

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS GRAÚDOS DE ALGUMAS  
REGIÕES DO ESTADO DO AMAZONAS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS  
RODOVIÁRIOS

FRANK HUDSON DE SOUZA REBELO

MANAUS/AM

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

FRANK HUDSON DE SOUZA REBELO

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS GRAÚDOS DE ALGUMAS  
REGIÕES DO ESTADO DO AMAZONAS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS  
RODOVIÁRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração Materiais e componentes de Construção.

Orientador: Professor Dr. Nilton de Souza Campelo

MANAUS/AM

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS GRAÚDOS DE ALGUMAS  
REGIÕES DO ESTADO DO AMAZONAS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS  
RODOVIÁRIOS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e componentes de Construção.

BANCA EXAMINADORA:

Professor Dr. (a) Nilton de Souza Campelo (ORIENTADOR)  
PRESIDENTE – UFAM/ interno

Professor Dr. (a) Raimundo Pereira de Vasconcelos  
MEMBRO – UFAM/ interno

Professor Dr. (a) Raimundo Humberto Cavalcante Lima  
MEMBRO – UFAM/ externo

R291c Rebelo, Frank Hudson de Souza  
Caracterização tecnológica de agregados graúdos de algumas regiões do estado do Amazonas, para aplicação em pavimentos rodoviários. / Frank Hudson de Souza Rebelo. 2019  
125 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Nilton de Souza Campelo  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Agregados graúdos. 2. Caracterização tecnológica. 3. Mineralogia. 4. Pavimentos rodoviários. 5. Revestimento asfáltico. I. Campelo, Nilton de Souza II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por CONCEDER a oportunidade de vivenciar essa experiência ACADÊMICA somada com muito esforço e dedicação e de poder contribuir através dessa pesquisa na aplicação racional dos agregados pétreos e conseqüentemente na melhoria da pavimentação regional proporcionando uma malha viária funcional e durável cujo desempenho satisfatório da estrutura como um todo possibilita e potencializa o desenvolvimento social e econômico do Estado do Amazonas relativo infraestrutura e mobilidade rodoviária.

À minha família, em especial a SAMARA PRINTES por sempre acreditar e apoiar-me.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, na pessoa de todos os Docentes e Técnicos dos Laboratórios onde fora desenvolvida a pesquisa na forma de experimentos e ensaios tecnológicos.

Em especial ao Laboratório de Pavimentação - LABPAV por disponibilizar sua estrutura e facilitar o desenvolvimento deste trabalho junto aos técnicos.

Merecidamente ao Professor DR. NILTON DE SOUZA CAMPELO por orientar e supervisionar toda a pesquisa científica de forma incondicional e efetiva.

Aos demais professores (docentes) e alunos (discentes) do PPGEC-UFAM por terem contribuído durante todo o período do MESTRADO.

Aos Laboratórios LAMAC, LEM, LABMAT, e ao Departamento de Geociências, na pessoa do Professor DR. RAIMUNDO HUMBERTO. Ao Laboratório de LAMINAÇÃO da CPRM-MANAUS onde juntos de maneira direta contribuíram para a caracterização dos materiais objetos dessa pesquisa.

Ao Engenheiro de Minas LUIZ ANTÔNIO pela ajuda e orientação na aquisição e coleta dos materiais.

As Pedreiras MERCÊS, SAMAÚMA, BRITAMAZON e NAVEGAÇÃO ANA CAROLINA e PEDREIRA SANTA FÉ por cederem em forma de doação as amostras objeto desta pesquisa além da PETROBRÁS pelo cimento asfáltico de petróleo – CAP fornecido.

## RESUMO

Nas obras de pavimentação, os insumos mais aplicados são os agregados, sendo assim, sua demanda é elevada, e conseqüentemente, o impacto ao meio ambiente também é maior, devido à sua extração e por serem a maior proporção em termos de massa. Os agregados possuem influência significativa no desempenho mecânico e na durabilidade do pavimento, uma vez, que suas características técnicas em desacordo com as necessidades do projeto, podem impactar negativamente as condições estruturais do pavimento. A falta de investimento técnico-financeiro nesse setor, acaba por reduzir a durabilidade, por meio da concepção de pavimentos deficientes tecnicamente, o que propicia uma taxa alta de surgimento de patologias de forma precoce, frequentes e recorrentes, como a desagregação, o trincamento e as deformações permanentes. Essas patologias, na maioria dos casos, ocorrem, em especial, nos pavimentos flexíveis revestidos por concretos asfálticos (CA), cuja falta de controle e caracterização tecnológica dos agregados componentes desse tipo de pavimento, são fatores determinantes. No estado do Amazonas os pavimentos, na sua maioria, são revestidos por CA. Nesse tipo de revestimento os agregados são responsáveis por cerca de 90% da sua composição (em massa) e essa camada, por sua vez, tem a função de proteger as subseqüentes, além de proporcionar qualidade, segurança e boa trafegabilidade. Sendo assim, essa pesquisa teve como objetivo geral, a caracterização tecnológica e mineralógica de agregados graúdos, voltados para aplicação em pavimentos rodoviários. Todos os procedimentos foram baseados em normas brasileiras (NBR) e diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura (DNIT). As amostras coletadas são oriundas de Barcelos, Presidente Figueiredo, Japurá e Apuí, todos municípios do estado do Amazonas. A metodologia utilizada foi a de ensaios laboratoriais, através da caracterização física e mecânica, além da apreciação e classificação mineralógica por meio da petrografia e difração de raios-X (DRX). Os resultados da análise mineralógica, classificou em riolito de rocha ígnea vulcânica a amostra BPF-2, e sienogranitos de rocha plutônica a BBAR, BPF-1 e BPF-3. Em relação aos seixos o SXRA como sendo um grão de quartzo, e por fim o SXRJ como sendo uma sílica amorfa microcristalina. Também, foi realizado ensaio da composição química, por meio da fluorescência de raios-X (FRX) tendo como resultado a classificação das amostras BBAR, BPF-2, BPF-3, SXRA e SXRJ, como sendo rochas ácidas e a BPF-1 como intermediária, de acordo com o teor de sílica presente em massa. A caracterização tecnológica foi obtida por meio dos parâmetros físicos e mecânicos, tendo como resultado global satisfatório, em todas as amostras de brita e alguns insatisfatórios nos seixos. A BBAR e BPF-3 apresentaram os melhores resultados, isto é, em todas as análises, enquanto que, a BPF-2 e BPF-1 no ensaio de índice de forma classificaram-se com formas lamelares e alongadas. Essas formas são distintas da cúbica, que é a mais desejável para aplicação em pavimentos. No parâmetro de adesividade com o ligante asfáltico, apenas o SXRA e o SXRJ, classificaram-se como insatisfatórios, ou seja, com pouca ou nenhuma aderência. Tal resultado, é justificado pela textura superficial lisa e arredondada de ambos seixos, além é claro, do teor elevado de sílica ( $\text{SiO}_2 \geq 95\%$ ) presente nas rochas. De certo, fica evidenciado, o potencial de aplicação dos agregados graúdos de pedra britada e uma restrição parcial, devido a resultados negativos relativo a adesividade, textura e dano por umidade induzida (Lottman) dos seixos dessa pesquisa.

