- Concreto asfáltico denso (CA) ou Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) – são as misturas que apresentam graduação densa, ou bem graduada. São misturas muito resistentes em todos os aspectos, desde que os materiais sejam dosados adequadamente.
- Camada porosa de atrito (CPA) – são misturas com graduação de agregados aberta, mantendo assim um grande percentual de vazios preenchidos por ar devido às pequenas quantidades de *filer* e agregado miúdo. Esse tipo de revestimento é frequentemente utilizado para aumentar o atrito pneu-pavimento em dias de chuva. Suas principais características são a redução da espessura da lâmina d'água na superfície, aumento da distância de visibilidade devido à redução do *spray* originado do espirro de águas dos pneus, e conseqüentemente, a redução de acidentes em dias de chuva. Os agregados usados na CPA

devem ser 100% britados, apresentar abrasão Los Angeles $\leq 30\%$, absorção de no máximo 2%, e formato cúbico ou índice de forma $\geq 0,5$.

- *Stone Matrix Asphalt* (SMA) – essa mistura apresenta graduação de agregados descontínua, e é executada de modo a maximizar o contato entre os agregados graúdos, dando ao revestimento uma alta resistência. Os grandes espaços formados entre os agregados graúdos são preenchidos por uma mistura composta por material de fração areia, *filler*, fibras e ligante. Esse tipo de revestimento é indicado para locais com alta frequência de caminhões, áreas de carregamento e descarregamento de cargas, portos, estacionamentos.

2.2

Ligante Asfáltico

Para Bernucci *et al.* (2010), o ligante asfáltico é um ligante betuminoso originado da destilação do petróleo, com as seguintes propriedades: é adesivo termoviscoplastico, impermeável a água, e pouco reativo. A denominação CAP (cimento asfáltico de petróleo) é usada para designar esse material que pode se apresentar semi-sólido a baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente, ou líquidos em altas temperaturas.

Os CAPs são formados, a uma proporção de 90-95% por hidrocarbonetos, e, de 5-10% por heteroátomos como enxofre, oxigênio, nitrogênio, e metais. Essa composição é bastante complexa, para qual o número de carbono por molécula varia de 20 a 120, e tem influência nas propriedades físicas.

O que determina a composição química do CAP é o tipo de fracionamento realizado no ligante. O método mais moderno de fracionamento é o método SARA (“S” de saturados, “A” de aromáticos, “R” de resinas, “A” de asfaltenos), que separa o ligante nas seguintes frações: maltenos (saturados, naftenos-aromáticos, polar aromáticos) e asfaltenos.

Os asfaltenos apresentam alto peso molecular, e representam a fração mais pesada do CAP, porém estão presentes em menor proporção. Quimicamente são formados por resíduos de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos ou aromáticos, e grupos que contém oxigênio, nitrogênio ou enxofre.

Os maltenos são compostos de alto peso molecular, e representam o maior percentual na composição dos ligantes asfálticos. Geralmente, apresentam oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais em sua estrutura (Ribeiro, 2006).

Entre as principais propriedades físicas para caracterização do ligante asfáltico, destacam-se: o ensaio de penetração, o ensaio de viscosidade, o ponto de amolecimento e o grau de desempenho.

O ensaio de penetração é determinado pela profundidade que uma agulha de massa padronizada penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, durante cinco segundos, à uma temperatura de 25°C (Bernucci *et al.*, 2010).

O ensaio de viscosidade é uma medida da consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento (Bernucci *et al.*, 2010).

O ensaio de ponto de amolecimento é uma medida empírica que relaciona a temperatura para qual o ligante asfáltico amolece quando aquecido sob condições particulares e atinge determinada condição de escoamento (Bernucci *et al.*, 2010).

O grau de desempenho, ou *performance grade* (PG) classifica o material segundo seu desempenho para um intervalo de temperatura. Por exemplo, se um CAP apresenta PG 64 – 10, significa que o ligante é adequado para uso a uma temperatura máxima de 64°C e mínima de 10°C (D’Antona e Frota, 2011).

2.3

Agregado Mineral

Segundo a norma ABNT NBR 9935, agregados podem ser descritos como materiais granulares, geralmente inertes, com dimensões e propriedades apropriadas para argamassa ou concreto. Os agregados naturais são definidos como um material pétreo granular que pode ser utilizado como é encontrado na natureza, ou submetido à lavagem e a britagem.

Ao longo do tempo, alguns autores descreveram a importância do agregado em misturas asfálticas. Essas descrições indicam propriedades diferentes para a avaliação da influência do material, mas todas convergem ao sinalizar a grande importância do mesmo.

Moavenzadeh e Goetz (1963) descreveram uma mistura betuminosa indicada como um sistema basicamente trifásico composto por betume, agregado e ar. Para que essa mistura sirva para sua finalidade, deve ser compactada apenas até certo ponto durante a construção. É observado que durante sua vida útil, a mesma é submetida a uma compactação adicional devido ao tráfego de veículos. Para os autores, essa densificação adicional promove a deteriorização progressiva do pavimento, onde a resistência à degradação do agregado tem grande influência.

Uma vez que cerca de 85% do volume e 94% do peso total de misturas asfálticas a quente são formadas por agregados, o desempenho dessas é muito influenciado pelas propriedades desse material (Ahlrich, 1996 ; Kandhal e Parker, 1998).

Em Marques (2001) foi constatado que os agregados apresentam parâmetros de resistência, como abrasão e dureza, que dependem diretamente das propriedades da rocha de origem. Porém, o processo de beneficiamento pode afetar esses parâmetros.

2.3.1

Classificação do Agregado

(a) Quanto à Natureza

Os agregados podem ser classificados segundo sua natureza como: natural, artificial ou reciclado.

Os agregados naturais são provenientes de rochas naturais, ou seja, com fonte de ocorrência natural. Esses agregados podem ser utilizados tal qual são encontrados na natureza, e são obtidos por meio de escavação, desmonte, entre outras formas.

Existem quatro tipos principais de agregados naturais (Bernucci *et al.*, 2010) (Grotzinger e Jordan *et al.*, 2013):

- Ígneos – agregados derivados de rochas ígneas. As rochas ígneas são rochas formadas diretamente do resfriamento do magma. São classificadas quanto à granulação (extrusivas ou intrusivas), ou quanto

aos minerais constituintes (félsicas intermediárias, máficas ou ultramáficas).

- Sedimentares – São formadas a partir da deposição seguida da diagênese de sedimentos oriundos através do intemperismo e erosão de rochas expostas na superfície. Quando submetida a processos intempéricos, a rocha sofre desintegração física e química, de modo que o material fragmentado pode ser erodido e transportado para uma bacia sedimentar onde o mesmo será depositado. O processo de formação da rocha sedimentar passa pela subsidência e compactação desses sedimentos.
- Metamórficos – agregados derivados de rochas metamórficas. As rochas metamórficas são formadas quando rochas pré-existentes (ígneas, sedimentares ou metamórficas) são submetidas a altas pressões e/ou temperaturas, resultando na mudança da sua mineralogia, estrutura e textura cristalina.
- Areias e pedregulhos – agregados originados por processos naturais de desintegração das rochas pré-existentes.

As características principais dos agregados naturais são determinadas pela análise macroscópica, e microscópica (petrográfica). A última deve ser realizada de acordo com a norma técnica DNER-IE 006/94 que dispõe sobre a análise petrográfica de materiais rochosos utilizados em rodovias.

- Agregados artificiais são materiais granulares resultantes de processos industriais envolvendo alterações mineralógicas, química ou físico-química da matéria-prima original, como descrito na norma ABNT NBR 9935. Escória de alto-forno e de aciaria são exemplos de agregados artificiais (Bernucci *et al.*, 2010).

Segundo a norma ABNT NBR 9935, os agregados reciclados são materiais obtidos por meio de processos de reciclagem, demolição de construção civil, ou subprodutos da produção industrial, mineração ou construção. Os processos de reciclagem de revestimento asfáltico existentes são uma das principais fontes de agregados reciclados, assim como resíduos de construção civil em locais com ausência agregados pétreos ou em áreas com pedreiras que tenham o objetivo de reduzir os problemas ambientais de disposição desses resíduos (Bernucci *et al.*, 2010).

(b) Classificação quanto ao tamanho

Os agregados que constituem as misturas asfálticas podem ser classificados quanto ao tamanho máximo de suas partículas, ou melhor, quanto à sua maior fração granulométrica. Segundo (Bernucci *et al.*, 2010), os agregados podem ser separados da seguinte forma:

- Agregado graúdo é o material com dimensões maiores que 2,0 mm, logo fica retido na peneira #10. Esses agregados podem ser britas, cascalhos, seixos, entre outros.
- Agregado miúdo apresenta dimensões maiores que 0,075 mm e menores que 2,0mm, ou seja, é o material que fica retido na peneira de número 200, mas passa pela peneira #10. É representado pelas areias e pelo pó de pedra.
- Material de enchimento (fíler) apresenta, pelo menos, 65% das partículas menores que 0,075 mm, e pode ser o cimento Portland ou a cal hidratada, por exemplo.

Para Bernucci *et al.* (2010), o tamanho máximo dos agregados influencia no comportamento mecânico das misturas asfálticas, de modo que com agregados de tamanho máximo excessivamente pequeno podem se tornar instáveis, e com agregados excessivamente grandes podem prejudicar sua trabalhabilidade.

Na pesquisa realizada por Brown e Basset (1989), foram realizados diversos testes em misturas asfálticas variando o tamanho máximo do agregado. A rocha utilizada foi um calcário, e os tamanhos máximos dos grãos foram de 3/8, 1/2, 3/4, 1" e 1 ½ polegadas. Os testes foram conduzidos para analisar a resistência à tração indireta, módulo resiliente e fluência. O resultado do estudo demonstrou uma tendência a aumentar a qualidade da mistura em relação aos desempenhos de fluência, módulo resiliente e resistência à tração, conforme o aumento do tamanho máximo do agregado.

Hao e Xu (2017), realizaram uma pesquisa sobre o efeito do tamanho máximo do agregado em misturas SMA. Segundo eles, SMA é um tipo de revestimento asfáltico de mistura usinada a quente caracterizado por um maior conteúdo de agregados grosseiros. O contato dos grãos produz um revestimento

SMA altamente resistente à deformação por cisalhamento. Comparado com a mistura graduada densa, a SMA contém mais ligante asfáltico, o que leva a uma mistura de asfalto durável com melhor resistência a rachaduras, dano de umidade e envelhecimento. O aumento do tamanho máximo do agregado resultou em um incremento na resistência à deformação permanente do mesmo. Foi também observado que, conforme se diminui o tamanho máximo do agregado, menor são os vazios na mistura asfáltica.

(c) Classificação Quanto à Distribuição dos Grãos

A distribuição granulométrica dos agregados influencia em diversos parâmetros essenciais para comportamento adequado da mistura asfáltica, como por exemplo, permeabilidade, rigidez, trabalhabilidade, durabilidade, resistência a fadiga, entre outros aspectos (Kandhal e Cooley, 2001 ; Bernucci, *et al.* 2010).

Segundo Ahrich (1996), a qualidade de uma mistura asfáltica usinada a quente é influenciada significativamente pela graduação dos seus agregados, pois a graduação controla a estrutura de vazios da mistura. Uma graduação muito densa, teoricamente produz misturas asfálticas mais fortes, mas devido ao baixo vazio dos agregados, essa mistura é muito sensível à variação no teor de asfalto.

Existem várias formas de graduação granulométrica, que são aplicadas nas misturas asfálticas de acordo com sua aplicação. Segundo Bernucci *et al.* (2010), as mais importantes graduações são (Figura 2.3):

- Agregado com graduação densa, ou bem-graduado apresenta distribuição granulométrica contínua;
- Agregado com graduação aberta apresenta distribuição contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075 mm), o que resulta em um maior volume de vazios;
- Agregado com graduação uniforme apresenta a maioria dos grãos em uma faixa estreita em relação à moda, sua curva granulométrica é íngreme;
- Agregado com graduação descontínua em degrau apresenta um pequeno percentual de agregados com tamanho intermediário. Sua curva

granulométrica possui um patamar ou degrau, correspondente às granulometrias intermediárias.

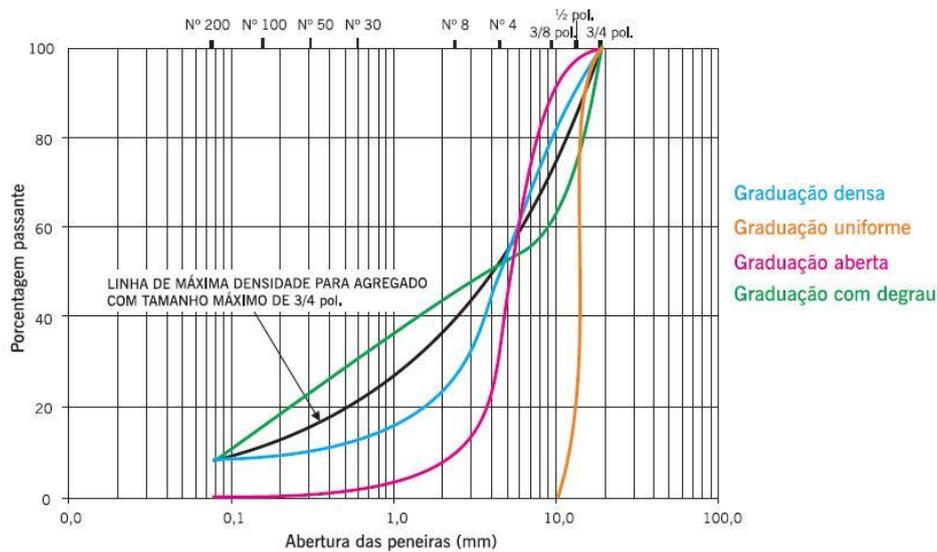


Figura 2.3 Representação das curvas granulométricas (BERNUCCI *et al.* 2010).

Em seu estudo sobre a influência da graduação dos agregados em deformações permanentes, Ahlrich (1996) utilizou cascalho, areia natural, e calcário com tamanho máximo de 3/4". Dentre as oito diferentes graduações testadas, quatro obtiveram os melhores resultados: duas bem selecionadas, e duas com predominância de agregados graúdos. O autor relata que, provavelmente, as graduações com maior porcentagem de agregados graúdos obtiveram bons resultados porque apresentam grande quantidade de material retido na peneira com abertura de 4,8 mm. Desta forma, a sua mistura produz alta resistência devido ao contato pedra/pedra (graduação SMA).

Já Golalipour *et al.* (2012), que também realizou um estudo sobre a influência da graduação dos agregados em deformações permanentes, observou os agregados graúdos por outro ângulo. Em seu resultado, constatou que graduações com predominância de agregados graúdos apresentam maior suscetibilidade a sofrer deformações permanentes que as graduações mais densas.

Na pesquisa de Afaf (2014), foi avaliado o efeito da variação do agregado nas propriedades de Marshall para misturas usinadas a quente. O agregado usado foi de rocha calcária, e o tamanho máximo utilizado no estudo foi de 19 mm. A graduação com predominância de agregados graúdos contribuiu para

uma melhor rigidez, melhor estabilidade, e apresentou um ótimo desempenho contra fluxo. Já a graduação com maior presença de finos, teve um ótimo desempenho contra deformações.

2.3 2

Características dos Agregados nos Pavimentos Asfálticos

(a) Características Granulométricas

A importância das características granulométricas dos agregados está descrita nos **itens 2.2.2 e 2.2.3**. Essa distribuição é obtida por meio da análise granulométrica por peneiramento, de acordo com a norma DNER ME 083/98 como disposto no capítulo 3 (programa experimental) que apresenta a metodologia de análise granulométrica em agregados.

(b) Degradação mecânica

Para Moavenzadeh e Goetz (1963), a degradação dos agregados de rocha ocorre devido a dois fenômenos, desgaste e ruptura. O desgaste é causado pelo deslizamento das partículas em relação às outras, e a ruptura ocorre quando a pressão de contato excede a força da partícula em uma determinada direção.

Segundo Bernucci *et al.* (2010), durante o processo de manuseio e construção de revestimentos asfálticos, os agregados passam por quebras e abrasão, sendo que a abrasão também ocorre durante o tráfego de carros depois do revestimento já construído. Por isso, os agregados devem apresentar resistência a abrasão e resistir a quebras e à desintegração.