**Palavras-chaves:** Agregados graúdos. Caracterização tecnológica. Mineralogia. Pavimentos rodoviários. Revestimento asfáltico.

## ABSTRACT

In paving works, the most applied inputs are aggregates, thus, its demand is high and, consequently, the impact on the environment is also increased due to their extraction and to be in major proportion in terms of mass. The aggregates have significant influence on the mechanical performance and durability of the pavement, once their technical characteristics in disagreement with the project's needs, could adversely affect the structural condition of the pavement. The lack of technical and financial investment in this sector ultimately reduces durability through the design of technically deficient pavements, which provides a high rate of early, frequent and recurring pathologies such as disaggregation, cracking and the permanent deformations. Such conditions, in most cases, occur especially in flexible pavements coated with asphalt concrete (AC), whose lack of control and technological characterization of the aggregate components of this type of pavement, are determining factors. In the state of Amazonas most pavements are covered with AC. In this type of coating, the aggregates are responsible for about 90% of its composition (by mass) and this layer, on the other hand, has the function of protecting the subsequent ones, besides providing quality, safety and good trafficability. Thus, this research aimed the technological and mineralogical characterization of coarse aggregates, geared for use in road pavements. All procedures were based on Brazilian standards (NBR) and guidelines of the National Infrastructure Department (DNIT). The samples are from Barcelos, Presidente Figueiredo, Japurá and Apuí, all municipalities of Amazonas state. The methodology used was laboratory tests, through physical and mechanical characterization, as well as mineralogical appreciation and classification through petrography and X-ray diffraction (XRD). The results of the mineralogical analysis classified the sample BPF-2 as volcanic igneous rock rhyolite, and the samples BBAR, BPF-1 and BPF-3 as plutonic rock syenogranites. Regarding the pebbles, the results classified SXRA as a quartz grain, and finally, SXRJ as a microcrystalline amorphous silica. Also, a chemical composition test was performed by X-ray fluorescence (XRF) resulting in the classification of samples BBAR, BPF-2, BPF-3, SXRA and SXRJ as acid rocks and BPF-1 as intermediate according to the silica content present by mass. The technological characterization was obtained by means of physical and mechanical parameters, with the overall satisfactory results in all gravel samples and in some unsatisfactory pebbles samples. BBAR and BPF-3 showed the best results in all analyzes, while BPF-2 and BPF-1 in the form index test were classified as lamellar and elongated forms. These shapes are distinct from the cubic, which is most desirable for pavement application. In the adhesion parameter with the asphalt binder, only SXRA and SXRJ were classified as unsatisfactory, which means with little or no adherence. This result is justified by the smooth and rounded surface texture of both pebbles, and of course the high silica content ( $\text{SiO}_2 \geq 95\%$ ) present in the rocks. Certainly, it is evidenced the application potential of coarse gravel aggregates and a partial restriction, due to negative results regarding the adhesiveness, texture and induced moisture damage (Lottman) of the pebbles of this research

**Keywords:** Coarse aggregates. Technological characterization. Mineralogy. Road pavements. Asphalt coating.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	<b>PROBLEMÁTICA</b> .....	16
1.2	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
1.2.1	Geral.....	19
1.2.2	Específicos .....	19
1.3	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	19
1.4	<b>DELIMITAÇÃO DA PESQUISA</b> .....	20
1.5	<b>ESTRUTURA DA PESQUISA</b> .....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.1	<b>HISTÓRICO SOBRE A PAVIMENTAÇÃO NO ESTADO DO AMAZONAS</b> <b>22</b>	
2.2	<b>GEOLOGIA DO ESTADO DO AMAZONAS</b> .....	23
2.2.1	Características das áreas de extração dos materiais em estudo .....	24
2.2.2	Recursos minerais (agregados) do estado do Amazonas .....	25
2.3	<b>REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS</b> .....	28
2.4	<b>AGREGADOS</b> .....	28
2.4.1	Classificação dos agregados graúdos.....	29
2.5	<b>CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS AGREGADOS</b> .....	34
2.6	<b>APRECIAÇÃO PETROGRÁFICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b> .....	35
2.7	<b>CORRELAÇÃO E INFLUÊNCIA ENTRE AS PROPRIEDADES</b> <b>TECNOLÓGICAS E MINERALÓGICAS DOS AGREGADOS</b> .....	36
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	48
3.2	<b>MATERIAIS</b> .....	49
3.2.1	Agregados graúdos .....	49
3.2.2	Coleta de campo .....	50
3.3	<b>MÉTODOS</b> .....	52
	NBR NM 27/2001 .....	52
3.3.1	Caracterização Mineralógica .....	53
3.3.1.1	<b>Preparo das amostras para análise da Composição química e</b> <b>litológica das rochas por meio das técnicas de Espectrometria de fluorescências</b> <b>de raios-x(FRX) e Difração de Raios-X(DRX)</b> .....	53

3.3.1.2	<b>Análise óptica (petrografia)</b> .....	54
3.3.1.3	<b>Composição e classificação litológica por difratômetro de raios-X</b> ..	55
3.3.2	Composição química por fluorescência de raios-X (FRX) .....	56
3.3.3	Ensaio tecnológicos .....	56
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	66
4.1	<b>CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA</b> .....	66
4.2	<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b> .....	71
4.3	<b>CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA</b> .....	73
4.3.1	Propriedades físicas .....	73
4.3.1.1	<b>Granulometria</b> .....	73
4.3.1.2	<b>Massa unitária</b> .....	76
4.3.1.3	<b>Massa específica real e aparente (M.E.R/MEA) e absorção</b> .....	78
4.3.1.4	<b>Índice de porosidade</b> .....	80
4.3.1.5	<b>Teor de material pulverulento</b> .....	81
4.3.1.6	<b>Teor de umidade dano por umidade induzida</b> .....	83
4.3.1.7	<b>Índice de forma</b> .....	84
4.3.1.8	<b>Teor de torrões de argila</b> .....	86
4.3.1.9	<b>Adesividade do ligante</b> .....	87
4.3.1.10	<b>Degradação química - Sanidade</b> .....	89
4.3.2	Propriedades mecânicas .....	92
4.3.2.1	<b>Abrasão Los Angeles</b> .....	93
4.3.2.2	<b>Resistência pelo método dos 10% de finos</b> .....	94
4.3.2.3	<b>Resistência ao esmagamento</b> .....	95
4.3.2.4	<b>Resistência ao impacto no Aparelho Treton</b> .....	97
4.4	<b>CORRELAÇÃO DE PROPRIEDADES IMPORTANTES</b> .....	98
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	108
5.1	<b>RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> .....	110
6	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	111
6.1	<b>NORMAS APLICADAS</b> .....	111
6.2	<b>LITERATURAS</b> .....	112
7	<b>ANEXO I</b> .....	123

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Mapa Geológico do Brasil em destaque o estado do Amazonas .....	23
Figura 2. Unidades geológicas do Estado do Amazonas .....	27
Figura 3. Mapa de extração de brita da RMM com exceção da capital Manaus. ....	27
Figura 4. Curvas granulométricas convencionais dos agregados .....	33
Figura 5. Fluxograma dos procedimentos metodológicos da pesquisa.....	48
Figura 6. Mapa de localização das ocorrências e extração das Britas e seixos.....	49
Figura 7. Local de coleta da brita BBAR nas granulometrias 0,1 e 2 no pátio da Pedreira Britamazon situada na rua Coréia do Sul, Ponta Negra, Manaus – AM nas coordenadas 3°05'43.3"S e 60°04'25.9"W. ....	50
Figura 8. Local de coleta do seixo SXRA no pátio da Pedreira Navegação Ana Carolina situada na rua Flores, Compensa, Manaus - AM nas coordenadas 3°06'29.6"S / 60°04'08.6"W.....	51
Figura 9. Local de coleta da brita BPF-1 nas granulometrias 0,1 e 2 no pátio da Pedreira Mercês situada na Avenida Torquato Tapajós, Manaus - AM nas coordenadas 3°01'51.7"S / 60°01'07.4"W. ....	51
Figura 10. Local de coleta da brita BPF-2 nas granulometrias 0,1 e 2 no pátio da Pedreira Samaúma situada na Avenida Margarita, Nova Cidade, Manaus - AM nas coordenadas 3°00'00.0"S / 59°59'22.9"W. ....	51
Figura 11. Local de coleta do seixo SXRJ no pátio da (não quis se identificar) situada na rua Vista Alegre Colônia Oliveira, Manaus - AM nas coordenadas 3°08'50.4"S / 60°00'29.8"W.....	51
Figura 12. Local de coleta da brita BPF-3 nas granulometrias 0,1 e 2 no pátio da Pedreira da Fé situada na Avenida Torquato, Tarumã, Manaus - AM nas coordenadas 3°00'0.8"S / 60°01'55.1"W.....	52
Figura 13. Coleta de material em campo (amostragem) NBR NM 26/2009. ....	53
Figura 14. Equipamentos utilizados no preparo das amostras para ensaio de FRX e DRX.....	54
Figura 15. Lâminas petrográfica das amostras para análise mineralógica NBR NM 7389/2009 .....	55
Figura 16. Ensaio de Análise Granulométrica NBR NM 248/2003 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.....	57

Figura 17. Ensaio de Abrasão Los Angeles NBR NM 51/2001 no Laboratório de Ensaio Físico-químicos – LEM da UFAM .....	57
Figura 18. Ensaio de Índice de formas NBR 7809/2008 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.....	58
Figura 19. Ensaio de Massa Específica e Absorção NBR NM 53/2009 e teor de umidade NBR NM 9939/87 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.	59
Figura 20. Ensaio de Massa Unitária solta e compactada NBR NM 45/2006 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.....	59
Figura 21. Ensaio de Teor de Material Pulverulento NBR NM 46/2003 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.....	60
Figura 22. Ensaio de adesividade do agregado com o ligante betuminoso NBR 12583/2017 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.....	61
Figura 23. Ensaio de umidade induzida (adesividade modificada Lottman ASTHO 283-14).....	62
Figura 24. Ensaio de Teor de argila NBR 7218/2010 realizado no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.....	62
Figura 25. Ensaio de Durabilidade por emprego de sulfato de sódio – Sanidade DNER ME 096/94.....	63
Figura 26. Ensaio de resistência pelo método dos 10% finos DNER-ME 096/1988 e de esmagamento NBR NM 9938/2013.....	64
Figura 27. Ensaio de Impacto no Aparelho Treton DNER – ME 399/1999.....	65
Figura 28. Rocha matriz (esquerda) e Lâmina petrográfica (direita) da amostra de brita <b>BBAR</b> em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociência – DEGEO. ....	67
Figura 29. Rocha matriz (esquerda) e Lâmina petrográfica (direita) da amostra de brita BPF-1 em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociência – DEGEO. ....	67
Figura 30. Lâmina petrográfica da amostra de brita BPF-2 em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociências – DEGEO.....	68

Figura 31. Lâmina petrográfica da amostra de brita BPF-3 em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociências – DEGEO. ....	69
Figura 32. Lâmina petrográfica da amostra de grão sedimentar SXRA em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociências – DEGEO. ....	69
Figura 33. Lâmina petrográfica da amostra de grão sedimentar SXRJ em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociência – DEGEO. ....	70
Figura 34. Ensaio de granulometria das amostras de seixo SXRA e SXRJ com suas respectivas curvas granulométricas e de referência (limites mínimos e máximos). ..	75
Figura 35. Resultado do ensaio de granulometria das amostras de brita B0, B1 e B2 com suas respectivas curvas granulométrica e de referência (limites mínimos e máximos).....	76
Figura 36. Resultado dos ensaios de Massa unitária solta – M.U.S a esquerda, e compactada – MUC a direita (DNER – ME 152/95). ....	77
Figura 37. Resultado do ensaio de massa específica e absorção. ....	79
Figura 38. Resultados do ensaio de Absorção de água dos agregados de brita e seixo. ....	80
Figura 39. Resultados do ensaio de Porosidade dos agregados de brita e seixo. ....	81
Figura 40. Resultados do ensaio de Teor de material pulverulento. ....	82
Figura 41. Resultado do ensaio de teor de umidade (6A) e dano por umidade induzida (6B). ....	83
Figura 42. Índices de forma dos agregados. ....	85
Figura 43. Resultado do ensaio de Teor de torrões de argila. ....	87
Figura 44. Ensaio de adesividade com ligante asfáltico.....	88
Figura 45. Escorregamento da película de ligante das amostras de seixo SXRA (a esquerda) e SXRJ (a direita). ....	88
Figura 46. Resultado de degradação química através de ensaio de sanidade (DNER ME 089/1994) limite normativo de perda de massa $\leq 12\%$ x índice de absorção x teor de umidade.....	90
Figura 47. Degradação química – sanidade x elementos químicos presentes em cada amostra. ....	91
Figura 48. Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles. ....	93

Figura 49. Resultado do ensaio de 10% finos carga (kN) x perda de massa (produção de finos %). .....	95
Figura 50. Resultado do ensaio de esmagamento. ....	96
Figura 51. Resultado do ensaio de resistência ao impacto no aparelho Treton. ....	97
Figura 52. Resultados do ensaio de Porosidade e Massa específica real MER .....	99
Figura 53. Resultado do ensaio de porosidade e absorção. ....	99
Figura 54. Resultado do ensaio de Porosidade e Degradação química – Sanidade. ....	100
Figura 55. Resultados do ensaio de Porosidade e Abrasão Los Angeles. ....	101
Figura 56. Resultado do ensaio de Porosidade e resistência pelo método de 10% finos. ....	102
Figura 57. Resultado do ensaio de Porosidade e Esmagamento dos grãos. ....	103
Figura 58. Resultado do Ensaio de Porosidade e Resistência no Aparelho Treton. ....	104
Figura 59. Resultado do ensaio de composição mineralógica e Resistencia a abrasão Los Angeles. ....	104
Figura 60. Resultado do ensaio de composição mineralógica e resistência pelo Método de 10% finos. ....	105
Figura 61. Resultado do ensaio de composição mineralógica e resistência ao esmagamento dos grãos. ....	106
Figura 62. Resultado do ensaio de composição mineralógica e resistência ao impacto no Aparelho Treton. ....	107