Em sua pesquisa, Moavenzadeh e Goetz (1963) relacionaram as características dos agregados com a degradação das misturas asfálticas. Nesse estudo foram avaliados os seguintes parâmetros: tipo de agregado, graduação do agregado, forma do agregado, e outros dois fatores que não serão tratados no presente trabalho, conteúdo de asfalto e esforço de compactação. Como resultado, os autores demonstraram que a graduação da mistura asfáltica é o fator mais importante no controle da degradação da mistura asfáltica. À medida

que a graduação se torna densa, a degradação diminui. O tipo de agregado também influencia na degradação, rochas com bom entrelaçamento entre os grãos apresentam baixo valor de abrasão Los Angeles, e produzem misturas com baixa degradação. No caso dessa pesquisa, quartzitos mostraram melhores resultados que calcários, seguidos dos dolomitos. Quanto a relação entre os valores de abrasão Los Angeles de degradação das misturas asfálticas, os autores comprovaram que essa relação não é linear, pois varia com a magnitude do esforço de compactação das misturas. A forma do agregado também pode influenciar na degradação das misturas asfálticas, considerando que partículas com formato arredondado produzem misturas com menor degradação que partículas angulares.

Segundo a norma brasileira, o principal ensaio usado para avaliar os agregados quanto à resistência ao desgaste é o de Abrasão Los Angeles, como pode ser visto na Tabela 2.1, resultado das pesquisas de alguns autores brasileiros. Wu, *et al.* (1998) atentaram para os riscos de se obter a resistência mecânica de um conjunto de agregados utilizando apenas um método.

Em sua pesquisa, Wu, *et al.* (1998) utilizaram cinco métodos de medição de resistência a abrasão: Abrasão Los Angeles (AASHTO T 96), valores de impacto do agregado (Britânico), valores de “crushing” do agregado (Britânico), abrasão no Micro-Deval (Francês/Canadense), e degradação no compactador giratório SHRP. Para valores de abrasão do agregado, relacionando com a degradação da mistura asfáltica, o método que obteve os melhores resultados foi a abrasão no Micro-Deval.

Para completar o presente trabalho, além do valor de abrasão Los Angeles, também foi utilizada a resistência ao choque no aparelho Treton.

Tabela 2.1 Valores de resistência a abrasão Los Angeles segundo a bibliografia.

Abrasão Los Angeles		
Bibliografia	Rocha	Abrasão
Gouveia (2006)	Gabro	18%
	Basalto	16%
Ribeiro (2006)	Basalto	15-25%
	Granito	28%
	Calcário	36%
Alves (2014)	Biotita Gnaisse	43%
	Sienito e Traquito	24,80%
	Granito	43,70%

A resistência à degradação mecânica ou química do agregado também depende da natureza geológica do mesmo. Segundo Moavenzadeh & Goetz (1963), o limite entre os grãos, cimentação e porcentagem de vazios de um agregado influenciam em sua resistência à degradação. O bom entrelaçamento entre os grãos de calcário resultara em um baixo valor de abrasão no equipamento Los Angeles. Já o fraco entrosamento entre os grãos da dolomita, resultaram em baixos valores de abrasão Los Angeles.

No estudo realizado por Alves (2014), foram avaliados os seguintes litotipos, amostrados em pedreiras distintas: biotita gnaisse, granito, traquito e sienito. O traquito e o sienito foram os litotipos que apresentaram os melhores resultados de resistência mecânica (abrasão Los Angeles, impacto no treton, e esmagamento). Um dos motivos para essa boa resistência deve-se a uma cobertura carbonática originada de alteração hidrotermal, a qual aumentou consideravelmente a resistência da rocha. Além desse fator, destacam-se a granulometria fina das rochas em questão, e a ausência de biotita mineral de baixa resistência. Já o gnaisse estudado pelo autor apresentou altos valores de perda de massa, o que foi atribuído principalmente à cloritização dos feldspatos e biotitas presentes na rocha. Outros fatores relevantes na alta perda de massa do gnaisse são a elevada quantidade de muscovita devida a atividades intempéricas, e o excesso de microfaturas em seus minerais. O granito também apresentou baixa resistência mecânica, atribuída à grande quantidade de microfaturas presentes em seus minerais, devido à sua granulometria muito grossa. A grande quantidade de biotitas que apresentam alteração para muscovita ou clorita também é responsável pela queda da resistência da rocha.

(c) Forma das Partículas e Textura Superficial

A geometria das partículas pode ser expressa por três propriedades basicamente: forma (ou lamelaridade), angularidade, e textura superficial (Figura 2.4). A forma representa as variações entre as proporções da partícula, comprimento e largura. A angularidade reflete as variações na forma. E a textura superficial descreve a irregularidade da superfície da partícula (Masad, 2005).

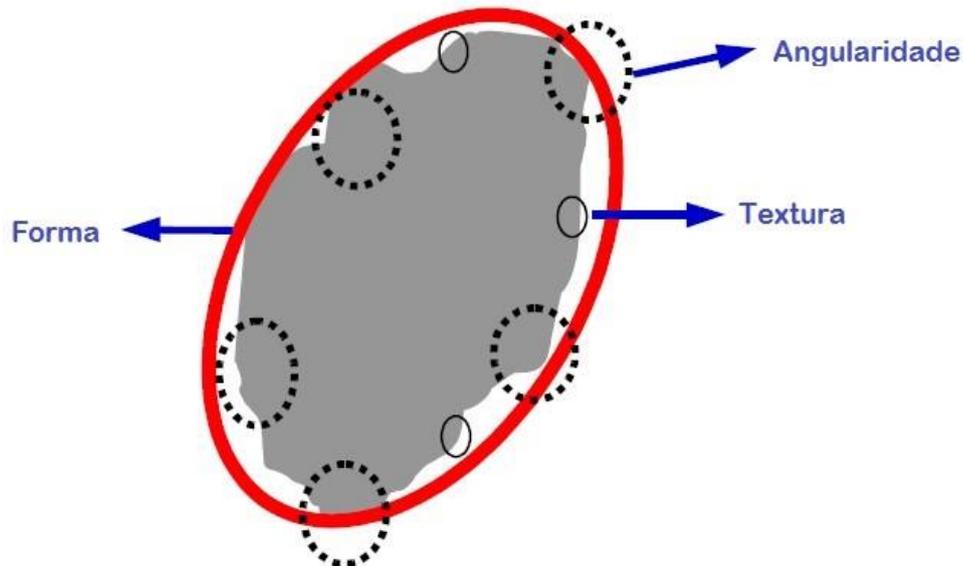


Figura 2.4 Componentes do formato do agregado: forma, angularidade e textura. Fonte: Masad, 2005 (adaptado).

Segundo Al Rousan (2004), as propriedades de forma dos agregados graúdos e finos utilizados em misturas asfálticas quentes são importantes para o desempenho do pavimento. Contudo, os métodos tradicionais de avaliação dos parâmetros da forma (forma, angularidade e textura) são limitados e trabalhosos. Por isso, em sua tese, Al Rousan desenvolveu uma versão aprimorada do sistema de captura de imagens *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), para análise precisa da forma do agregado.

Para Ahlrich (1996), a forma (angularidade) e a textura superficial (rugosidade) dos agregados influenciam significativamente o desempenho de misturas asfálticas usinadas a quente. A forma e a textura dos agregados graúdos (retidos na peneira nº4), e dos agregados finos (passantes na peneira nº4) controlam a resistência à corrosão da mistura, o que afeta o desempenho e a capacidade de manutenção. Agregados angulares e ásperos produzem pavimentos de maior qualidade que os lisos.

Para Bessa (2012), em misturas asfálticas os agregados com formato alongado (lamelares) podem quebrar durante o processo de compactação, o que altera a granulometria dos mesmos. Essa quebra pode expor faces de agregados sem revestimento de ligante e mudar as características das misturas. Já a angularidade dos agregados é a responsável pelo atrito pneu-pavimento, quanto mais angular maior o atrito. Apesar do fato de agregados muito angulares poderem promover um maior entrosamento entre as partículas, aumentando a

resistência ao deslocamento durante a compactação. A textura superficial (rugosidade) dos agregados também influencia no atrito pneu-pavimento, pois os agregados estão constantemente em contato com o tráfego de veículos.

De acordo com a pesquisa de Bessa *et al.* (2013), as propriedades relacionadas a forma, textura, e angularidade foram investigadas em material de fontes mineralógicas diferentes, ou pedreiras diferentes, com semelhante processo de britagem. Foram estudados um granito, um gnaisse e um fonolito. Em Bessa *et al.* (2015), os agregados estudados apresentaram propriedade de forma e angularidade semelhantes, e textura superficial diferentes, como observado na Tabela 2.2. Pode-se concluir que a mineralogia não teria tanta influência no parâmetro de forma, mas pode ter influência na textura superficial.

Tabela 2.2 Tabela os parâmetros de forma de diferentes tipos de rocha. Fonte: Bessa, *et al.* (2015).

Litotipo	Granito	Gnaisse	Fonolito
Mineralogia	K-feldspato, Quartzo, Plagioclásio	K-feldspato, quartzo, plagioclásio, muscovita e biotita	Feldspato, Piroxênio, Olivina
Granulometria	Grossa	Média a grossa	Fina
Estrutura	Maciça	Bandamento gnássico	Orientação por fluxo magmático.
Forma 2D	Semialongado	Semialongado	Semialongado
Esfericidade	Baixa	Baixa	Baixa
Angularidade	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado
Rugosidade	Baixa	Moderada	Alta

(d) Adesividade ao Ligante Asfáltico

Segundo a norma DNER ME 078/94, adesividade é a propriedade que o agregado tem de ser aderido ao material betuminoso.

Ribeiro (2006) demonstrou que a interação entre o asfalto e o agregado mineral depende do alumínio presente nos minerais constituintes do mesmo, pois em presença deste elemento químico há uma melhor adsorção entre o agregado e o ligante. Já a presença de sílica nos agregados, apesar de lhes proporcionar boa resistência mecânica, pode influenciar negativamente na interação CAP-brita, pois torna o agregado mais hidrofílico, ou seja, com maior afinidade com a água que com o CAP. O gnaisse, granito e o basalto analisados por Ribeiro (2006), apresentaram resultados similares em relação a adsorção do ligante asfáltico. O granito e o gnaisse, obtiveram mesmo comportamento, por terem composição mineralógica similar, e o basalto, apesar de não ter alto teor de quartzo, também não tem a biotita para promover uma boa adsorção juntamente com os feldspatos. Para Ribeiro (2006), deve-se atentar ainda, para a influência de composição do CAP na adesividade. Em sua pesquisa foi constatado que a fração do CAP que promove uma forte ligação entre o mesmo e o agregado é a fração asfáltica, já a fração maltênica apresenta baixos valores de adsorção com o agregado.

Para Bernucci *et. al.* (2010), a capacidade da água em deslocar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado, pode deixá-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Os agregados podem ser classificados em hidrófilos, quando tem afinidade com a água, ou hidrofóbicos, quando possuem alta adesividade em presença de água. Agregados silicosos como alguns granitos e quartzitos requerem maior atenção quanto à adesividade.

Para Tarrer e Wagh (1991), a separação da película de ligante asfáltico da superfície de agregado consiste em um mecanismo complexo dependente de muitas variáveis como as características do agregado, as características do asfalto e o ambiente de tráfego. Por meio de sua revisão bibliográfica, esses autores descreveram que a remoção de asfalto de uma superfície de agregado pode ocorrer devido cinco a mecanismos diferentes, são eles:

- Destacamento: quando ocorre a separação da película de asfalto da superfície de agregado sem ruptura da película, ou seja, a mesma pode ser removida totalmente do agregado, indicando uma perda total da adesão. Esse fenômeno ocorre devido a polaridade da superfície dos materiais envolvidos. A maioria dos agregados tem superfície carregada eletricamente, por isso apresentam um vínculo maior com a água que é

altamente polar, do que com o asfalto que apresenta pouca atividade polar.

- Deslocamento: quando a água penetra na superfície do agregado por meio de uma ruptura na película do ligante asfáltico. Essa ruptura pode ocorrer nas bordas afiadas, ou áreas muito angulares dos agregados.
- Emulsão espontânea: quando o asfalto e a água se combinam para formar uma emulsão. Esse tipo de remoção de asfalto da superfície do agregado pode ser agravada por emulsionantes como argilominerais e alguns aditivos de asfalto.
- Pressão de poros: a remoção da película do ligante por pressão de poros ocorre em misturas com muitos vazios, onde a água consegue circular por meio de vazios interligados. Após a densificação do revestimento asfáltico devido ao carregamento do tráfego, a água pode ficar presa, sob pressão, em vazios impermeáveis. Essa pressão pode causar a remoção do asfalto.
- Limpeza hidráulica: é um mecanismo de remoção que ocorre apenas na superfície dos revestimentos asfálticos. O desgaste hidráulico resultante da ação dos veículos em uma superfície de pavimento saturada pode causar a remoção do asfalto da superfície do agregado.

(e) Porosidade e Absorção de Água

A natureza do agregado inclui sua história geológica, mineralogia, composição química, porosidade, permeabilidade, estruturas geológicas, textura, entre outras características.

Um importante parâmetro para o cálculo correto da dosagem de misturas asfálticas é massa específica (ou densidade) do agregado mineral. Para chegar a um teor de asfalto ótimo de uma mistura asfáltica, é necessário considerar as massas específicas dos agregados. A densidade deste material está diretamente ligada a sua composição mineralógica e ao seu arranjo cristalino.

A absorção de água por um agregado mineral, está intimamente ligada a sua porosidade. Um agregado poroso vai absorver muita água e, conseqüentemente, também irá absorver ligante asfáltico. Com isso, vai consumir parte do ligante necessário para dar coesão à mistura asfáltica (Bernucci *et al.* 2010). Para Gouveia (2006), a absorção de asfalto está diretamente ligada com a porosidade do agregado, pois a porosidade total é um indicador da capacidade de absorção máxima do agregado. A taxa de absorção de asfalto é afetada pela porosidade da partícula, tamanhos de seus poros,

forma dos poros e frequência. A porosidade é uma propriedade do agregado que pode ter origem em sua natureza, como em arenitos não cimentados, ou na sua história geológica, como em rochas cristalinas muito fraturadas.

2.4 Geologia

2.4.1

Rochas metamórficas

Segundo Grotzinger e Jordan (2013), o metamorfismo ocorre quando uma rocha é submetida a mudanças significativas de pressão e temperatura em um período de tempo suficiente para que ocorra mudanças na mineralogia, na textura, na composição química, até que esses parâmetros se tornem estáveis com as novas condições.

A maior parte das rochas metamórficas forma-se em profundidades entre 10 e 30 km, ou seja, nas porções médias a inferiores da crosta. Posteriormente, essas rochas são exumadas, ou transportadas de volta à superfície, e expostas como afloramento.

A temperatura, a pressão e a composição dos fluidos internos da terra são os fatores mais importantes na ocorrência de metamorfismo. A temperatura pode transformar a composição mineralógica, química e a textura de uma rocha através da quebra de ligações químicas e alteração das estruturas dos cristais da rocha. A pressão no interior da terra oriunda das forças verticais exercidas pelo peso das rochas sobrejacentes, e das forças horizontais ou direcionais que são originadas em movimentações tectônicas.

Rochas metamórficas podem ser classificadas tanto por seu grau metamórfico (alto grau, médio grau, baixo grau), quanto por suas fácies. O grau metamórfico é utilizado para determinar o estágio do metamorfismo. Seu aumento corresponde ao aumento da temperatura em função da pressão (Figura 2.5), e pode ser identificado a partir de minerais índices, ou seja, minerais característicos de uma zona restrita de pressão e temperatura.

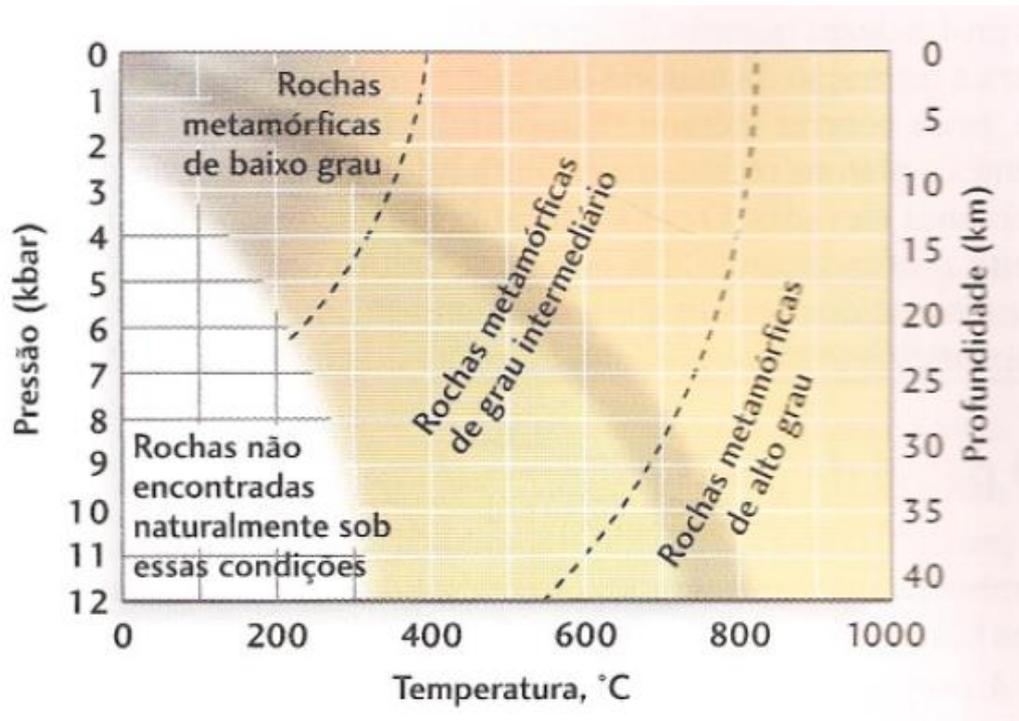


Figura 2.5 Grau metamórfico aumentando conforme aumenta a temperatura. Fonte: Press, *et al.* (2006).