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Classificação de rochas de acordo com teor de sílica.....	30
Tabela 2. Tipos de rochas usados como agregados em obras de pavimentação.....	31
Tabela 3. Correlações entre os resultados dos ensaios de caracterização tecnológicas (física e mecânica) com a composição química e mineralógicas dos agregados graúdos. ....	36
Tabela 4. Valores limites a serem obtidos após realização dos ensaios físico-mecânicos de Abrasão los Angeles, Esmagamento, 10% finos e Aparelho Treton. .	45
Tabela 5. Metodologia aplicada para desenvolvimento dos ensaios tecnológicos e mineralógicos em agregados graúdos para aplicação em pavimentação – normas, técnicas e diretrizes aplicadas para desenvolvimento da pesquisa. ....	52
Tabela 6. Resultado da caracterização mineral das amostras de rochas por meio de análise óptica (petrografia) e identificação dos minerais por meio de DRX. ....	66
Tabela 7. Resultado de análise da composição química das amostras através da técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX). ....	71
Tabela 8. Resultado de análise granulométrica das amostras de agregados de britas e seixos rolados .....	74
Tabela 9. Resultados qualitativo visual do ensaio de degradação química (durabilidade) após imersão em solução de sulfato de sódio.....	92
Tabela 10. Resultados geral da caracterização tecnológica: Parâmetros físicos....	123
Tabela 11. Resultados obtidos com ensaios físico-mecânicos das amostras de brita e grão sedimentar (seixo) rolado respectivamente.....	123
Tabela 12. Resultados do ensaio de durabilidade por sulfato de sódio. ....	124

## SÍMBOLOS E SIGLAS DE ABREVIações

%	Porcentagem
>	Maior que
<	Menor que
≥	Maior ou igual que
≤	Menor ou igual que
°C	Grandeza de temperatura em graus celsius
±	Mais ou menos
kg/dm <sup>3</sup>	Quilogramas por decímetro cúbico
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
kg	Quilogramas
g	Gramas
km	Quilômetro
kV	Quilovolts
kN	Quilonewton
m	Metro
mm	Milímetro
AAUQ	Areia asfalto usinada quente
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
AM	Amazonas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANM	Agência Nacional de Mineração
BR	Simbologia de rodovia federal brasileira
BPF	Brita de Presidente Figueiredo 1, 2 e 3
BBAR	Brita de Barcelos
CA	Concreto asfáltico
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CAUQ	Concreto asfáltico usinado quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DEGEO	Departamento de Geociências
DMC	Diâmetro máximo característico
DNER/ME	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens/método de ensaio

DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DRX	Espectrometria por difração de raios-x
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios-x
FT	Faculdade de tecnologia
LABPAV	Laboratório de pavimentação
LAMAC	Laboratório de materiais e compósitos da Amazônia
LEM	Laboratório de ensaio de materiais
Ltda	Limitada
MEA	Massa específica aparente
MER	Massa específica real
MUC	Massa unitária compactada
MUS	Massa unitária solta
MF	Módulo de finura
MG	Minas Gerais
NBR/NM	Norma Brasileira / Norma Mercosul
PA	Pará
pH	Grandeza de acidez
PR	Paraná
RC	Resistência a compressão simples
RC'	Resistência a compressão simples confinada
RMM	Região Metropolitana de Manaus
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SHRP	Strategic Highway Research
SXRA	Seixo de rio de Apuí
SXRJ	Seixo de rio de Japurá
UFAM	Universidade Federal do Amazonas

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 PROBLEMÁTICA

Devido às suas condições geológico-geotécnicas, o estado do Amazonas apresenta características atípicas tangíveis a obras de pavimentação viária, pois, localiza-se em uma Bacia Sedimentar, cujo estrato rochoso não é aflorantes nem se encontra próximo aos centros consumidores principais. Sendo assim, a busca por estratégias e tecnologias que visem melhorar o desempenho e aumentar a durabilidade dos pavimentos, além de potencializar o desenvolvimento socioeconômico da infraestrutura rodoviária, passa pela criação de novos materiais alternativos e aplicabilidade de forma técnica dos convencionais comumente empregados, ou seja, com a utilização racional (técnica) desses recursos naturais que são aplicados nesse seguimento.

O transporte viário tem influência direta no desenvolvimento socioeconômico, devido a uma parcela significativa do escoamento da produção local, regional ou até mesmo nacional serem feitas por vias terrestre, seja ela representada pelo transporte de produtos, animais ou de passageiros. Apesar de ser o meio de transporte mais utilizado (cerca de 60%) a malha viária apresenta 78% das estradas do Brasil em situação precária de tráfego em decorrência da falta de investimentos em manutenção e conservação (MEDINA, 2005; DAVID, 2006; WANKE, 2010; CNT, 2018).

Isso ocorre, em especial, devido ao fato de que na maioria desses pavimentos a camada de rolamento ser comumente revestidas por concreto asfáltico (CA), mas, apenas 12% dessas rodovias e estradas são efetivamente asfaltadas, de acordo com relatório distrital da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2018).

Nesse relatório, a CNT cita que no estado do Amazonas menos de 15% das estradas federais, bem como, as administradas pelo governo, estão em condições ótimas de tráfego, isto é, dos 870 km avaliados, apenas 281 km são considerados como regular, enquanto que 241 km são ruins e 348 km em estado péssimo chegando a uma conclusão que mais de 85% das estradas não permitem uma trafegabilidade com segurança, eficiência, qualidade e conforto.

A capital Manaus, por exemplo, um dos maiores pólo econômico do estado do Amazonas, não se difere muito da realidade descrita anteriormente, pois, há recorrentes e prematuras patologias em seus pavimentos, mesmo em zonas distintas e com tipos de tráfego e transportes assimilares.

Em regra, os fatores causadores podem não estar apenas ligado à falta de manutenção e conservação, outrossim a elementos como projeto inadequado, má execução e, principalmente, na escolha, dosagem e aplicação de materiais inadequados com características específicas individuais que não suprem a demanda de projeto (CAVALCANTE et al, 2012).

Muitas obras de construção, manutenção, conservação e ampliação da pavimentação no estado do Amazonas sofrem com uma vasta adversidade peculiar ao estado, como o clima (índices pluviométricos elevados e longos), a logística (grandes distâncias) e na aquisição dos insumos (agregados) sendo que este último, ainda há o fato da carência de jazidas nas proximidades dos canteiros de obra, somados com a escassez do conhecimento de suas características tecnológicas, quando aplicados nos revestimento dos pavimentos com misturas asfálticas (CAMPELO et al., 2008).

Essas misturas asfálticas são uma combinação de agregados e ligantes, ambos dosados de forma proporcional, no qual o ligante tem suas propriedades influenciadas pela temperatura e cargas atuantes, onde os agregados utilizados devem apresentar propriedades que sejam capazes de suportar as solicitações a eles impostos, já que são responsáveis por cerca de 90% da composição da mistura asfáltica, em massa. O conhecimento das características dos agregados são significantes para se originar estruturas de revestimento asfáltico durável em toda sua vida útil de serviço (BERNUCCI et al., 2008).

Para isso, inicialmente, é de grande valia se deter o conhecimento do potencial geológico da região (mineralogia), das propriedades físicas, químicas e mecânicas desses minerais (agregados) pois, à medida que esses recursos naturais são requeridos em grande escala, é que esse conhecimento se faz ainda mais necessário para o planejamento de extração, por meio da implementação de políticas públicas voltadas para aplicação racional e sustentável em obras de pavimentação (RIKER et al, 2016).

Bastos (2010), em seu trabalho, cita que as propriedades dos agregados possuem grande parcela no desempenho mecânico de um revestimento asfáltico

como na vida de fadiga por exemplo que é influenciada vultuosamente pelas características (propriedades) dos materiais que o compõem.

Rodrigues e Pinto (1991) mencionam que o trincamento por fadiga é o principal fator e implica continuamente na redução do desempenho mecânico e nos níveis de serventia do revestimento asfáltico e do pavimento como um todo.

Além de influenciar a vida de fadiga os agregados podem, também, afetar o grau de flexibilidade da mistura asfáltica por fatores endógenos dos agregados (formação geológica das rochas de origem) e fatores exógenos (forma de degradação das rochas quando submetidas ação de intempéries) (BASTOS, 2010).

As características físicas como granulometria e densidade específica podem indicar como será o consumo desses recursos na confecção de um revestimento e esse consumo acaba por alterar as propriedades do pavimento em si, onde a densidade pode ser justificada pela composição química do agregado (AMORIM et al., 2009).

A mineralogia pode apontar como será o tipo de fratura de um determinado mineral, fator esse muito importante na possível elucidação e explicação do índice de forma dos agregados. Essa característica é importante no dimensionamento da energia de compactação a ser aplicada, pois agregados com forma distinta e expressivamente distante da forma cúbica (mais ideal), acaba por afetar a trabalhabilidade da mistura o que implicaria em uma elevada energia de compactação que em agregados com forma lamelar ou alongada acaba por facilitar a fratura dos grãos internos, reduzindo assim, a resistência à deformação e à fratura da mistura.

De acordo com Fernandes, (2005) o índice de forma das partículas do agregado se correlaciona com a esfericidade, lamelaridade e angularidade. Esses fatores podem ser atribuídos ao tipo de rocha e sua clivagem. A clivagem pode influenciar de forma indireta na formação de partículas alongadas e essa forma apresenta um desvio no comportamento da capacidade de suporte de carga e estabilidade da mistura.

Já o tipo e composição da rocha podem elucidar a sua resistência, como, por exemplo, uma rocha contendo em sua composição mineralógica a presença de feldspato, pode ser menos suscetível a quebra ou fratura, por ser mais rígida devido o mineral possuir classificação de dureza 6 na escala de Mohs.

Logo a construção de pavimentos rodoviários em geral necessita de grandes quantidades de agregados, contudo, encontrar jazidas de rochas com boa qualidade,

sem discordâncias com políticas ambientais e legalizadas torna-se um grande desafio na maioria dos municípios e no estado do Amazonas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Geral**

Realizar a caracterização tecnológica (propriedades físicas e mecânicas) de agregados graúdos de brita e seixo rolado, com a respectiva apreciação petrográfica e composição química, procedentes de regiões distintas do estado do Amazonas, visando a sua aplicação racional (técnica) em misturas asfálticas nos pavimentos rodoviários e, assim, minimizar patologias inerentes da utilização incompatível com suas características intrínsecas e extrínsecas.

### **1.2.2 Específicos**

- ✓ Apreciar a mineralogia dos agregados através da análise óptica (petrografia por meio de lâmina delgada) e por meio da técnica de Difração de raios – X (DRX);
- ✓ Identificar a composição química das rochas por meio da técnica de Fluorescência de raios – X (FRX);
- ✓ Caracterizar tecnologicamente as propriedades físicas e mecânicas dos agregados com e sem ligante asfáltico;
- ✓ Correlacionar os resultados dos parâmetros mineralógicos, químicos, físicos e mecânicos das amostras e verificar sua influência entre si;
- ✓ Confrontar os resultados com as especificações técnicas vigentes brasileiras com intuito de demonstrar se há ou não restrição técnica quanto ao uso desses agregados em revestimentos asfálticos nos pavimentos rodoviários do estado do Amazonas.

## **1.3 JUSTIFICATIVA**

As obras de infraestruturas rodoviária no estado do Amazonas, em especial as da Região Metropolitana de Manaus – RMM esbarram em uma série de dificuldades (técnicas e custos) que implicam diretamente na durabilidade e

desempenho dos pavimentos como um todo, com destaque para a camada de revestimentos asfálticos.

Dentre os diversos destaca-se por exemplo a proeminente e futura escassez do material pétreo (agregados), a carência de conhecimento técnico de suas características tecnológicas, as condições climáticas (altos índices pluviométricos com períodos de cheias) e a logística (grandes distâncias). De forma global, esses fatores propiciam um alto custo das obras de pavimentação, no dimensionamento impreciso, na utilização incorreta dos materiais e na fadiga precoce do revestimento asfáltico com aparecimento de patologias e por consequência na redução do desempenho mecânico e na durabilidade do pavimento.

De modo mais enfático é que um melhor entendimento do comportamento das misturas asfálticas depende da identificação das propriedades tecnológicas dos agregados e esse conhecimento oferece uma prévia dos efeitos negativos inerentes aos agregados. Diversas literaturas têm obtido e apresentado resultados que demonstram que as propriedades dos agregados são essenciais para a capacidade da mistura de resistir à deformação permanente para uma maior durabilidade e desempenho mecânico.

Sanders e Dukatz (1992) apresentam dados em que a influência dos agregados se sobressai sobre a do ligante atenuando assim, as deformações permanentes.

Roberts et al. (1991) afirmam que agregados resistentes, duráveis, com boa textura e forma afetam diretamente a deformação permanente, além de proporcionarem uma boa trabalhabilidade, densificação por compactação mínima e degradação baixa. A medida em que há a utilização racional desses recursos minerais poderá ocorrer uma possível redução dos custos com construções futuras e na manutenção e reabilitação dos revestimentos já existentes, concomitante com uma maior confiabilidade e durabilidade dos projetos de pavimentação do estado do Amazonas.

#### **1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA**

A presente pesquisa está delimitada em uma análise da caracterização tecnológica de agregados graúdos oriundos de rochas britadas e seixos rolados para uso em pavimentos rodoviários no estado do Amazonas. Para isso, foram utilizadas

amostras extraídas do Rio Aripuanã em Apuí, Rio Japurá no município de Japurá no caso dos seixos e, da Comunidade de Moura em Barcelos e da faixa de extensão dos quilômetros 150 a 202 da Rodovia Federal BR-174 em Presidente Figueiredo no caso da britas.