Já as fácies metamórficas são grupos de rochas de composições minerais distintas, correspondente a diferentes graus metamórficos, e/ou de diferentes protólitos (Figura 2.6). As fácies metamórficas determinam, mais especificadamente, a intensidade de metamorfismo preservado na rocha (Winkler, 1977 ; Grotzinger e Jordan, 2013).

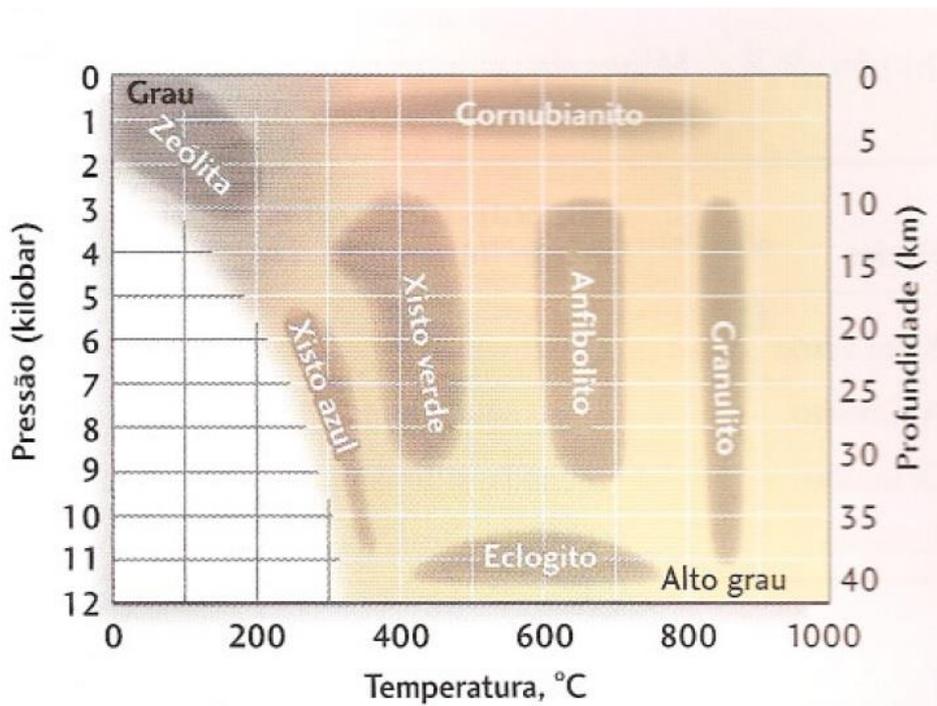


Figura 2.6 Fácies metamórficas. Fonte: Press, *et al.* (2006).

O metamorfismo provoca uma mudança textural nas rochas afetadas. A textura da rocha metamórfica é identificada pelo tamanho, forma, e arranjo dos minerais constituintes. A variação do tamanho dos grãos é um quesito importante para a avaliação do grau metamórfico da rocha, pois geralmente, quanto maior o tamanho do grão, mais alto o grau de metamorfismo (Grotzinger e Jordan, 2013).

Existem inúmeras texturas metamórficas, sendo que as mais comuns são as foliadas, porfiroblástica, e granoblásticas. A textura foliada é caracterizada por um conjunto de superfícies paralelas, planas ou onduladas, produzidas por deformações. A textura porfiroblástica ocorre quando um novo mineral metamórfico cresce muito mais que o restante dos minerais, resultando assim em um cristal grande circundado por uma matriz com grãos muito pequenos. Já a textura granoblástica é composta por minerais que cresceram de modo equidimensional, formando uma estrutura maciça.

Ao serem levadas de volta a superfície terrestre, as rochas metamórficas passam por um estágio de diminuição de temperatura e pressão, que podem causar o retrometamorfismo da rocha. O retrometamorfismo consiste na transformação metamórfica de uma rocha em outra de grau metamórfico mais baixo.

2.4.2

Granulito Félsico

Winkler (1977) definiram as rochas granulíticas, como rochas de metamorfismo regional de grau forte, félsicas ou máficas, de qualquer tamanho de grão. Os feldspatos são os maiores constituintes, compondo 20% ou mais da rocha. Não há muscovita primária associada a quartzo e feldspato. Os minerais máficos presentes são predominantemente anidros e a textura predominante é a granoblástica. As rochas granulíticas apresentam associações minerais diagnósticas da zona regional do hiperstênio, e são formadas em condições anidras.

Para Winkler (1977), granulitos com hiperstênio, plagioclásio e/ou feldspato alcalino perfitico, com ou sem quartzo, podem ser classificadas segundo uma nomenclatura que inclui granulitos de composição félsica ou máfica, como por exemplo, usando o diagrama proposto por Streckeisen (1967) (QAP) adaptado (Figura 2.7). No caso, um granulito charnockítico indica que a rocha apresenta composição charnockítica, apesar de ter origem metamórfica. Sendo assim, a composição mineralógica básica desses granulitos é quartzo (Q), feldspato (A) e plagioclásio (P).

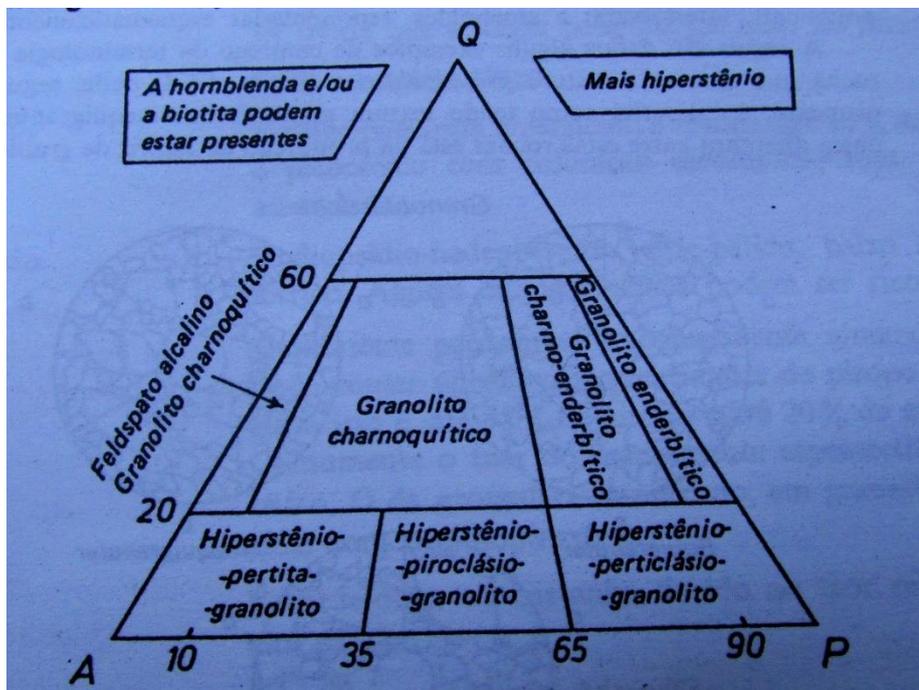


Figura 2.7 Classificação metamórfica para granulitos félsicos. Fonte: Winkler (1977).

2.4.3

Mineralogia

Um mineral é um sólido de ocorrência natural com um arranjo atômico altamente ordenado e uma composição química homogênea e definida. Minerais são normalmente formados por processos inorgânicos, e suas propriedades físicas são uma expressão da sua composição interna, principalmente de sua composição química (Klein e Dutrow, 2012).

Um exemplo de propriedade física é a forma cristalina, que é traduzida em uma aparência externa que assume uma forma geométrica regular. Quando um mineral exibe uma forma cristalina bem desenvolvida, sua aparência externa é classificada como a forma geométrica que apresenta, como por exemplo: prismático, quando um mineral tem uma dimensão mais longa que outras duas, ou cúbico, quando a forma externa do mineral é representada por um cubo.

Outra característica importante dos minerais é o seu hábito mineral, ou seja, a forma geral de um mineral incluindo suas irregularidades devido ao crescimento. Dentre os hábitos, destacam-se o maciço, quando um mineral não apresenta faces cristalinas. O granular, que é formado por grãos minerais de tamanho aproximadamente igual, e o micáceo, quando o mineral se separa facilmente em placas.

As propriedades mecânicas do mineral, descritas por Klein e Dutrow (2012), demonstram a intensidade das forças internas que unem os átomos individuais, ou seja, refletem a força das suas ligações. Essas propriedades são a clivagem, fraturas, partição e dureza. Sendo que a clivagem, fratura, e partição são uma resposta do material a um estímulo externo. Quando uma força externa é aplicada, o mineral fica sob tensão, e pode se romper quando essa tensão é maior que sua capacidade de resistência.

- A clivagem é a tendência que os minerais têm de romperem em planos paralelos, devido a ligações químicas fracas. Com isso, um mineral com clivagem pode apresentar uma sequência de degraus paralelos a esses planos de fraqueza (Figura 2.8).

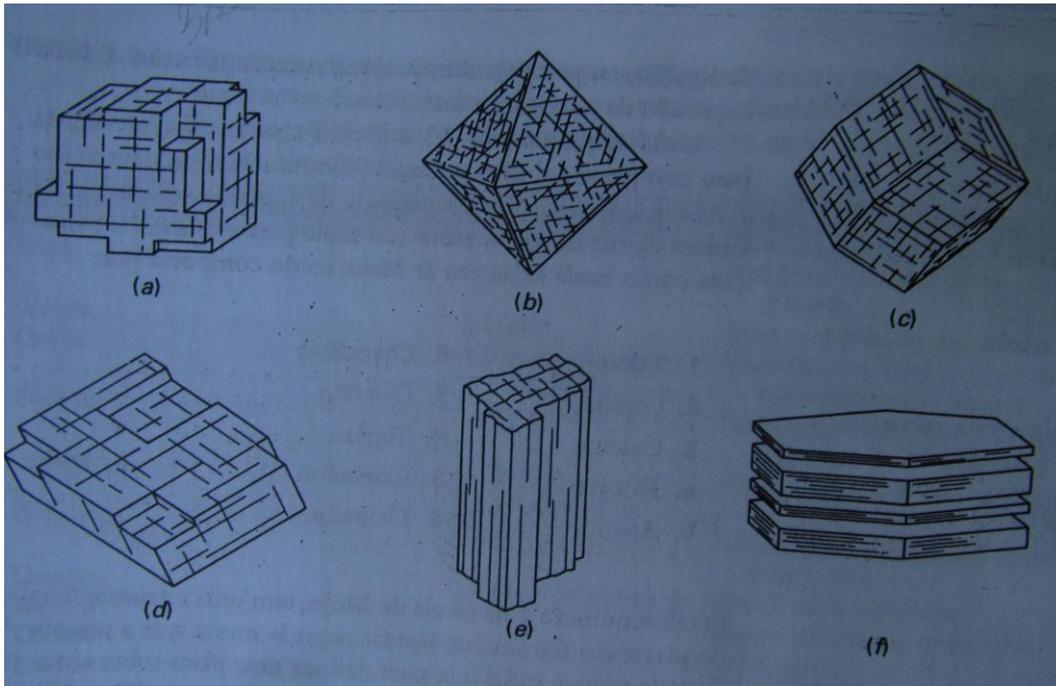


Figura 2.8 Clivagem em relação a formas cristalinas: (a) Cúbica (três direções). (b) Octaédrica (quatro direções). (c) Rombododecaédrica (seis direções). (d) Romboédrica (três direções). (e) Prismática (duas direções). (f) Pinacoidal basal (uma direção).

- Na partição os minerais também se rompem em planos específicos de fraqueza, a descontinuidade é formada apenas ao longo deste plano e não de forma sequencial. Mesmo que a fraqueza da estrutura interna seja paralela a certos planos, ela não é uniforme.
- A fratura ocorre quando o rompimento nos minerais não é, necessariamente, ao longo de planos de fraqueza.
- A dureza corresponde à resistência que a superfície de um mineral apresenta ao ser riscada com canivete. É classificada segundo uma escala qualitativa definida empiricamente.

O granulito félsico, ou charnockítico é formado basicamente por quartzo, K-feldspato, plagioclásio e ortopiroxênio. Subordinadamente, podme ser observadas biotitas, granadas e opacos. As descrições mineralógicas abaixo foram retiradas do Banco de Dados de Minerais Digital da UNESP.

Ortopiroxênio – hiperstênio

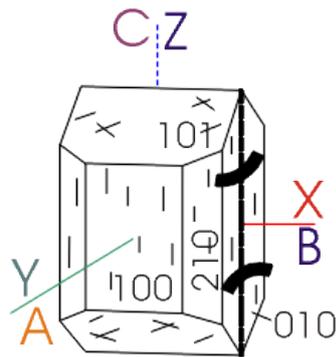


Figura 2.9 Forma cristalográfica do hiperstênio. Fonte: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/inossilicatos/piroxenios/bdhiperstenio.gif>

Fórmula Química - $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$

Hábito - Prismático, maciço, fibroso ou lamelar.

Clivagem - Boa em $\{110\}$

Dureza (Mohs) - 5,5

Densidade Relativa (g/cm^3) – 3,2 a 3,9

Descrição: O hiperstênio é um dos últimos minerais a se formar em rochas metamórficas, pois só se tornam estáveis em temperaturas superiores a 750°C .

Grupo dos Feldspatos - Feldspato Potássico

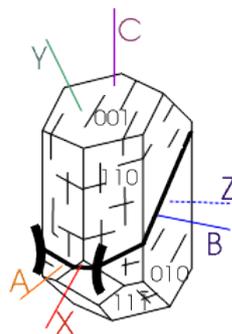


Figura 2.10 Forma cristalográfica da microclina. Fonte: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdmicroclina.gif>

O grupo do feldspato potássico apresenta um total de quatro minerais, são eles: sanidina, ortoclásio, adularia e microclina (Figura 2.10). A fórmula química básica dos minerais desse grupo é a KAlSi_3O_8 .

Hábito – Geralmente Prismático

Clivagem - Clivagens perfeitas $\{001\}$ e $\{010\}$

Dureza (Mohs) - 6 - 6,5

Densidade relativa (g/cm^3) – varia de 2,5 a 2,57

Grupo do Feldspato - Plagioclásios

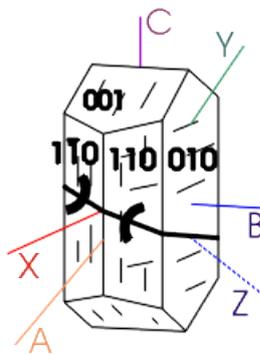


Figura 2.11 Forma cristalográfica da Albita. Fonte: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdalbita.gif>.

O grupo do plagioclásio apresenta um total de seis minerais, são eles: albita (Figura 2.11), oligoclásio, andesina, labradorita, bytownita e anortita. A fórmula química geral dos minerais é a $(\text{Ca}, \text{Na})\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{Si}_2\text{O}_8$, e a diferença entre eles está na proporção de Ca e Na que varia em solução sólida.

Hábito – O hábito desses minerais varia de prismático a tabular.

Clivagem – geralmente perfeita em $\{010\}$, boa em $\{010\}$ e $\{001\}$, e má em $\{110\}$.

Dureza (Mohs) – varia entre 5 e 6,5.

Densidade (g/cm^3) – varia entre 2,6 e 2,7

Quartzo

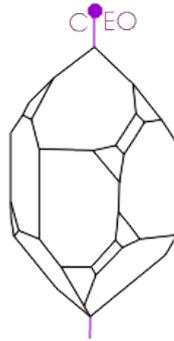


Figura 2.12 Forma cristalográfica do quartzo. Fonte:
<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdquartzo.gif>

Fórmula Química - SiO_2

Hábito - Granular, prismático, compacto etc.

Clivagem - Imperfeita segundo $\{1011\}$ ou $\{0111\}$

Dureza (Mohs) – 7

Densidade relativa (g/cm^3) - 2,65

Fratura - Conchoidal

Biotita (Figura 2.13)

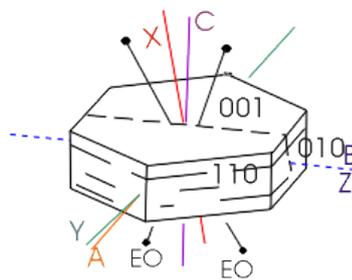


Figura 2.13 Forma cristalográfica da biotita. Fonte:
<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/filossilicatos/bdbiotita.gif>

Fórmula Química - $\text{K}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_{6-4}(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Ti})_{0-2}\text{Si}_{6-5}\text{Al}_{2-3}\text{O}_{20}(\text{OH}, \text{F})_4$

Hábito – Micáceo

Clivagem - Perfeita em {001}

Dureza (Mohs) - 2,5 a 3

Densidade relativa (g/cm³) - 2,7 a 3,5

3

Pedreira Itereré

3.1

Localização

Os agregados estudados são originados da Pedreira Itereré (Figura 3.1), localizada no Distrito de Morangaba, em Campos do Goytacazes, no norte do Estado do Rio de Janeiro. O principal caminho para a pedreira é encontrado a partir da rodovia RJ-158, que por sua vez dá acesso à RJ-190, por onde deve-se seguir por 500 metros, até a Serra da Boa Vista.



Figura 3.1 Localização da Pedreira Itereré. Fonte: Imagem de satélite do software Google Earth.

3.2

Funcionamento e Britagem

A Pedreira Itereré tem área de 4.031.910 km², está a uma altitude de 14 metros, e apresenta como método de lavra a mineração a céu aberto, na qual o desmonte é feito em bancadas de 12 metros.

O primeiro desmonte é realizado por meio de explosivos, em seguida é executada uma fragmentação secundária com o martelo demolidor (Figura 3.2). O material fragmentado pelo martelo demolidor, constituído por britas de diversos tamanhos, matacões e pó de pedra, é transportado por escavadeiras (Figura 3.3) até o pré-silo do alimentador primário.



Figura 3.2 Desmonte dos matacões pelo martelo demolidor.



Figura 3.3 Transporte dos matacões realizado pela retroescavadeira.

O processo de britagem e rebitagem da Pedreira Itereré conta com um britador primário, um britador secundário e dois britadores terciários. A realização desse processo se dá segundo os passos descritos a seguir, segundo o Plano de Aproveitamento Econômico Pedreira Itereré realizado pela Bebert Consultoria Geoambiental (2010):

Inicialmente, o material é lançado no pré-silo e desce, por gravidade, até o alimentador primário, onde uma grelha promove a separação entre o material mais fino (britas, pó de pedra e moledo) e os matacões. Os matacões levados ao alimentador apresentam dimensões máximas compatíveis com a largura da mesa do alimentador e tem a largura da boca do britador primário onde ocorre a britagem.

O material fragmentado é levado por uma correia até uma grelha vibratória, onde ocorre novamente a separação do material mais fino antes deste ser levado até os rebitadores. A fração fica retida na grelha vibratória é direcionada ao britador secundário, e o material fino passante pela grelha é levado a uma peneira de três decks, onde:

- O material retido no primeiro deck é levado também aos britadores secundários;
- O que fica aprisionado no segundo deck é conduzido a um segundo conjunto de peneiras, assim como parte do material fragmentado no britador secundário;
- E o passante é levado para a pilha de pó de pedra;

No segundo conjunto de peneiras, contendo também três decks:

- O material retido no primeiro deck vai para a pilha de brita 2;
- O que fica retido no deck intermediário vai para a pilha de brita 1;
- O material retido no deck inferior vai para a pilha de brita 0, ou pedrisco;
- E o passante vai para a pilha de pó de pedra.

A Pedreira Itereré produz britas com as granulometrias descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Granulometria dos agregados produzidos na Pedreira Itereré.

Agregado Mineral	Granulometria
Brita 0	4,8 a 9,5 mm
Brita 1	9,5 a 19 mm
Brita 2	19 a 25 mm
Brita 3	25 a 50 mm
Brita 4	50 a 76 mm
Brita 5 (sob encomenda)	76 a 100 mm
Rachão (pedra de mão)	76 a 250 mm
Bica Corrida	0 a 50 mm
Bica graduada	0 a 25 mm
Pó de pedra	0 a 5 mm

4

Programa Experimental

4.1

Materiais Utilizados

Para a realização do presente trabalho foram utilizados os agregados de rocha da Pedreira Itereré, localizada no município de Campos dos Goytacazes, Estado do Rio de Janeiro. Os agregados fornecidos pela pedreira estão classificadas como brita 0, brita 1, e pó de pedra.

O ligante asfáltico usado na pesquisa para os ensaios de adesividade, FTIR, fracionamento entre asfaltenos e maltenos, e adsorção, foi cedido pelo Laboratório de Geotecnia da Coppe/UFRJ.

4.2

Origem do Ligante

O ligante asfáltico empregado no presente trabalho, CAP 50/70 é originado da Petrobrás Distribuidora/FASFADUC, de Duque de Caxias, e foi coletado em Abril de 2017. O CAP apresenta as seguintes características: penetração de 56 mm, ponto de amolecimento de 48,7°C, PG de 64°-16°C, e viscosidade Brookfield (135°) de 445 Cp.

4.3 Caracterização dos agregados

4.3.1

Geologia Local

A geologia local foi realizada em um trabalho de campo na pedreira Itereré no dia 08 de março de 2017, onde realizou-se o reconhecimento geológico da área, descrição dos litotipos e das feições presentes na pedreira.

4.3.2

Separação Litológica

Os agregados da Pedreira Itereré apresentam dois litotipos, o granulito e o leucogranito. Para fins de avaliação, a rocha selecionada para o estudo foi o granulito, devido a maior abundância do material.

A proporção entre os litotipos foi obtida através da equação 01.

$$Pr = \frac{ma}{mt} \times 100 \quad (01)$$

Onde,

Pr = proporção em %;

ma = massa do agregado;

mt = Massa total.

4.3.3

Caracterização granulométrica

Para obter o tamanho dos agregados e sua graduação, parâmetros importantes para destinação adequada do material a suas aplicações, é necessário fazer a análise granulométrica do material. O ensaio foi realizado no

Laboratório de Construção e Fortificação do IME-RJ segundo a norma DNER-ME 083/98, cujo procedimento é descrito a seguir.

Primeiramente as amostras foram reduzidas no laboratório, por quarteamento, utilizando um separador mecânico (Figura 4.1). Posteriormente, o material foi seco em estufa a uma temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, para em seguida esfriar naturalmente. Posteriormente o material foi pesado para obtenção da sua massa total.



Figura 4.1 Separador mecânico do Laboratório de Fortificação e Construção do IME-RJ.

No próximo passo, o material foi inserido na parte superior de um conjunto composto por onze peneiras, são elas: com abertura de 19 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 2,0 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,425 mm, 0,3 mm, 0,15 mm, 0,075 mm. Em seguida inicia-se o peneiramento pela agitação mecânica deste conjunto (Figura 4.2). O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNER ME 035/95, que dispõe sobre as mesmas para a análise granulométrica de solos.



Figura 4.2 Peneiras dispostas na ordem do ensaio de granulometria no peneirador mecânico do Laboratório de Fortificação e Construção do IME-RJ.

O peneiramento foi realizado até que não passasse mais que 1% da massa total analisada em qualquer uma das peneiras, durante um minuto. Ao final do procedimento pesou-se o material retido em cada peneira.

A partir do ensaio de peneiramento obtém-se a porcentagem da amostra retida em cada peneira, a porcentagem retida acumulada para cada abertura e a indicação da graduação do material.

4.3.4

Descrição Macroscópica

A análise macroscópica da rocha consiste em uma avaliação preliminar, na qual é possível observar os minerais, a estrutura, textura, cor e, grau de alteração, e reunindo todas essas informações se torna possível classificar a rocha.

4.3.5

Análise Petrográfica

A análise petrográfica para materiais rochosos usados em rodovias, é normatizada pela DNER IE 006/94. A descrição da lâmina petrográfica segundo

a norma deve conter as seguintes características: granulometria, composição mineralógica, estrutura, textura, minerais secundários em termos percentuais, natureza química dos minerais e a classificação genética. Além dessas características, deve ser considerado o estágio de alteração dos minerais primários, microfissuras (preenchidas ou não), densidade das microfissuras, presença de vazios ou poros (com suas dimensões, densidade de ocorrência e identificação da natureza dos materiais), presença de sílica amorfa, vidro vulcânico, sulfetos e etc.

A análise petrográfica foi realizada no Laboratório de Petrografia da UERJ, com apoio do LEPEC (Laboratório de Estudos de Petrologia e Evolução Crustal), e do grupo de pesquisa JVPEC (Joel Valença – Petrologia e Evolução Crustal).

4.3.6

Análise Mineralógica em Difração de Raios-X

Para se obter a mineralogia e sua quantificação para o material estudado, foi realizada uma análise de difração de raios -X, no Laboratório de Análises Químicas e Mineralógicas do CETEM.

O procedimento de preparo da amostra para a difração de raios-X se deu segundo os seguintes passos: moagem em moinho McCrone em 15 mL de água, com meio moedor de ágata, por 10 minutos; secagem da amostra moída em suspensão na solução aquosa formada em estufa a 60°C (para preservação de todas as fases minerais) com auxílio de uma placa de Petri de teflon (Figura 4.3); após, retirada com uma espátula plástica e pincel, desagregada manualmente em um gral de ágata, e analisada no difratômetro de raios-X (equipamento Bruker-AXS D4 Endeavor), radiação Co K α (40 kV/40 mA).

As análises quantitativas foram realizadas pelo método de refinamento de espectro multifásico total (método de Rietveld), com software Bruker AXS Topas, v. 4.2.



Figura 4.3 Equipamento Bruker-AXS D4 Endeavor do Laboratório de Análises Químicas e Mineralógicas do CETEM.

4.3.7

Densidade do Agregado Graúdo e Miúdo, e Absorção

A densidade do agregado graúdo é normatizada pela DNER ME 081/98. O ensaio consistiu em lavar a amostra sobre a peneira 4,8 mm e secar até a massa constante, a uma temperatura entre 105° e 110°C. A amostra foi resfriada em temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Após esse processo, o agregado foi imerso em água, por um período de 24 ± 4 horas (Figura 4.4), e tomou-se o cuidado de agitar o material algumas vezes para expulsar bolhas de ar.

Os agregados foram retirados da água e espalhados sobre um pano absorvente, em seguida as partículas foram secas uma a uma. Com isso, pode-se determinar a massa da amostra na condição saturada superfície seca (M_h), com aproximação de 0,5 g.

Em uma segunda etapa, colocou-se o material em um recipiente para imergí-lo completamente em água (Figura 4.5). Acoplou-se uma haste do recipiente no prato da balança para obter a leitura (L).

Por fim, a amostra foi seca em estufa até a massa constante, em uma temperatura entre 105° e 110°C, e posteriormente foi resfriada em temperatura ambiente, durante 1h a 3 horas. A partir desse procedimento obteve-se a massa do agregado seco (M_s).

Os parâmetros obtidos a partir do ensaio de massa específica foram os seguintes (Bernucci, *et. al.* 2010):

Massa Específica Real (D_s)

A relação entre a massa seca e o volume real (equação 02), em g/cm³.

$$D_s = \frac{M_s}{M_s - L} \times 0,9971 \quad (02)$$

Massa Específica Aparente (D_{ap})

Foi determinada dividindo a massa seca pelo volume aparente do material (volume de agregado sólido mais o volume contendo água dos poros). Foi medido segundo a equação 03, em g/cm³.

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \times 0,9971 \quad (03)$$



Figura 4.4 Agregados submersos em água.



Figura 4.5 Recipiente para obtenção da massa submersa.

A massa específica do agregado miúdo foi determinada segundo a norma DNER ME 194/98, por meio do frasco de Chapman (Figura 4.6). O ensaio consistiu em colocar água no frasco até 200 cm³, deixou em repouso para que a água aderida pelas paredes internas do frasco escorresse totalmente. Em seguida introduziu-se 550g de agregado miúdo seco dentro do frasco, o qual foi

Os ensaios para se obter as massas específicas dos agregados graúdos e miúdos, e absorção foram realizados no Laboratório de Construção de Fortificação do IME-RJ, determinadas de acordo com a norma DNER – ME 081/98.

4.3.8

Forma das Partículas e Textura Superficial

A avaliação dos parâmetros de formato do agregado foram realizadas a partir do *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ (Figura 4.7). O AIMS usa uma configuração simples que consiste em uma câmera fotográfica e dois diferentes tipos de esquemas de iluminação para capturar imagens de agregados de diferentes resoluções. O sistema AIMS funciona baseado em dois módulos: o primeiro é para análise de agregados finos (passante na peneira 4,75 mm), e o segundo módulo é para a análise de agregados graúdos (maiores que 4,75 mm) (Masad, 2005).

Os agregados miúdos são analisados quanto à angularidade e forma usando imagens em preto e branco capturadas pela retroiluminação sob a bandeja da amostra onde estão dispostos os agregados. Essa iluminação gera um contraste nítido entre a bandeja e a partícula, resultando assim em um contorno distinto da última (Masad, 2005).

No caso dos agregados graúdos, a forma e a angularidade são analisadas a partir de imagens em preto e branco, e a textura usando imagens em cinza. A iluminação sob a bandeja é usada para capturar imagens em preto e branco, enquanto a iluminação superior captura imagens cinzas de superfícies de partículas (Masad, 2005).

A metodologia empregada para a utilização do AIMS é normalizada pela AASHTO TP 81-10, e foi realizada da seguinte forma: inicialmente quarteou-se e fracionou-se os agregado segundo a série de peneiras da Tabela 4.1. Em seguida, os agregados foram posicionados em cima bandeja, de modo que estivesse separados um do outro. Ao final, o equipamento foi fechado, e foi selecionado no software o tipo de análise e a fração ensaiada.

Após as digitalizações, a bandeja retorna a posição original, e os resultados foram gerados em planilhas MS Excel.

Tabela 4.1 Ordem das peneiras usadas para separar o material do AIMS.

Peneira	Abertura (mm)
1"	25,00
3/4"	19,00
1/2"	12,50
3/8"	9,50
#4	4,75
#8	2,36
#16	1,18
#30	0,60
#50	0,30
#100	0,15
#200	0,08



Figura 4.7 Equipamento AIMS do Laboratório de Geotecnia da Coppe/UFRJ.

Parâmetros do AIMS

O AIMS fornece até cinco propriedades diferentes, são elas a forma 2D, a lamelaridade, a esfericidade, angularidade, e textura.

A forma do agregado miúdo foi avaliada segundo o índice de forma, o qual quantifica a partícula em duas dimensões. Esse índice usa as mudanças incrementadas no raio da partícula (Equação 06). A escala do índice de forma varia de 0 a 20, sendo o círculo perfeito o valor mais próximo de 0.

$$\text{Índice de forma} = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \frac{R\theta + \Delta\theta - R\theta}{R\theta} \quad (06)$$

Onde,

Θ = ângulo direcional,

$\Delta\theta$ = diferença de incremento do ângulo, a qual é dada por 4° .

R = raio em diferentes direções.

A forma do agregado graúdo foi avaliada quanto à esfericidade, analisando-se três dimensões, no caso, a dimensão mais longa, a dimensão intermediária, e a dimensão mais curta (Masad, 2005). A esfericidade foi definida segundo a Equação 07.

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{ds \cdot d1}{d^2l}} \quad (07)$$

Onde,

ds= distância mais curta,

d1= distância intermediária,

d^2l = distância mais longa ao quadrado.

A angularidade foi medida pelo parâmetro gradiente de angularidade, o qual quantificou-se as mudanças nas bordas das partículas, e varia em uma escala de 0 a 1000. Um círculo perfeito tem um valor de angularidade próximo a zero. O cálculo feito pelo AIMS para obter este parâmetro está demonstrado na Equação 08:

$$\text{Gradiente de angularidade} = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} \theta_i - \theta_{i+3} \quad (08)$$

Onde,

Θ = ângulo de orientação dos pontos de borda;

n = número total de pontos;

l = ésimos ponto de borda da partícula.

A textura superficial das partículas foi definida de acordo com as variações nos níveis de pixels de uma imagem, através do método *wavelets*. O parâmetro em questão determina a rugosidade da superfície dos agregados, e foi aplicado apenas nos agregados graúdos. A escala desse parâmetro varia de 0 a 1000, onde um agregado totalmente polido apresenta um valor de textura próximo a 0.