## **1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA**

A pesquisa está estruturada em cinco capítulos para melhor entendimento e organização.

O capítulo um, contém a apresentação geral da pesquisa, isto é, abrangendo o resumo, introdução descrevendo a motivação (problemática), objetivos e justificativa.

No capítulo dois, está contido o referencial bibliográfico trazendo uma perspectiva sobre a temática e posterior embasamento científico.

No capítulo três, é apresentado a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa tais como: Métodos utilizados (técnicas aplicadas), materiais coletados (tipos de amostras) com suas respectivas procedências e os meios de análises dos dados da pesquisa em geral.

No capítulo quatro, constam os resultados obtidos, bem como a análise e interpretação dos dados gerados pelos ensaios tecnológicos em laboratórios guiados por Normas Técnicas Brasileiras – NBR's.

E, no capítulo cinco, está contida a conclusão com as devidas considerações finais sobre a análise dos resultados e o entendimento da aplicabilidade ou não dos agregados dessa pesquisa, em obras de pavimentação no Estado do Amazonas.

## CAPÍTULO 2

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 HISTÓRICO SOBRE A PAVIMENTAÇÃO NO ESTADO DO AMAZONAS

A malha viária no Brasil como um todo, encontra-se nas condições de regular a péssimo em relação as condições de trafegabilidade, isto é, os pavimentos possuem patologias tais como deformações permanentes, desagregação, trincas e fissuras, além de remendos deficitários e inadequados.

No estado do Amazonas, a situação rodoviária não difere muito dessa realidade, pois possui pavimentos com patologias graves, em especial, em seu revestimento de acordo com último relatório da CNT (2018). Essas deficiências podem estar correlacionadas a fatores típicos da região, como por exemplo, o elevado índice pluviométrico e as altas temperaturas em determinadas época do ano. Além disso, existem fatores como as questões técnicas, devido à ausência de material granular nas proximidades dos grandes centros construtores ou na escassez do conhecimento tecnológico dos materiais (agregados) que compõem a massa asfáltica nos revestimentos (CAVALCANTE et al., 2012).

Pinto Filho (2013) verificou os níveis de serventia das principais avenidas da capital Manaus (maior malha viária do estado e por consequência maior pólo consumidor de revestimento asfáltico) e chegou à conclusão de que as condições funcionais do revestimento apresentou valores muito aquém das especificações normativas com deteriorações muito precoces e presença de inúmeros remendos deficitários realizados com areia asfáltica usinada a quente – AAUQ classificando as texturas superficiais da camada de rolamento como baixa para aderência pneu-pavimento.

Cavalcante et al., (2012) identificaram que nos pavimentos da capital Manaus, em diversas localidades e com níveis diferentes de serviço e tráfego, há a existência de patologias prematuras principalmente naqueles com ausência de agregados graúdos na sua composição o que mostra a importância da aplicação dos mesmo em misturas asfálticas e sua influência no comportamento e durabilidade dos revestimentos. Ainda, Simas et al. (2015), explanou que as ruas e avenidas da cidade de Manaus por questões geotécnicas (longe das ocorrências e de extração de britas)

e financeiras (por serem mais barato devido a ocorrência de areias mais próximas), possuíram por muito tempo, pavimentos revestidos com misturas asfálticas do tipo AAUQ- (areia asfáltica usinada a quente), que aliado a fatores climáticos e técnicos, resultava em deterioração precoce.

Por fim constata-se por meio das narrativas dos autores Cavalcante et al., (2012), Pinto Filho (2013) e Simas et. al, (2015) e com base no relatório da CNT (2018) que a situação dos pavimentos rodoviários (rodovias, estradas, vicinais e ramais, ruas e avenidas) do estado do Amazonas é muito grave, pois apenas 1% desses enquadraram-se como ótimo, sendo que a maioria cerca de 85% foram classificados de regular a péssimo.

Isso, acaba se refletindo na economia e no desenvolvimento do Estado do Amazonas, uma vez que estradas e rodovias em condições ruins oneram as operações de transporte com aumento do consumo de pneus, combustíveis e manutenção dos veículos além da demora no percurso. Destaca-se que essa problemática vem longa data.

## 2.2 GEOLOGIA DO ESTADO DO AMAZONAS

A geologia do estado do Amazonas é caracterizada por uma extensa cobertura sedimentar fanerozóica, cujo seu território se distribui sobre as bacias de Acre, Solimões, Amazonas, Alto Tapajós e da Formação de Áter do Chão abrangendo-se também num pequeno setor sobre o Cráton Amazônico nos escudos das Guianas e Brasil central (Figura 1).



Figura 1. Mapa Geológico do Brasil em destaque o estado do Amazonas

O estado do Amazonas tem potencial extrativismo de minerais para a construção civil como argila, areia, seixo, silte e rochas ígneas, metamórficas e sedimentares com base em informações extraídas do relatório da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2016).

Em sua pesquisa Reis et al. (2006) verificaram que o solo do estado do Amazonas é caracterizado por sedimentos fanerozóicos que se situam em diversas bacias hidrográficas do Amazonas, Solimões, Acre e Alto Tapajós, estando estas sobre um substrato rochoso com ocorrência de rochas de natureza ígnea, metamórfica e sedimentar concluíram também que a região é formada rochas sedimentares (arenitos argilosos, argilitos, quartzo grauvacas e quartzo arenitos).

### 2.2.1 Características das áreas de extração dos materiais em estudo

Para melhor entendimento sobre a identificação e caracterização geoquímica, das propriedades tecnológicas (físicas e mecânicas) das rochas objetos dessa pesquisa é necessária uma breve e sucinta explanação sobre as características das unidades litoestratigráficas (geológicas) das áreas de extração dessas amostras.

A região de Moura no município de Barcelos a 405 km da capital Manaus, situada sobre a unidade geológica do complexo de Jauaperi com idade paleoproterozoicas, localizada a sudoeste da do Domínio de Uatumã-Anauá.

Nessa unidade ocorrem formações de rochas leucocráticas como os ortognaisses, migmatitos, metagranitos e granitos com presenças de minerais em grandes proporções como quartzo, feldspato potássio e menores como a biotita, biotita, hornblenda, titanita, opacos, clorita, apatita, alanita, zircão, calcita, sericita e argilominerais (RIKER et. al, 2016 e PERDIZ, 2009).

O município de Presidente Figueiredo distante 127km da capital Manaus, está situado nas unidades geológicas denominadas grupos de Mapuera, Prosperança e Água branca respectivamente na região nordeste do estado do Amazonas.

Nessas unidades há ocorrência de minerais ricos em  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Esses minerais são hornblenda, biotita ambos com cristalização tardia, clorita, muscovita, zircão, epídoto, opacos, k-potássicos e quartzos com ocorrência de sienitos, sienogranitos, monzogranitos e quartzos sienitos segundo os autores Roberto et. al, (2016) e Haddad et al., (2000), com predominância de granodioritos de hornblenda e biotita, monzogranitos, tonalitos, quartzo monzodioritos, quartzo dioritos, dioritos, granitos

que afloram nos rios da região noroeste do estado e, englobam sienogranitos, monzogranitos, quartzo-sienitos, monzonitos e granófiros com coloração rosáceas e acinzentados, sendo que os minerais acessórios mais comuns são titanita, epidoto, apatita, allanita e zircão. (RIKER et. al, 2016).