A textura é determinada pela Equação 09.

$$\text{Índice de Textura} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2 \quad (09)$$

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 de *wavelets*,

(x,j)= localização dos coeficientes no domínio transformado.

Classificação da forma do agregado

Para classificar os agregados de acordo com os valores obtidos no AIMS, Al Rousan (2004), realizou um extenso estudo com agregados graúdos e miúdos. Os limites encontrados por ele estão na Figura 4.8. Essa classificação foi a utilizada para classificar os agregados no presente trabalho.

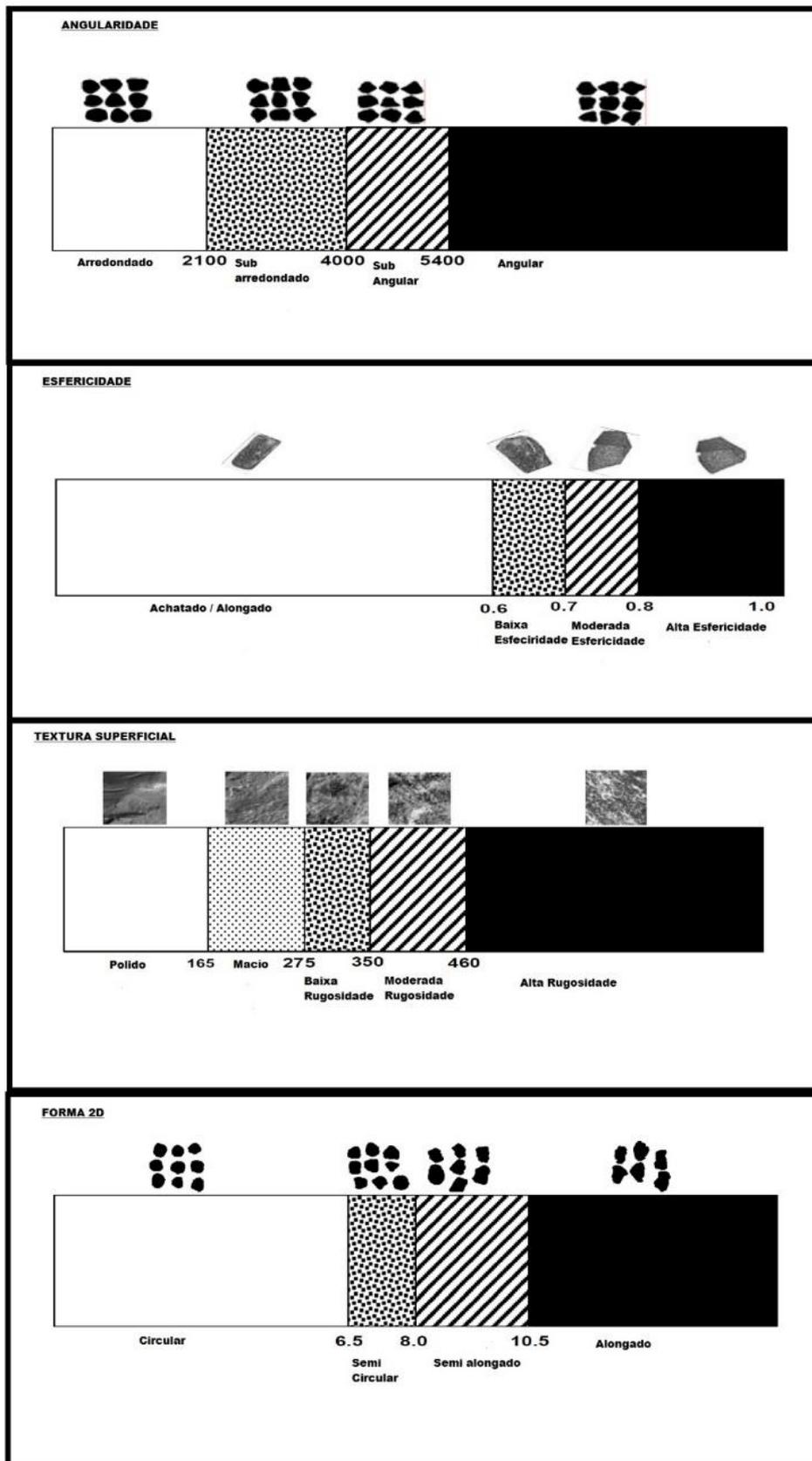


Figura 4.8 Classificação de forma e textura no equipamento AIMS. Fonte: Al Rousan (2004) adaptado.

4.3.9

Resistência à Abrasão Los Angeles

O método de Abrasão “Los Angeles” é descrito como o desgaste sofrido pelo agregado quando colocado na máquina “Los Angeles” (Figura 4.9) juntamente com uma carga abrasiva, a um determinado número de revoluções a uma velocidade de 30 r.p.m. a 33 r.p.m. O desgaste é determinado pela porcentagem do material passante, em peso, na peneira com abertura de 1,7 mm (DNER-ME 035/98).

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado no Laboratório de Construção e Fortificação do IME-RJ.



Figura 4.9 Equipamento de Abrasão Los Angeles do Laboratório de Fortificação e construção do IME-RJ.

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado da seguinte forma: inicialmente foi escolhida a graduação da amostra de acordo com sua finalidade. O material foi lavado e seco em estufa entre 105° e 110°C, até haver uma constância de peso. Em seguida, foi pesado, e foram quarteados em diferentes porções retiradas das peneiras, para obtenção graduação desejada (Tabela 4.2). Determinou-se a massa das porções de graduação escolhida, reuniu-se as diversas porções da mesma graduação e somou-se as massas parciais para obter a massa da amostra seca (m_n). A massa total foi colocada no tambor juntamente com esferas de aço (ou de ferro fundido) com aproximadamente 47,6 mm de diâmetro, cada uma

pesando entre 390 a 445g. O tambor foi submetido a giros com velocidade de 30 r.p.m. a 33 r.p.m. até completar 500 rotações. Ao final das rotações, passou-se o material na peneira de abertura 1,7 mm, rejeitando-se o material passante. O material retido na peneira 1,7 mm foi lavado e seco em estufa 3 horas. Determinou-se a massa da amostra lavada e seca (m'_n) (Figura 4.10).



Figura 4.10 Agregados após o ensaio de abrasão Los Angeles.

A abrasão “Los Angeles” foi calculada segunda a seguinte equação 10:

$$A_n = \frac{mn - m'n}{mn} \times 100 \quad (10)$$

Onde,

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

n = graduação escolhida para o ensaio;

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

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

Segundo a norma DNIT 031/2006 ES, o valor de abrasão Los Angeles deve ser inferior ou igual a 50%.

Tabela 4.2 Graduação dos agregados para o ensaio de abrasão Los Angeles.

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

4.3.10

Perda ao Choque no Aparelho Treton

Outro método utilizado para obter a habilidade do agregado de resistir ao desgaste mecânico é a determinação da perda ao choque no aparelho Treton. O mesmo foi aplicado no Laboratório de Fortificação e Construção do IME-RJ.

O ensaio é descrito pela norma DNER-ME 399/99, e foi realizado da seguinte forma: as amostras destinadas ao ensaio foram as passantes pela peneira com abertura de 19 mm e que ficaram retidas na peneira com abertura de 16 mm. Foram escolhidas as partículas com forma cúbica, angulares, mais ou menos do mesmo tamanho. Os agregados foram colocados no cilindro oco em contato com a face superior do cilindro maciço (Figura 4.11). Deixou-se cair o martelo dez vezes sobre o material, da altura de 39,37 cm. Removeu-se o material do

cilindro, peneirou-se o mesmo com a peneira de malha 1,7 mm. Em seguida, pesou-se o material retido nessa peneira (Figura 4.12).

A perda ao choque da amostra ensaiada foi obtida por meio da equação (11):

$$T = \frac{Mr}{Ml} \times 100 \quad (11)$$

Onde,

T = perda ao choque (Treton), expresso em porcentagem;

Mr = massa do material retido na peneira 1,7 mm em gramas;

Ml = massa original da amostra, em gramas.

A perda ao choque do material ensaiado foi a média aritmética dos resultados de no mínimo 3 ensaios.



Figura 4.11 Agregados no aparelho treton antes do ensaio.



Figura 4.12 Agregados após o ensaio de perda ao choque no treton.

4.3.11

Adesividade ao Ligante Asfáltico

A propriedade que o agregado tem de ser aderido ao material betuminoso consiste na adesividade ao ligante asfáltico (Figura 4.13). Essa propriedade é obtida pela ausência de deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura deste material com ligante é submetida a ação da água destilada, a 40°C, por 72 horas (DNER-ME 078/94).

O ensaio de adesividade foi realizado da seguinte maneira: o agregado e o ligante asfáltico foram aquecidos a 120°C e 100°C respectivamente. O agregado foi recoberto por ligante asfáltico com auxílio de uma espátula. Posicionou-se o agregado recoberto por ligante em uma superfície lisa, para que resfrie. Por último, colocou-se o material em um frasco de vidro, totalmente recoberto por água destilada (Figura 4.14), e manteve em estufa a 40°C, durante 72 horas.

Ao final do ensaio, se não houver nenhum deslocamento do ligante betuminoso, o resultado é definido como é satisfatório.

O ensaio de adesividade foi realizado no Laboratório de Geotecnia Coppe/UFRJ.



Figura 4.13 Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico.



Figura 4.14 Material recoberto por água destilada.

4.4

Caracterização do Ligante Asfáltico

4.4.1

Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A composição química do ligante asfáltico foi determinada por meio de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier ou FTIR, no Laboratório de Gemologia do CETEM.

O equipamento usado na análise foi o PerkinElmer Spectrum 400 FT-IR/FT-NIR *spectrometer*, do Laboratório de Gemologia do CETEM (Figura 4.15). Na análise, obteve-se um espectro de 4000 a 400 cm^{-1} , usando pastilhas de KBr.



Figura 4.15 Equipamento PerkinElmer Spectrum 400 FT-IR/FT-NIR *spectrometer*.

4.4.2

Separação das frações Asfálticas e Maltênicas

O procedimento utilizado no presente trabalho para separar as frações maltênicas e asfálticas é semelhante ao descrito na norma IP-143, padronizada pelo *Institute of Petroleum* (Figura 4.16).

Utilizou-se para a realização do ensaio um condensador, um tubo *soxhlet*, um balão, e uma manta aquecedora (Figura 4.17). Inicialmente, colocou-se 3 g do CAP no papel de filtro. O CAP foi inserido dentro de um tubo *soxhlet*. O balão foi preenchido por heptano, e posteriormente esse conjunto foi aquecido. O aquecimento do balão causou a evaporação do heptano que ao entrar em contato com a água fria do condensador, condensou sobre o papel de filtro com o CAP. O papel de filtro foi submetido a sucessivas lavagens com heptano, até que todo malteno seja dissolvido do ligante (Figura 4.18). O procedimento termina quando o solvente torna-se incolor (Figura 4.19), ou seja, quando só houver asfalto no filtro.

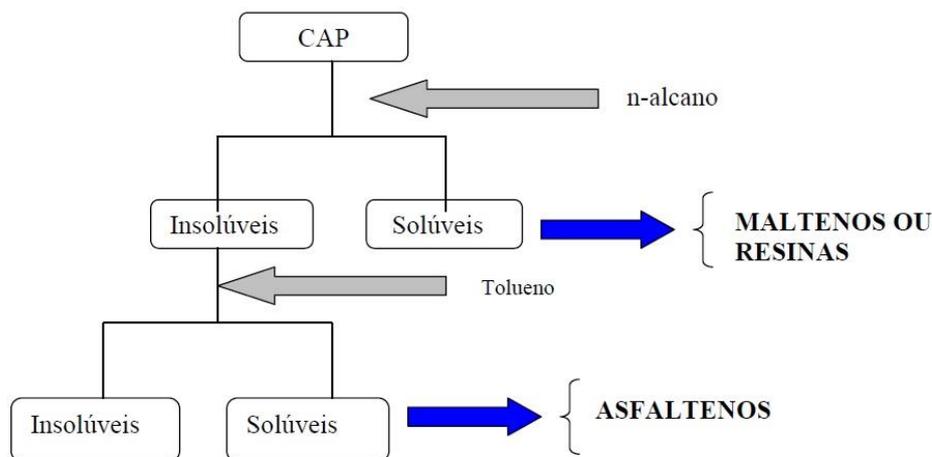


Figura 4.16 Método de fracionamento de ligantes asfálticos. Fonte: Ribeiro (2006).



Figura 4.17 Material utilizado no procedimento.



Figura 4.18 Maltene dissolvido no heptano dentro do soxhlet.



Figura 4.19 Maltene todo dissolvido no balão e o solvente incolor dentro do soxhlet, no final do procedimento.

4.5

Interação CAP / Brita

4.5.1

Ensaio de Adsorção

No ensaio de adsorção físico-química utilizou-se a metodologia descrita em Ribeiro (2006), desenvolvida pelo grupo de pesquisadores da Coordenação de Apoio Tecnológico a Pequena e Média Empresa (CATE) e do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

Inicialmente, foram elaboradas as soluções na proporção de 1,0% em peso de CAP e, separadamente, de malteno, para 1,0% de volume de heptano, que resultou em uma concentração inicial de 0,01 g/mL que representa a solução com 100%. Dessa concentração retiraram-se alíquotas para a formação de novas soluções com concentrações de 2%, 3% e 4%. Essas soluções foram analisadas no espectrofotômetro de Ultravioleta visível, marca Hack DR 500, em comprimento de onda fixo em 402 nm, para se obter os valores iniciais de absorvância do material.

Em seguida, adicionou-se 0,3 g de agregado mineral em granulometria abaixo de 0,149 mm nas soluções com CAP e com malteno. As misturas ficaram em agitação por 3 horas a 200 r.p.m. em uma mesa agitadora Ika Labortechnik, modelo HS501 digital. Posteriormente o material ficou em repouso por 72 horas, para que houvesse a máxima adsorção, e foi medida novamente a absorvância do material.

Através da diferença entre os valores de absorvância das soluções antes da adição de agregado e os valores após a adição de agregados, pode-se obter a porcentagem de material asfáltico que foi adsorvido pelo agregado mineral.

5

Resultados e Discussões

5.1

Avaliação dos Agregados

5.1.1

Geologia Local

O corpo plutônico onde está localizada a Pedreira Itereré é formado predominantemente por charnockitos de coloração esverdeada e leucogranitos (Figura 5.1). Nas bordas da pedreira é possível observar o paragnaisse da rocha encaixante (Figura 5.2 e Figura 5.3).

A rocha encaixante do conjunto intrusivo é um paragnaisse porfírico com granulometria grossa, composto por pórfiros de K-feldspato de até 1,5 cm com geminação Carls Bars, plagioclásio, quartzo, e biotita. A foliação é marcada pela orientação preferencial dos planos de biotita. A rocha encontra-se predominantemente alterada, e não é comercializada.



Figura 5.1 Charnockito com bolsões de leucogranito.



Figura 5.2 Paragnaisse encaixante do corpo intrusivo da Pedreira Itereré.

Figura 5.3 Biotita gnaiss porfírico, rocha encaixante do corpo intrusivo da Pedreira Itereré.

O charnockito porfírico da pedra apresenta granulometria grossa, contendo minerais com até 2 cm. A rocha é composta por feldspato esverdeado com até 2,5 cm (pórfiros), quartzo cinza com aproximadamente 1 cm, ortopiroxênio, biotita, e granada (Figura 5.4). O ortopiroxênio e a cor esverdeada sugerem que a rocha sofreu metamorfismo em fácies granulito, em temperaturas acima de 750°C. A presença de granada indica que a rocha estava sob pressão acima de 4kbar.



Figura 5.4 Granulito charnockítico esverdeado da Pedreira Itereré.

O leucogranito apresenta granulometria média, com a seguinte composição mineralógica: quartzo, feldspato, biotita e granada. Essa rocha, por vezes, apresenta foliação marcada pela orientação preferencial da biotita (Figura 5.5).



Figura 5.5 Leucogranito da Pedreira Itereré.

No campo é comum encontrar o leucogranito em “bolsões” de escala métrica dentro do charnokito. No contato entre o charnokito e o leucogranito pode-se observar um gnaiss granítico, com granulação grossa e composto por feldspato, quartzo, biotita e anfibólio. Observa-se também veios de pegmatito e de hololeucogranito de granulometria fina por toda pedreira.

5. 1.2

Separação Litológica

Os agregados da Pedreira Itereré são constituídos por dois tipos de rocha, um granulito e um leucogranito. Em termos de proporção, o granulito representa 82% da amostra de agregados, enquanto o leucogranito representa 18% (Figura 5.6). Para fins de estudo e caracterização, foi utilizado apenas o granulito no presente trabalho.



Figura 5.6 Proporção entre o granulito (a esquerda), e leucogranito (a direita).

5.1.3

Caracterização Granulométrica

A caracterização granulométrica realizada teve como resultado a curva granulométrica exposta na Figura 5.7, e na Tabela 5.1.

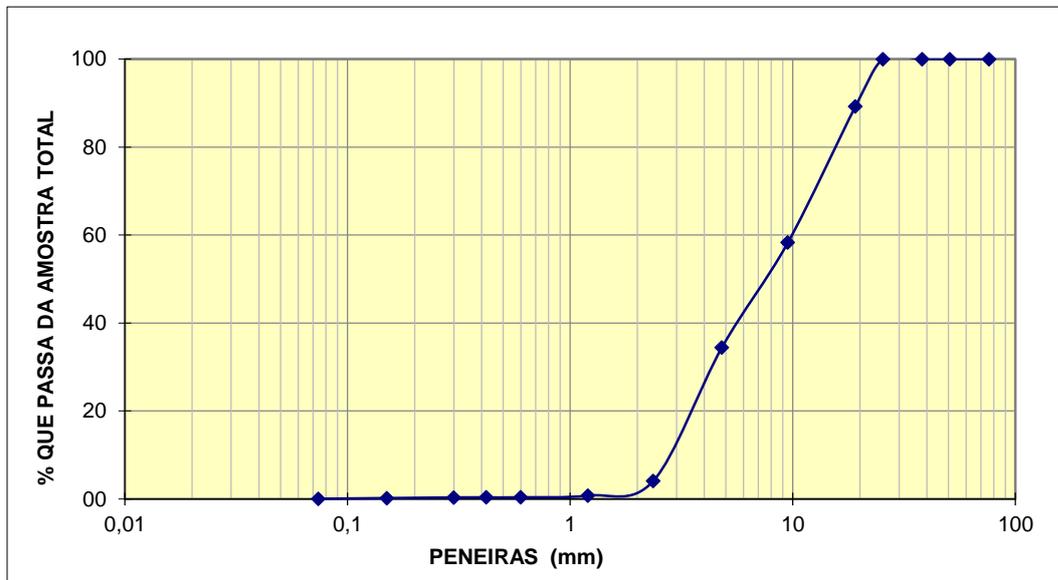


Figura 5.7 Curva granulométrica.

Tabela 5.1 Porcentagem de material passante nas respectivas peneiras.

Peneiras (Mesh)	Peneiras (mm)	Material Passante (%)
1 pol	25,4	100
3/4 pol	19,1	89,21
3/8 pol	9,5	58,29
Nº 4	4,8	34,43
Nº 8	2,36	4,09
Nº 10	2	3,50
Nº 16	1,18	0,78
Nº 30	0,6	0,38
Nº 40	0,42	0,37
Nº 50	0,3	0,36
Nº 100	0,15	0,20
Nº 200	0,075	0,05

De acordo com o resultado, o tamanho máximo do agregado é de 3/4", ou 19,1 mm, e a graduação segundo a classificação apresentada por Bernucci *et al.* (2010) é considerada aberta. Como foi visto em Bernucci *et al.* (2010) e Brown e Basset (1989), conforme é aumentado o tamanho máximo do agregado, maior se torna a resistência mecânica da mistura asfáltica. Contudo, o quesito mais importante para o comportamento adequado do pavimento, é sua graduação.

Como foi visto na literatura, graduações de agregados com predominância de agregado graúdos resultam em misturas asfálticas com maiores tendências a sofrer deformações permanentes (Golalipour, 2012 ; Afaf, 2014). Porém, elas podem apresentar bons resultados quanto à rigidez, estabilidade, desempenho contra fluxo Afaf (2014), e boa resistência caso haja contato entre os agregados graúdos (Ahlrich, 1996).

Agregados com graduação aberta são usados na construção de revestimentos tipo CPA, que consiste em camadas porosas de atrito ou revestimento asfáltico drenante. Segundo a norma DNER – ES 386/99, a graduação granulométrica obtida no presente trabalho se enquadra na faixa granulométrica II para dosagem de revestimentos tipo CPA.

Esse tipo de revestimento apresenta grande porcentagem de vazios com ar e são capazes de promover uma rápida percolação da água da chuva. Essa propriedade é uma resposta da sua elevada permeabilidade, que reduz a lâmina d'água na superfície de rolamento e, como consequência, reduz também o tempo de frenagem, e o spray originado do borrfio de água pelos pneus dos veículos, entre outras características (Bernucci *et al.* 2010).

5.1.4

Descrição Macroscópica

Macroscopicamente a rocha apresenta granulometria grossa e estrutura maciça, contendo minerais com até 2 cm (Figura 5.8). Sua mineralogia é composta por: feldspatos esverdeados com até 2,5 cm (pórfiros), grãos de quartzo cinzas com aproximadamente 1 cm, ortopiroxênio, biotita, e granada. O ortopiroxênio e a cor esverdeada demonstram que a rocha sofreu metamorfismo em fácies granulito.



Figura 5.8 Visão macroscópica do granulito.

5.1.5

Análise Petrográfica

A lâmina petrográfica analisada apresenta minerais predominantemente félsicos, e os minerais máficos estão distribuídos aleatoriamente (sem orientação preferencial) (Figura 5.9). A rocha apresenta textura granoblástica, inequigranular com fenocristais de plagioclásio. O plagioclásio têm até 6 mm de comprimento, e por vezes apresenta microfissuras preenchidas por material aparentemente carbonático. O ortopiroxênio apresenta comprimento de até 3 mm se apresenta frequentemente muito fraturado, com alterações nas microfraturas. Por vezes é possível observar o ortopiroxênio bordejado por biotita, o que indica um retrometamorfismo. O K-feldspato é observado em cristais de aproximadamente 3 mm, principalmente na borda da lâmina. A biotita apresenta cristais com até 3mm de comprimento. O quartzo apresenta hábito anaedral, por vezes deformado, principalmente no contato com os grãos de plagioclásio, onde há formação de subgrãos. Em todos os minerais são observadas microfraturas com planos irregulares (Figura 5.10). A presença do ortopiroxênio na rocha indica que ela foi formada em condições de metamorfismo da alto grau, em fácies granulito, a uma temperatura igual ou acima de 750°C, em condição anidra.

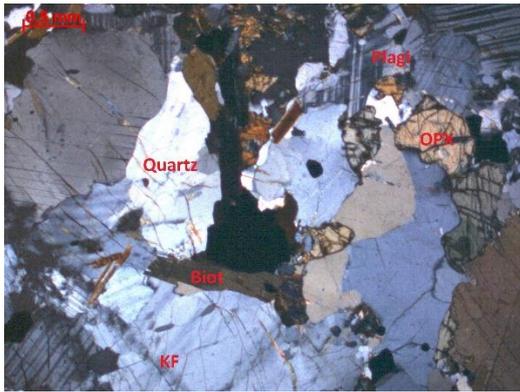


Figura 5.9 Lâmina de granulito a um aumento de 2,5x. OPX = ortopiroxênio, Plagi = plagioclásio, Biot = biotita, KF = K-feldspato, Quartz = quartzo.



Figura 5.10 Lâmina do granulito na luz natural com aumento de 2,5x.

A rocha, de uma maneira geral, apresenta minerais predominantemente félsicos e de alta dureza, logo são mais resistentes às alterações químicas provocadas pelo intemperismo e a pressões externas. A estrutura maciça observada macroscopicamente revela uma rocha sem foliação, ou seja, sem planos de fraqueza bem definidos, o que confere em mais uma característica positiva em relação a resistência da rocha. Contudo, é possível observar, através da descrição petrográfica, a exemplo da Figura 5.10, que os minerais apresentam microfraturas que representam regiões de baixa resistência, e que o retrometamorfismo sofrido pela rocha também diminui sua resistência, evidenciado pela alteração do hiperstênio, mineral maciço, prismático com dureza 5,5, para a biotita, mineral com hábito micáceo e dureza entre 2,5 e 3, ou seja, bem menos resistente.

5.1.6

Análise Mineralógica na Difração de Raio X

O difratograma resultante das análise qualitativa da difração de raios-X (Figura 5.11) demonstram a presença de minerais félsicos (quartzo, K-feldspato e plagioclásio) em 87,6% da rocha total, seguidos do hiperstênio e da biotita respectivamente (Tabela 5.2). A rocha é classificada como um charno-enderbito, segundo o diagrama de Winkler (1977) (Figura 5.12).

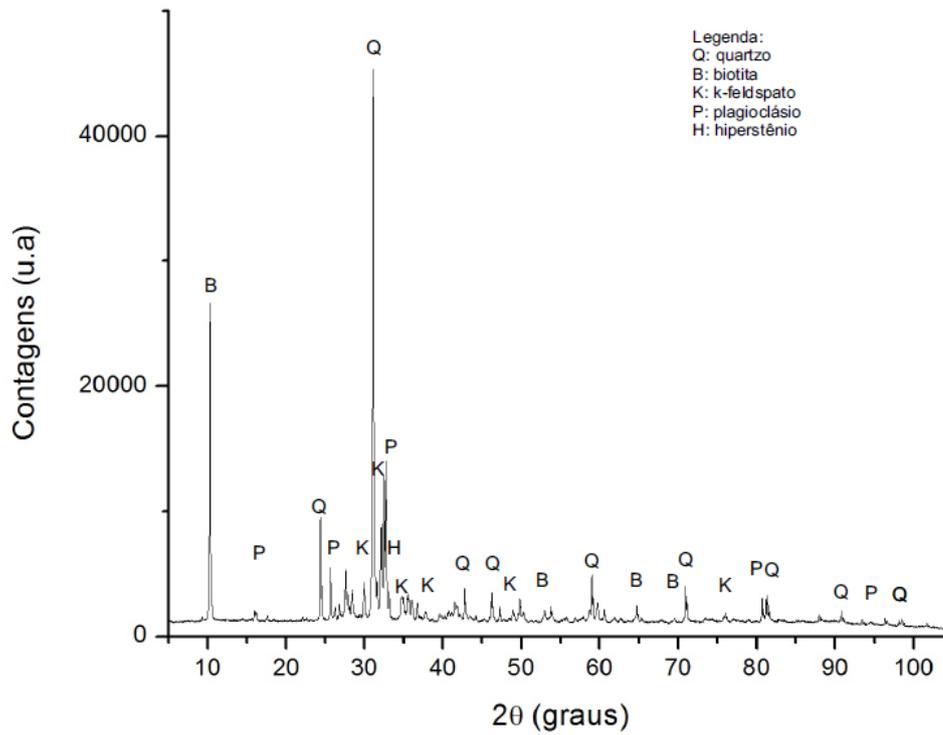


Figura 5.11 Difratoograma obtido na análise quantitativa do agregado.

Tabela 5.2 Porcentagem de minerais na difração de raios-X.

Minerais	Porcentagem (%)
Quartzo	24,5
Biotita	4,8
K-feldspato	26,3
Hiperstênio	7,6
Plagioclásio	36,8

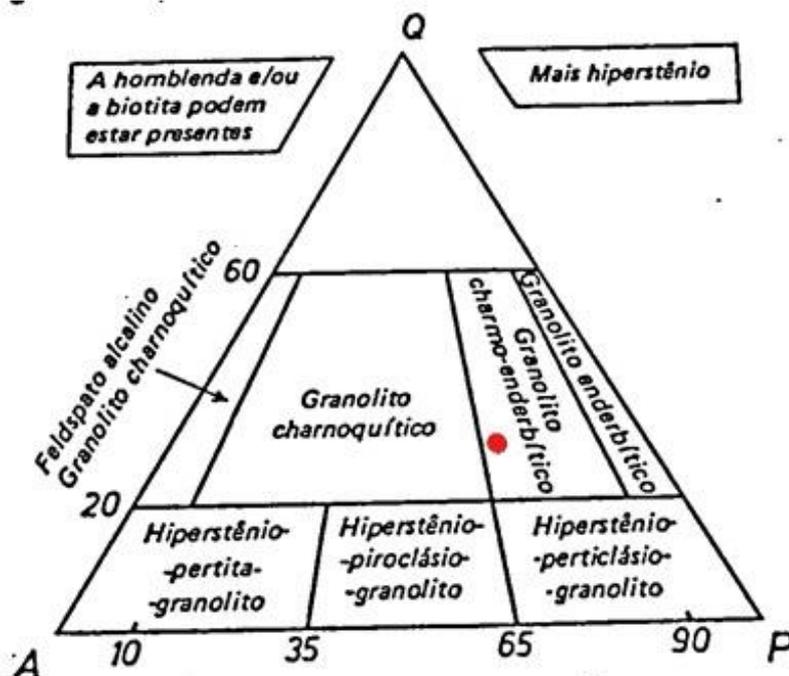


Figura 5.12 Classificação do granulito. Adaptado de Winkler (1977).

5.1.7

Densidade do Agregado Graúdo e Miúdo, e Absorção

Os ensaios de massa específica e percentual de absorção do agregado graúdo foram realizados duas vezes, e o resultado foi a média entre os valores conforme mostra a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Massas específicas, absorção e porosidade do granulito.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
Massa Específica Real (kg/cm ³)	2,72	2,72	2,72
Massa Específica Aparente (kg/cm ³)	2,65	2,65	2,65
Absorção	1%	1%	1%

O ensaio para obtenção da massa específica do agregado miúdo realizado três vezes, e o resultado foi a média entre os valores (Tabela 5.4).

Em relação a massa específica, verifica-se que ela está diretamente relacionada à sua composição mineralógica do agregado, pois 88% da rocha é composta de feldspatos que têm densidades variando entre 2,5 e 2,7, valor muito próximo ao ensaiado. Desta forma, pode-se indicar que a massa específica real provavelmente está um pouco acima da média dos feldspatos devido a presença de minerais ferromagnesianos (biotita e ortopiroxênio).

Por ser uma rocha cristalina, maciça e metamórfica de alto grau, é de se esperar que a porosidade da rocha seja baixa. Por isso, sua absorção foi de apenas 1%.

Para fins de pavimentação, o agregado em questão estaria apto a ser utilizado em revestimentos CPA, pois está dentro da condição especificada de ter a absorção abaixo de 2%.

Tabela 5.4 Massa específica do agregado miúdo.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
Massa Específica (g/cm ³)	2,63	2,63	2,62	2,63

5.1.8

Forma das Partículas e Textura Superficial

Os resultados mostram que os agregados graúdos possuem a maior porcentagem das partículas com altos valores do índice de esfericidade (Figura 5.13). Na classificação de Al Rousan (2004), os agregados graúdos retidos na peneira #3/8" (9,5 mm) variam de semialongados a uma baixa esfericidade, e os demais agregados graúdos são classificados com baixa a moderada esfericidade.

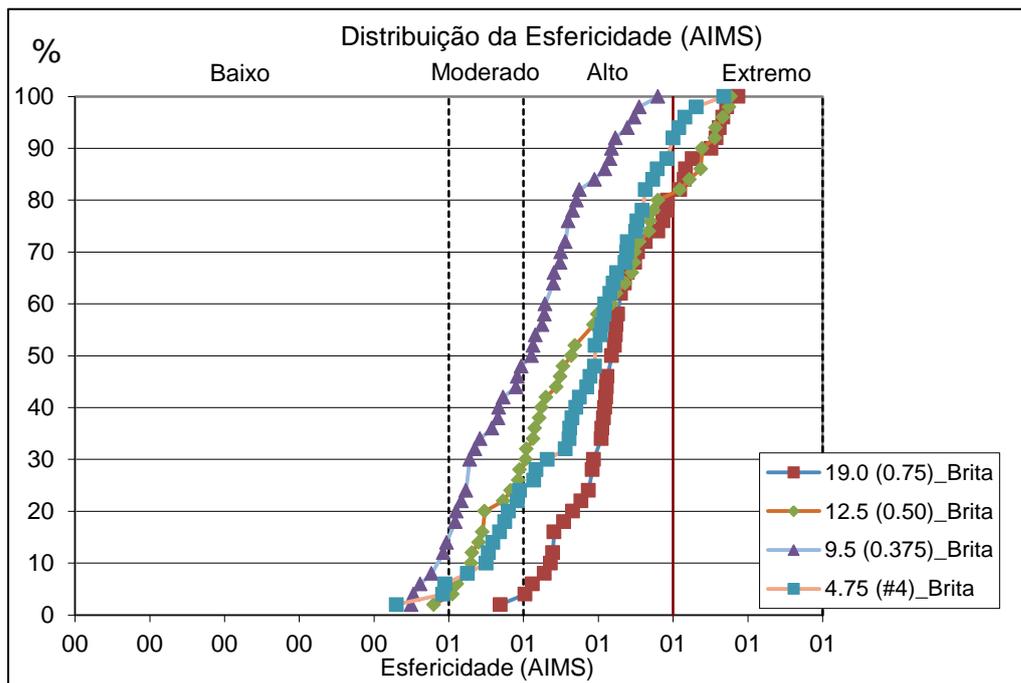


Figura 5.13 Esfericidade dos agregados graúdos no AIMS.