Nos municípios de Apuí e Japurá distantes 408km e 780km da capital Manaus respectivamente, estão situados a unidade geológica de Içá localizada, numa extensão desde região da Boa União percorrendo até a foz do Rio Solimões em sua margem esquerda e é caracterizada por ocorrência de arenitos argilosos, argelitos e conglomerados de seixos de quartzo depositados sobre a Formação de Solimões com idade pleistocênica.

Nessa unidade há ocorrência de depósitos de areia fina a média, argilosa, cinza média a escura, micromicácea extração dos seixos nas margens do rio Amazonas e nas adjacências do Arco de Purus e incluídos na Formação Içá (RIKER et. al, 2016 e SARGES, 2007).

### 2.2.2 Recursos minerais (agregados) do estado do Amazonas

Com produção de aproximadamente 1.200.000 m<sup>3</sup>/ano de agregados no ano de 2005 de acordo com autor Perdiz, (2009) e mais recente de 2.397.122 m<sup>3</sup>/ano em 2011 segundo Anuário Mineral Brasileiro da Agência Nacional de Mineração (ANM), seu maior polo consumidor é a Região Metropolitana de Manaus – RMM, sendo assim, sua demanda é elevada.

Face a isso, a CPRM e a ANM, órgãos reguladores e fiscalizadores da regional Manaus disponibilizaram o levantamento feito pela CPRM do potencial e disponibilidade geoquímica do estado.

Com base no relatório da CPRM os recursos minerais voltados para construção civil, em especial, os aplicados nos pavimentos rodoviários do estado foram catalogados com suas respectivas localidades de ocorrências, sendo esses recursos minerais a:

- Areias – Depósitos naturais e potencias nas calhas dos Rios Amazonas e Solimões localizados em Manaus, Presidente Figueiredo, Careiro da Várzea, Iranduba e Rio Preto da Eva;
- Argilas – Depósitos naturais localizados em Manacapuru, Presidente Figueiredo, Iranduba e Manaus;

- Rochas (Brita) – Depósitos naturais e potencias principalmente localizadas em Presidente Figueiredo e Barcelos, arenito Manaus e rochas graníticas de idade Paleo a Mesoproterozóica na região conhecida como cabeça do cachorro em São Gabriel da Cachoeira e,
- Seixo rolado – Depósitos naturais localizados Aripuanã, Japurá, Uatumã, Negro e Nhamundá.

A areia abundante no estado é composta basicamente por grãos de quartzo, sendo encontradas nos leitos dos igarapés sendo em geral fragmentos de rochas ou erosões devido a chuvas e ventos formando os arenitos encontradas em barras de canais fluviais.

Os seixos rolados provem de leitos ativos nos rios, extraídos comumente por dragas de sucção, são compostos basicamente de quartzo leitoso e sílex.

No Amazonas constantemente, a lavra desse material ocorre nos rios Solimões, Japurá, Negro, Nhamundá, Uatumã e Aripuanã.

O transporte desses grãos extraídos é por via fluvial em balsas, percorrendo grandes distâncias até a capital Manaus por exemplo, distante cerca de 1200 km em relação ao rio Japurá (GOUVÊA, 2001; RIKER et. al, 2016).

A brita, material granular mais utilizada na construção em geral, atualmente, é oriunda de três fontes de ocorrência distintas e de acordo com seus tipos de rocha tais como:

- ✓ Rochas sedimentares como o Arenito silicificado ou “Arenito Manaus” é do tipo rochoso e extraído nos arredores da cidade de Manaus e regiões com afloramentos nas unidades sedimentares Novo Remanso e Áter do Chão e no cenário geológico da capital a extração por questões ambientais está proibida (PALMA, 2014);
- ✓ Rochas ígneas vulcânicas, plutônicas como o sienogranito, metagranitos e riolitos ocorrentes no município de Presidente Figueiredo, com seis minas em atividade pertencentes as suítes Água Branca, Mapuera e Grupo Iricoumé(SOUZA, 2012).
- ✓ Rochas metamórficas como os Gnaisses, bem com as ígneas sendo o monzogranito, metagranitos e sienogranito encontrado no município de Barcelos denominado pedra do Gavião (PERDIZ, 2009). De acordo com Riker et. al, (2016) as ocorrências de material rochoso com potencial de aplicação para a construção civil e

obras de pavimentação no estado do Amazonas estão distribuídas em unidades geológicas conforme mostra a Figura 2.

✓

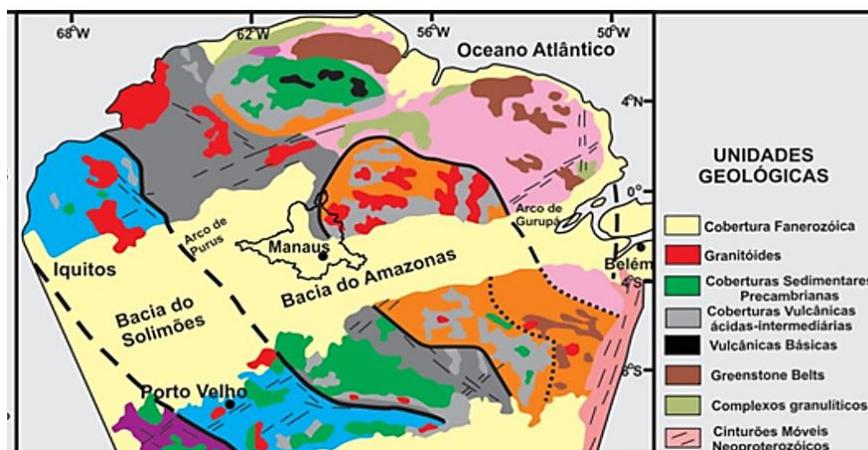


Figura 2. Unidades geológicas do Estado do Amazonas

Fonte: Riker et. al (2016)

Manaus, um dos maiores pólo consumidor de minerais para uso na construção civil, não dispõe de materiais pétreos sem um custo elevado pois, não possui jazidas de extração de brita em atividade por questões geológicas e/ou ambientais (MAAS e SOUZA, 2009) (Figura 3).