Quanto aos agregados miúdos, o índice de forma da maioria das partículas apresenta valores de moderados a altos (Figura 5.14). Segundo a metodologia de Al Rousan (2004), esses agregados são classificados como semicirculares a semialongados.

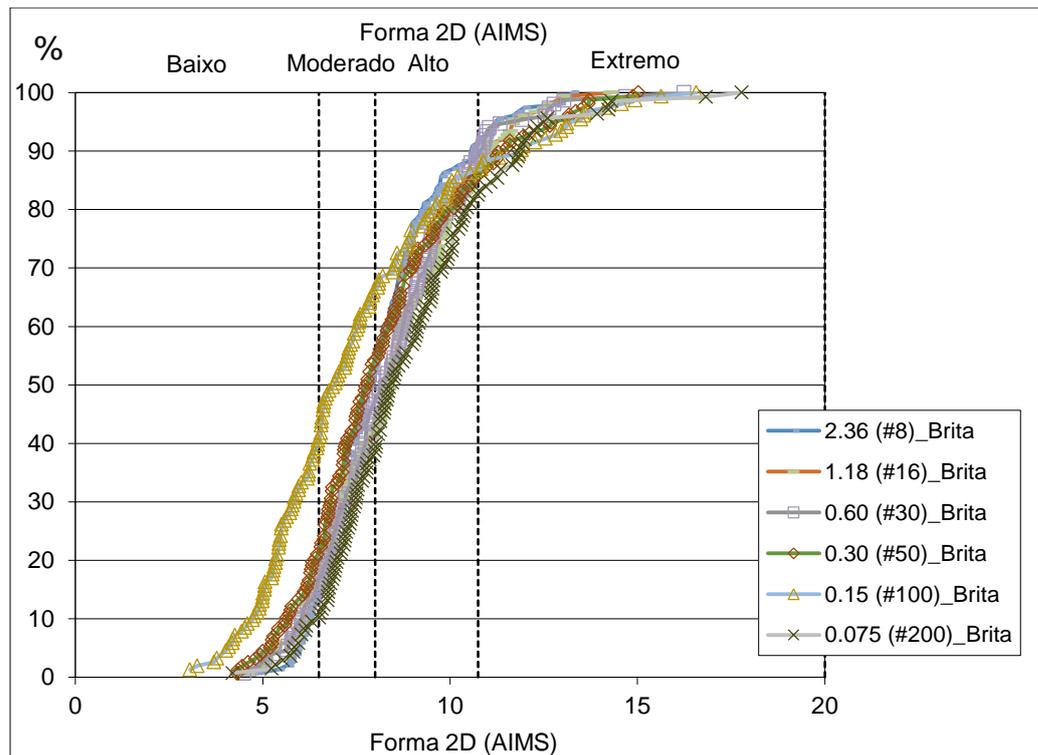


Figura 5.14 Forma 2D do agregado miúdo no AIMS.

De acordo com os resultados obtidos, os agregados graúdos têm índice de angularidade moderado, enquanto os agregados miúdos apresentam índice de angularidade alto (Figura 5.15).

Utilizando a classificação de Al Rousan (2004), os agregados graúdos podem ser classificados como subarredondados e os agregados miúdos como subangulares.

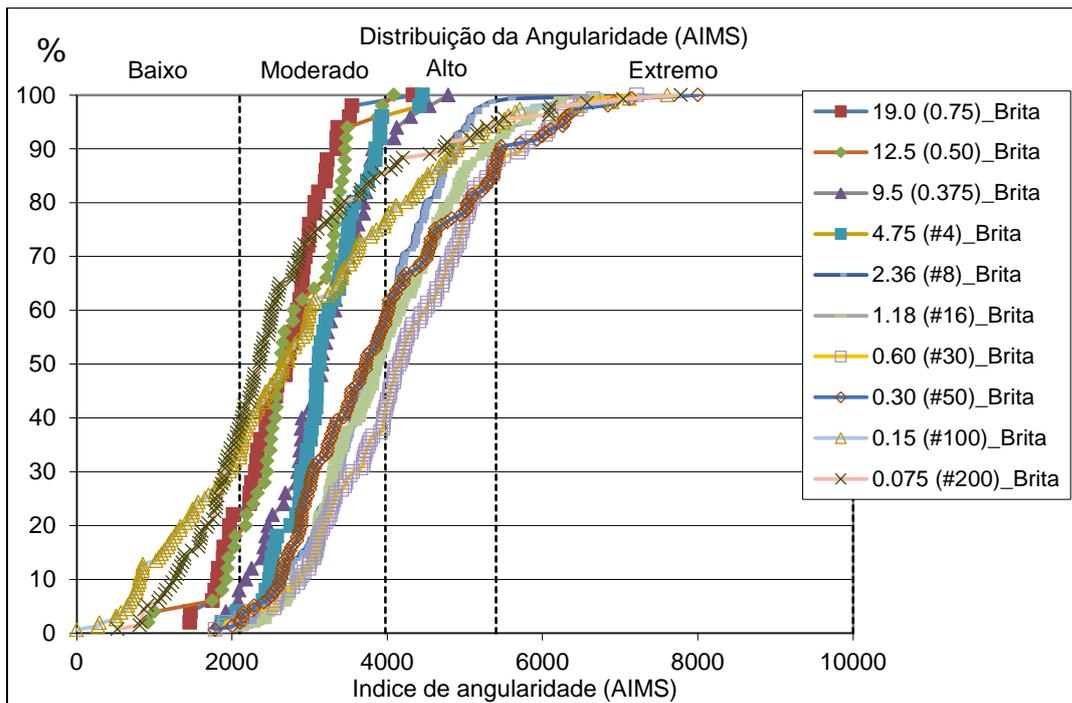


Figura 5.15 Angularidade dos agregados graúdos e miúdos no AIMS.

No parâmetro de textura superficial, os agregados graúdos apresentaram altos valores. De acordo com Al Rousan (2004), são classificados como muito rugosos (Figura 5.16).

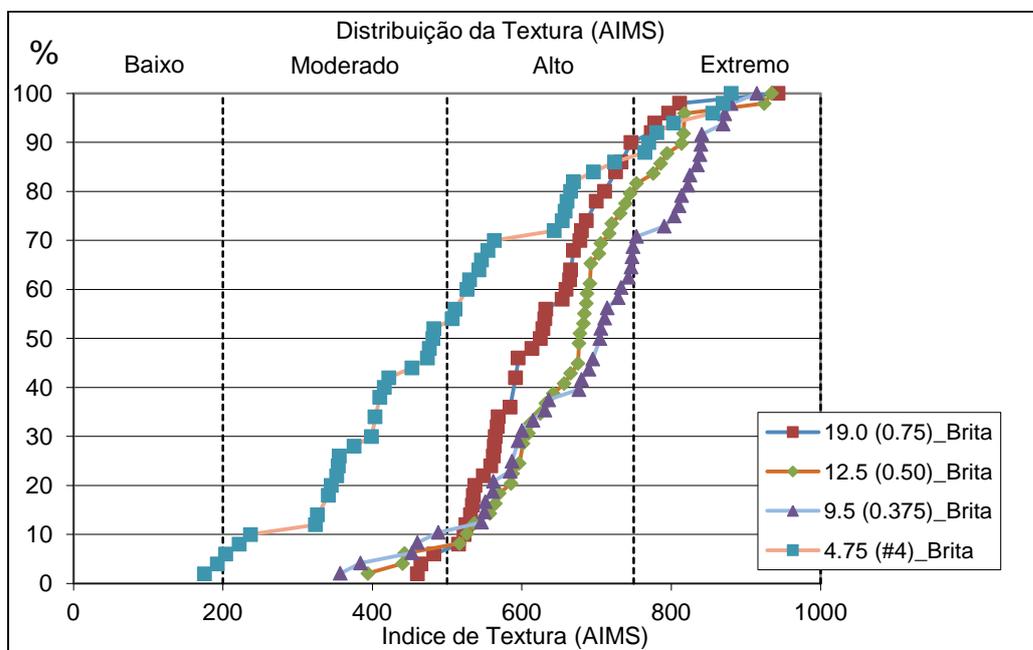


Figura 5.16 Textura superficial dos agregados graúdos no AIMS.

Em síntese, os agregados apresentam os seguintes parâmetros de forma (Tabela 5.5):

Tabela 5.5 Parâmetros de forma e textura superficial obtidos no AIMS.

	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Esfericidade (3D)	Baixa a Moderada esfericidade	x
Forma 2D	x	Semicircular a semialongado
Angularidade	Subarredondado	Subangular
Textura Superficial	Muito Rugoso	x

Bessa *et. al.* (2013) concluiu que possivelmente a mineralogia não teria tanta influência nos parâmetros de forma e angularidade, mas poderia ser importante para a textura superficial. Este trabalho se propõe a discutir a importância da mineralogia na esfericidade, forma 2D, e na rugosidade do agregado.

A esfericidade do agregado graúdo foi classificada como baixa a moderada, o que pode ser justificado pelo fato da rocha ser granoblástica e composta por minerais com aproximadamente o mesmo tamanho. Logo, durante a britagem, o agregado produzido não apresenta alongamento diferencial, exceto em faces nas quais estejam presentes os pórfiros de plagioclásio. Já o agregado miúdo tende a ser mais alongado, pois durante a britagem os grãos pequenos podem expor faces dos minerais, e a maioria dos minerais que compõem a rocha possuem hábito prismático (alongado). Em Bessa *et al.* (2015), não foi informada a dimensão dos grãos em relação aos outros para comparar suas dimensões com a esfericidade, mas pode-se observar que as rochas estudadas também apresentam composição mineralógica com muitos minerais prismáticos, o que pode ter influenciado na forma 2D semialongada.

A textura superficial do agregado pode estar ligada ao fato de 63% da rocha ser composta por feldspatos. Os feldspatos, tanto os potássicos quanto os plagioclásios, apresentam duas direções de clivagem bem definidas. A quebra da estrutura mineral ao longo desses planos produz pequenas irregularidades na face do mineral, as quais podem causar a alta rugosidade. Em Bessa *et al.* (2015) não há informações sobre o percentual dos minerais, mas sabe-se que o fonolito, que também apresenta alta rugosidade, é formado majoritariamente por feldspatos (potássico e plagioclásios), e feldspatóides, logo, é possível que

também tenham uma grande quantidade de minerais com dois ou mais planos de clivagem. Já o granito e o gnaisse além dos feldspatos apresentam também micas (apenas um plano de clivagem), e o quartzo (em proporção não informada) que apresenta clivagens imperfeitas.

Para fins de pavimentação, a esfericidade baixa a moderada do agregado graúdo contribui positivamente para o desempenho do pavimento, pois agregados alongados podem quebrar durante a compactação, alterando a graduação original como visto em Bessa (2012). Como a angularidade é moderada, ela pode contribuir positivamente no atrito pneu-pavimento, e não ser um problema na hora da compactação. A alta rugosidade também contribui para um grande atrito pneu-pavimento.

Quanto à aplicação em revestimentos tipo camada porosa de atrito, pode-se considerar o formato obtido regular. O formato especificado para uso nesse tipo de revestimento é aproximadamente cúbico (não alongados), e boa parte dos agregados apresentam baixa a moderada esfericidade.

5.1.9

Resistência a Abrasão Los Angeles

O ensaios de Abrasão Los Angeles foram realizados três ensaios, na graduação B, e o valor de abrasão Los Angeles é a média entre eles (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 Resultado da resistência a abrasão Los Angeles.

Ensaio	Abrasão Los Angeles (%)
Ensaio 1	30,4
Ensaio 2	29,6
Ensaio 3	30,4
Média	30,1

A predominância de minerais de alta resistência e alta dureza como quartzo, k-feldspato e plagioclásio, forneceram ao agregado um valor razoável de abrasão. Diferentemente de composição similar, granítica como visto em Alves (2014), com maior porcentagem de biotitas por exemplo.

O fato da rocha em questão ser metamórfica, formada em condições de alta temperatura e pressão, além de anidras, também contribui para uma boa resistência. Durante o metamorfismo ocorre a recristalização dos grãos, seguida do seu crescimento, que resulta em um forte limite entre eles. A condição anidra auxilia na resistência da rocha porque minerais com água em sua estrutura tendem a ser menos resistentes que minerais anidros.

Outro fator que influencia positivamente na resistência a abrasão é a estrutura maciça/granoblástica típica de rochas em fácies granulito. Essa estrutura é caracterizada pela ausência de planos preferenciais de concentração de minerais, ou seja, ausência de planos de fraqueza definidos. Que por sua vez justifica a resistência a abrasão dos granulitos ser maior que a dos gnaisses. Outro fator positivo para a resistência a abrasão é a baixa porcentagem de biotita (4,8%), pois esse mineral têm baixa dureza e planos de clivagem muito bem definidos.

Entretanto, as microfraturas evidentes em lâmina petrográfica auxiliam na diminuição da resistência deste parâmetro pois representam planos de fraqueza aleatórios, assim como o retrometamorfismo, que enfraquece a estrutura original da rocha quando diminui o seu grau metamórfico.

Segundo a norma DNIT 031/2006 ES, o valor de abrasão Los Angeles deve ser inferior ou igual a 50% para que o material seja usado em pavimentação asfáltica, de uma maneira geral. Logo, o material estudado é adequado para pavimentação.

Quanto à possibilidade dos agregados em questão serem usados em revestimentos CPA, a norma determina que devem ter abrasão Los Angeles menor ou igual a 30%. Sendo assim, o material está apto para esse tipo de revestimento.

5.1.10

Perda ao Choque no Aparelho Treton

Os ensaios de resistência ao choque no Treton foram realizados três vezes, e o valor de resistência ao choque foi a média aritmética dos valores obtidos (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 Resultado da perda ao choque no Treton.

Ensaio	Treton (%)
Ensaio 1	84,6
Ensaio 2	92,3
Ensaio 3	85,2
Média	87,3

A perda ao choque no Treton foi de 12,6%. Tal foi mencionado no item anterior, a predominância de minerais de alta resistência e alta dureza como quartzo que apresenta dureza 7 Mohs, K-feldspato com dureza 6-6,5 Mohs e plagioclásio com dureza 5-6,5 Mohs, auxiliam no resultado adequado de perda ao choque. A estrutura maciça da rocha também fornece ao agregado um valor baixo de perda ao choque no Treton, pois a presença de planos de fraqueza, principalmente quando apresentam concentração de biotita como em gnaisses, diminuem a resistência da rocha.

5.1.11

Adesividade ao Ligante Asfáltico

O ensaio de adesividade apresentou um resultado não satisfatório. Antes mesmo de completar 24 horas submerso, já foi possível observar o desprendimento do ligante. Após 72 horas, os agregados apresentavam falhas da película asfáltica em diversos pontos (Figura 5.17).



Figura 5.17 Agregado envolvido por ligante asfáltico com falhas destacadas em branco após o ensaio de adesividade.

Segundo Ribeiro (2006), os feldspatos (feldspato e plagioclásio) e biotitas apresentam boa adsorção ao ligante asfáltico, porém, o quartzo prejudica essa interação, pois a sílica torna o agregado hidrofílico. Reunindo essas informações, é possível indicar que as regiões sem adesividade entre o ligante e o agregado podem estar associadas a áreas com maior concentração de quartzo.

Outra hipótese para baixa interação entre o CAP e o agregado é que, devido à moderada angularidade e alta rugosidade do agregado, pode ter ocorrido o fenômeno de deslocamento descrito por Tarrer & Wagh (1991), onde bordas afiadas do agregado rompem a película de asfalto facilitando a entrada de água nesse espaço.

Para um melhor entendimento da interação CAP-agregado também foram avaliadas propriedades adicionais do ligante asfáltico e realizado ensaios de adsorção.

5.2

Avaliação do Ligante

5.2.1

Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise química do Ligante asfáltico CAP 50/70 foi realizada no FTIR, a apresentou comportamento semelhante ao padrão encontrado em CAPs de uma maneira geral (Figura 5.18).

As principais bandas de absorção, de acordo com o espectro encontrado (Tabela 5.8), foram em 3323 cm^{-1} indicando um estiramento O-H, 2924 e 2854 cm^{-1} indicando um estiramento alifático, 1601 cm^{-1} evidenciando a presença de aromáticos, 1458 cm^{-1} indicando alifáticos com vibração de deformação no plano CH_2 e CH_3 .

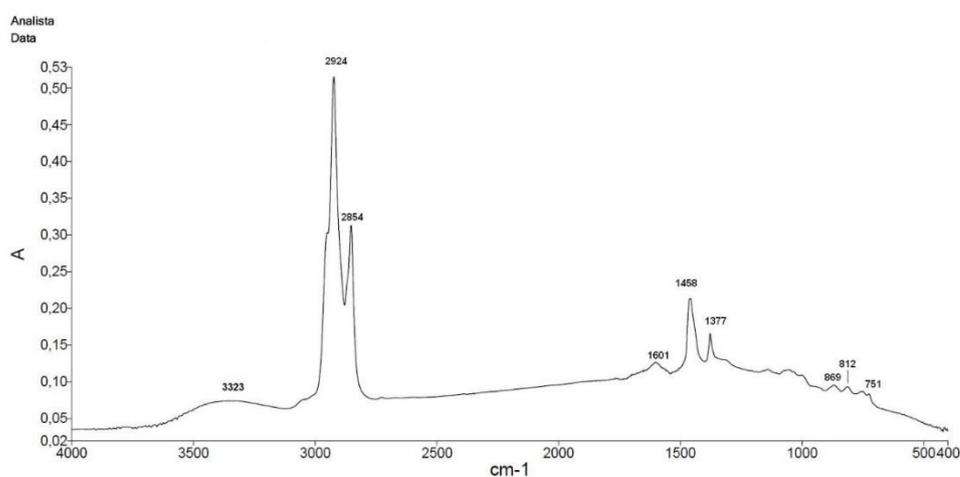


Figura 5.18 Espectro obtido na análise química por FTIR.

Tabela 5.8 Comparação entre bandas encontradas na bibliografia e a banda do CAP 50/70.

Absorções no IV	Calema (1995) cm^{-1}	Jain (1991) cm^{-1}	CAP 50/70
O-H estiramento	3100 - 3140	3668	3323
C-H aromático	3000 - 3100	3053	3100

estiramento			
C-H alifático estiramento	2780 - 3000	2924 – 2851	2924 - 2854
C-H	x	1458, 1377	1457, 1377
C = O estiramento	1640 – 1800	x	1601
C = C aromático, estiramento	1620 - 1590	1592	x

5.2.2

Separação das Frações Asfálticas e Maltênicas

Ao final do processo de separação das frações do CAP, verificou-se que o mesmo apresenta cerca de 99% de maltenos e 1% de asfaltenos.

A baixa quantidade de asfaleno no CAP influencia negativamente na adesividade, pois, como visto em Ribeiro (2006), essa fração é importante para a boa interação CAP-brita.

5.3

Interação CAP – Brita

5.3.1

Ensaio de Adsorção

Para o melhor entendimento da interação entre o ligante asfáltico e sua fração maltênica com o agregado, realizou-se ensaios de adsorção em diferentes concentrações de material asfáltico.

Como resultado, pode-se observar a partir da Figura 5.19, que para 2% de concentração de CAP, a adsorção foi de aproximadamente 32%. Já para 2% de concentração de malteno, a adsorção é de aproximadamente 16%. Para 3% de concentração de CAP, a adsorção é de 21%, enquanto que para o malteno é de aproximadamente 10%. Para uma concentração de 4% de CAP, a adsorção é

de cerca de 16%, enquanto que para o malteno a adsorção é de aproximadamente 8%. Nota-se que o percentual de adsorção usando o CAP em diferentes concentrações, para 3g de agregado, é aproximadamente o dobro da adsorção quando utiliza-se apenas o malteno. Esse resultado possivelmente é devido ao 1% de asfalteno contido no CAP, como analisado no item 4.2.2, confirmando o demonstrado por Ribeiro (2006). Observa-se também uma tendência a diminuir a capacidade de adsorção conforme aumenta-se a concentração de CAP/maltenos, indicando a baixa capacidade de adsorção do agregado.

Apesar do granulito analisado no presente trabalho apresentar 63% de feldspatos, o mesmo não tem um percentual considerável de minerais micáceos para auxiliar na boa adsorção como nos granitos e gnaisses analisados por Ribeiro (2006), além de apresentar 24,5% de quartzo, que justifica a baixa capacidade de adsorção do agregado, logo é importante um melhorador de adesão.

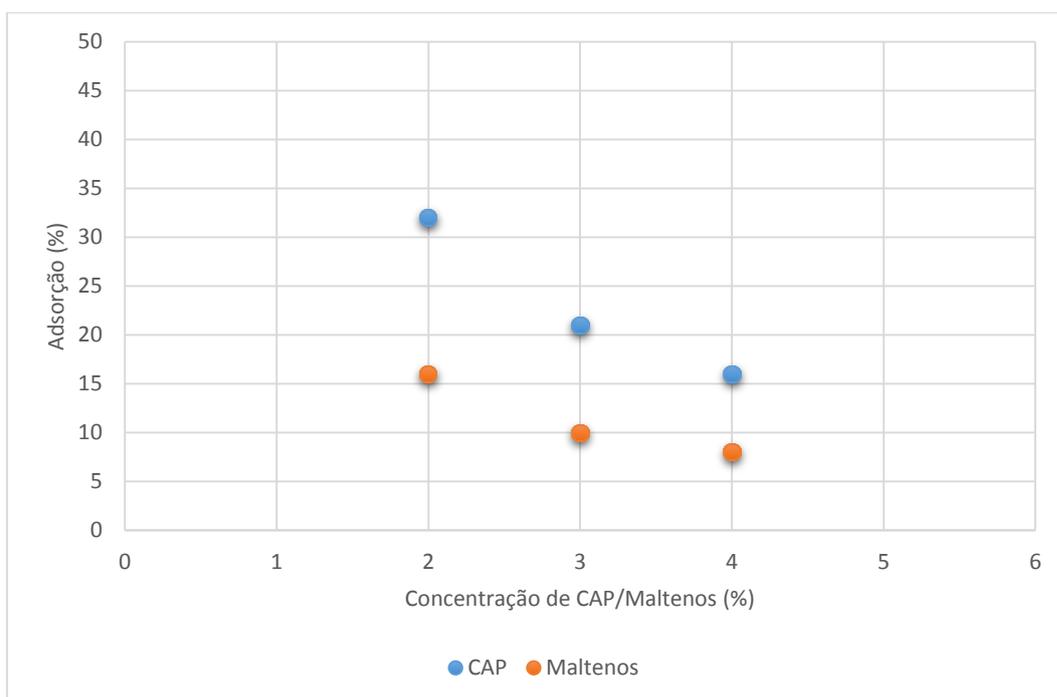


Figura 5.19 Percentual de adsorção versus concentração de CAP e de maltenos no granulito.

Conclusões e Recomendações

A partir dos resultados pesquisa é possível concluir que:

- O agregado objeto do estudo é uma rocha metamórfica, de alto grau, metamorfozada em fácies granulito, e formada acima de 750° em condição anidra. Esta rocha apresenta estrutura maciça, granoblástica, e é composta majoritariamente por minerais félsicos, quartzo (24,5%), K-feldspato (26,3%), e plagioclásio (36,8%). A estrutura maciça da rocha, ou seja, sem planos preferenciais de fraqueza, além seus minerais que apresentam alta dureza e boa resistência mecânica, contribuem para que o agregado apresente um comportamento satisfatório de abrasão Los Angeles (30%) e de resistência ao choque no Treton (12,6%).
- A forma dos agregados graúdos obtida no AIMS descreve uma baixa a moderada esfericidade, o que pode ser considerado um fator positivo pois agregados alongados podem quebrar durante a compactação. Quanto à angularidade, o agregado graúdo é subarredondado, característica positiva para fins de pavimentação, pois ajuda no atrito pneu-pavimento e não atrapalha na compactação. O agregado é ainda classificado como muito rugoso, o que também contribui positivamente para o bom atrito pneu-pavimento.
- A adesividade ao ligante asfáltico analisada se mostrou insatisfatória, pois em menos de 24 horas o ligante começou a se desprender de porções do agregado. Um fator que pode explicar esse resultado é o de que as regiões do agregado com concentração de quartzo são hidrofílicas, ou seja, tem mais afinidade com a água do que com o agregado. Outra hipótese é a de que angularidade e a alta rugosidade podem ter provocado o fenômeno de deslocamento da película de CAP.
- A composição química do CAP também contribuiu para uma baixa interação CAP-brita, pois o mesmo apresenta baixo percentual de asfaltenos em sua composição, fração responsável por essa interação.

Apesar disso, o próprio agregado mineral não tem capacidade alta capacidade de adsorção, resultante do percentual de quartzo e do baixo teor de biotita.

- O agregado estudado pode ser utilizado em revestimentos tipo concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ). A norma exige uma abrasão Los Angeles de 50%, e a abrasão do agregado é de 30%. O índice de forma exigido é de 0,5, ou seja, aproximadamente cúbico. Os agregados graúdos apresentaram baixa a moderada esfericidade, logo, não são alongados, mas também não têm formato cúbico. A adesividade insatisfatória deve ser atenuado com um melhorador de adesividade.
- O agregado também demonstra ter as características adequadas para ser utilizado na construção de revestimentos asfálticos tipo CPA (camada porosa de atrito). A graduação do mesmo é aberta, ou seja, apresenta insuficiência de agregados miúdos. A abrasão Los Angeles é de 30%, conforme requisitado pelo norma para esse tipo de revestimento. A absorção do material é de 1%, sendo que o requisitado na norma é que seja menor que 2%. Quanto à forma, os agregados estudados apresentaram resultado regular, pois os agregados graúdos têm baixa a moderada esfericidade, ou seja, não são alongados (pior resultado), mas também não possuem o formato ideal que seria o de um agregado aproximadamente cúbico.
- Os agregados estudados já foram utilizados na pavimentação de um trecho da BR-101 mesmo apresentando adesividade insatisfatória. Recomenda-se que ao utiliza-los novamente, seja acrescentado um melhorador de adesividade conforme sugerido pela norma DNIT 031/2006 – ES.

Referências bibliográficas

American Association of State Highway and Transportation Official. **AASHTO T 96-02 (2015)**: Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (ASTM C 131-01).

American Association of State Highway and Transportation Official. **AASHTO TP 81 - 10 (2012)**: Standard Method of Test for Determining Aggregate Shape Properties by Means of Digital Image Analysis. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO.

Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 9935 (2005)**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro. 4p

AFAF, A. H. M. Effect of aggregate gradation and type on hot asphalt concrete mix properties. (2014) Civil Eng. Dep., Faculty Of Eng., Minia University: **Journal Of Engineering Sciences Assiut University Faculty Of Engineering** Vol. 42 No. 3, 2014. 567–574 p.

AHLRICH, R.C. (1996). **Influence of Aggregate Gradation and Particle Shape/Texture on Permanent Deformation of Hot Mix Asphalt Pavements**. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Geotechnical Lab. in press.

AL-ROUSAN, T. M. (2004) **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Texas A&m University, College Station.

ALMEIDA, S. L. M.e LUZ, A. B. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 228 p.

ALVES, V. A. H. S. (2014) **Avaliação da Resistência a Degradação Mecânica de Agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por Técnicas Digitais de Imagens**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 145 p.

BEBERT CONSULTORIA GEOAMBIENTAL. (2010). **Plano de Aproveitamento Econômico Pedreira Itereré Indústria e Comércio S.A.**

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. (2010). **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros** (3ª ed.). Rio de Janeiro.

BESSA, I. S. (2012) **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Departamento de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. ; SOARES, J. B.(2013) . 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. 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2013.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. ; SOARES, J. B.(2015) . **Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt**. USP - Universidade De Sao Paulo: J. Mater. Civ. Eng., 2015. 8 p.

BROWN , E. R.e BASSETT , C. E. . **The effects of maximum aggregate size on properties of asphalt aggregate mixes**. Auburn University, Alabama: Auburn University Highway Research Center, 1989. 101 p.

CALEMA, V. IWANSKI, P., NALI, M., SCOTTI, R. e MONTANARI, L., "Precipitation of asphaltenes from solvent-diluted heavy oil and thermodynamic properties of solventdiluted heavy oil solutions", **Energy and Fuels**, 9ª ed., 1995, p. 225.

D'ANTONA, D. M. G.e FROTA, C. A. Da. **Estudo de Misturas Asfálticas com Ligante Modificado pelo Polímero EVA para Pavimentos Urbanos de Manaus** - AM. UFAM: Polímeros, 2011. 6 p.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - **DNER-ME 399 (1999)** Agregados – Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Treton. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.

_____. **DNER – ES 386 (1999)** – Pavimentação. Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero. Camada Porosa de Atrito. Norma rodoviária – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNER-ME 194 (1998)**: Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

_____. **DNER -ME 083 (1998)**: agregados – análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

_____. **DNER-ME 081 (1998)**: Agregados: determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

_____. **DNER-ME 035 (1998)**: Agregados – determinação da abrasão Los Angeles. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Rio de Janeiro.

_____. **DNER-ME 078 (1994)**: agregado graúdo – adesividade a ligante asfáltico: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. **DNER-IE 006 (1994)**: Materiais rochosos usados em rodovias – Análise Petrográfica. MT, 1994.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – **DNIT 0312004 – ES (2004)**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificações de serviço. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

GOLALIPOUR, A.; JAMSHIDI, E.; NIAZI, Y.; AFSHARIKIA, Z.; KHADEM, M. . Effect of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements . SIV - **5th International Congress - Sustainability Of Road Infrastructures: Sciencedirect**, 2012. 440-449 p.

GOUVEIA, L. T. DE. (2006) **Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Transportes). Departamento de Transportes, Universidade de São Paulo

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a terra**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

HAO, H. L. P.e XU, J.. **Effects of Nominal Maximum Aggregate Size on the Performance of Stone Matrix Asphalt**. Highway College, Chang'An University, Xi'an 710064, China: Applied Sciences, 2017. 9 p.

INSTITUTE OF PETROLEUM. **Standard Methods for Analysis and Testing of Petroleum and Related Products** – vol. 1, IP143.

JAIN, P. K., SANGITA, MAHESHWARI, R. K., **International Journal of Technology**, vol. 29, 1991, p. 259.

KANDHAL, P.S., e PARKER, JR., F. (1998) **Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements**. NCHRP Report 405. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Alabama.

KANDHAL, P.S.; L.A. COOLEY, Jr. The **Restricted Zone in the Superpave. Aggregate Gradation Specification**. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report 464. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, DC 2001

KLEIN, C. e DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**, 23a ed. Bookman, 2012

LETTIRT, J. A.; FINK, D. F.; WILSON, N. B.; FARLEY, F. F. (1949). Mechanism of absorption of bituminous materials by aggregate. **Association of Asphalt Pavement Technologist**, v.18, p.278 – 300.

MARQUES, G.L.O. (2001) **Procedimentos de Avaliação e Caracterização de Agregados Minerais Usados na Pavimentação Asfáltica**. Seminário de Qualificação ao Doutorado. Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

MASAD, E. A. (2005) **Aggregate Imaging Measurement System (AIMS): Basics and Applications**. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. Project Performed in Cooperation with the Texas Department

of Transportation and the Federal Highway Administration. Report nº FHWA/TX05/5-1707-01-1

MOAVENZADEH, F., e W. H. GOETZ. 1963. **Aggregate Degradation In Bituminous Mixtures**: Technical Paper. Publication FHWA/IN/JHRP-63/05. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University.

PRESS, F; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. 4. ed. Tradução Rualdo Menegat. Porto Alegre: Artmed, 2006. 656 p. il.

RIBEIRO, R. C. C., “**Interação entre cimentos asfálticos e seus constituintes com agregados minerais na formação do asfalto**”, Dissertação de Mestrado, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro -UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

RIBEIRO, R. C. C., “**Relação entre a interação asfalto/brita e resistência mecânica do pavimento asfáltico**”, Tese de Doutorado, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, L. S. d. (2005). **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos: Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação uv**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TARRER, A.R. e WAGH. V. (1991). **The Effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding**. SHRP-A/UIR-91-507, pp. 31.

WINKLER H.G. 1977. **Petrogênese das rochas metamórficas**, Editora Edgard Blucher Ltda, Porto Alegre, p. 264.

WU, Y.; PARKER, F.; KANDHAL. (1998). “**Aggregate Toughness/Abrasion Resistance and Durability/Soundness Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements**.” Transportation Research Record 1638:85–93.

Banco de Dados de Minerais Digital da UNESP

<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/inossilicatos/piroxenios/bdhiperstonio.gif>

<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdmicroclina.gif>

<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdalbita.gif>

<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/bdquartzo.gif>

<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/filossilicatos/bdbiotita.gif>