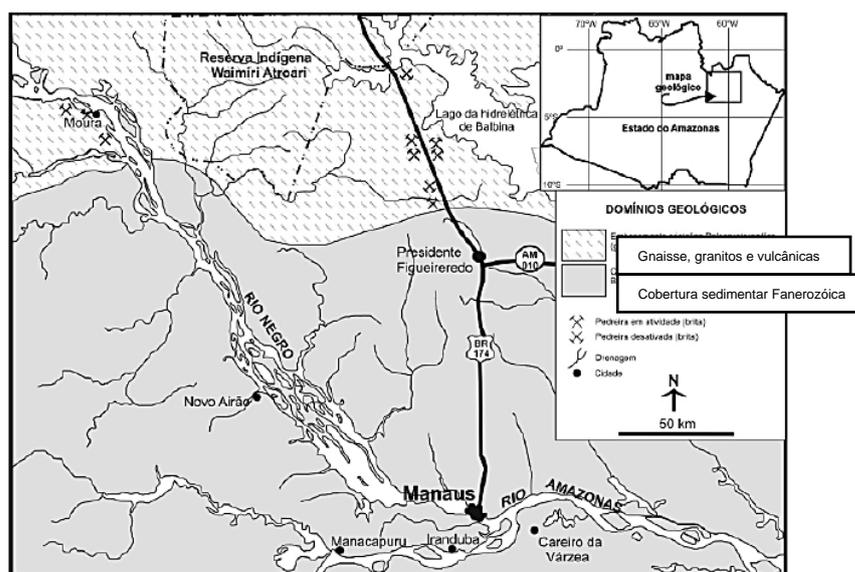


Figura 3. Mapa de extração de brita da RMM com exceção da capital Manaus.

Fonte: Maas; Souza (2009)

## 2.3 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Revestimento asfáltico é a camada final de um pavimento flexível com finalidade de: proteger as camadas subsequentes dos intempéries do clima, resistir às cargas inerentes do tráfego, transmitir de forma atenuada todas solicitações impostas ao pavimento para as demais camadas inferiores, melhorar as condições de rolamento, além de proporcionar conforto, segurança e durabilidade para a trafegabilidade (BALBO, 2007) e (SILVA, 2013). Cabe ao revestimento suportar as ações de cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer deformações excessivas elásticas ou plásticas, desagregação de componentes (agregados/ligantes) ou até a perda e redução da camada de compactação.

Par isso o revestimento deve ser constituído de materiais bem selecionados com grande potencial de ser aglutinados e que quando dispostos nas misturas possam evitar movimentos horizontais permanentes (SILVA, 2001). Em geral, os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados graúdos, miúdos, filler e ligante asfáltico. A associação desses materiais acaba por gerar uma estrutura compósita denominado concreto asfáltico (CA). O concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) é o mais amplamente utilizado em revestimentos de pavimentos. Ele é constituído por materiais tecnologicamente selecionados e dosados em processos desde a fabricação até a execução. Budny (2012) cita que misturas asfálticas são produtos resultantes de misturas entre agregados naturais, artificiais e/ou reciclados homogeneizados com cimento asfáltico de petróleo (CAP).

No revestimento, seus materiais constituintes devem ser dosados e selecionados para então originar uma estrutura que em condições de temperatura, granulometria entre outras características tenha condições de suportar as solicitações impostas. Dessa forma, uma mistura bem dosada e com os materiais adequados tecnicamente, resultam em pouca susceptibilidade a fissuração por fadiga, baixa deformação permanente e trabalhabilidade elevada.

## 2.4 AGREGADOS

Agregados são materiais granulares, geralmente, inertes, com dimensões, características e propriedades próprias. Sua aplicação na construção civil, se dá de forma variada em: argamassas, concretos, pavimentos e drenagens, podendo ser

areias, pedregulhos e rochas minerais em estado britado ou natural bem como as artificiais (PAZOS, 2015; MCGOVERN, 1994 e STAUDT, 2016 ).

Os agregados usados em misturas asfálticas devem, em geral, apresentar boas qualidades relativo à dureza, resistência, durabilidade, distribuição dos tamanhos de partículas, forma cúbica de preferência e porosidade baixa (PERDIZ, 2009).

Segundo Bernucci et al. (2008), todo pavimento e seu respectivo revestimento, é constituído pela associação entre o ligante e agregados e ou solo e agregado. Os agregados possuem o maior volume dentre os constituintes do pavimento, e por isso, suas características técnicas influenciam diretamente no seu comportamento e resistência final.

Nesse contexto, a caracterização é a melhor ferramenta para se conhecer e identificar os parâmetros físicos, mecânicos e a constituição da rocha, e como ela irá se comportar quando associado e no decorrer da vida útil do pavimento. Logo, a exploração qualitativa e quantitativa das características dos agregados é fundamental, uma vez que, as propriedades físicas como massa específica, massa unitária e composição granulométrica, tendem a influenciar de forma direta no consumo dos mesmos que irão compor e alterar as características do pavimento final (AMORIM et al., 2009).

#### 2.4.1 Classificação dos agregados graúdos

Em geral, os agregados utilizados em obras de pavimentação são divididos em três grandes grupos que são classificados segundo:

##### **A) Natureza.**

- Naturais:

São os obtidos de forma natural, por meio de desmonte, escavação e dragagem (depósitos naturais marinhos aquáticos). Exemplos de agregados naturais são as areias, seixo rolado de rios, pedregulhos e rochas.

Ainda essas rochas são classificadas segundo seu nível de pH, isto é, se um agregado é de rocha muito ácida, o mineral apresenta dificuldade de adesividade, já

as rochas classificadas como sendo básicas costumam apresentar melhor adesividade ao ligante asfáltico (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação de rochas de acordo com teor de sílica

<b>Classificação</b>	<b>Sílica %</b>	<b>Quartzo</b>	<b>Exemplo</b>	<b>Adesividade</b>
Ácida	>65	Presente	Granito, riolito, quartzito	Pouca ou nenhuma
Neutra	52 a 65	Pouco	Sienito	Boa
Básica	45 a 52	Raro	Basalto, gabro	Ótima
Ultrabásica	<45	Inexistente, feldspato escasso	piroxenito	Excelente

Fonte:Staudt (2016)

As rochas naturais são divididas em três grandes grupos em que cada um contempla uma gama diversificada de tipos rochosos dependentes da formação geológica o que reforça ainda mais a necessidade de deter o conhecimento de suas propriedades mineralógicas, composição química e tecnológicas sendo estas as rochas:

i) **Ígneas:** constituídas de minerais resfriados de material que se encontrava em estado líquido, por efeito de fusão em altas temperaturas, que, dependendo da profundidade, podem ser extrusivas, devido à erupção para a superfície, ou intrusivas, quando seu resfriamento é no interior da crosta, e plutônicas, quando em grandes profundidades (FRAZÃO, 2007).

A maioria das rochas com alto teor de sílica (silicosas) como, por exemplo, os arenitos, o quartzo e o cascalho, são negativos em cargas elétricas, quando na presença de água.

Ainda as rochas ígneas ácidas contem muito silício na forma de óxidos(sílica), geralmente no formato do mineral quartzo, onde esse confere maior dureza às rochas e, conseqüentemente, maior resistência ao desgaste tanto ao esmagamento quanto a degradação por atrito.

ii) **Sedimentares:** em geral, são menos resistentes que as ígneas, pois, são oriundas de sedimentos de fragmentos de rochas depositados e consolidados por altas pressões de sobrecarga e ou cimentação, por processo químico e são em geral clásticas ou detríticas. Exemplos de rochas sedimentares são os arenitos, siltos e argilitos, além das sedimentares químicas como os calcários.

iii) **Metamórficas:** são originadas de rochas existentes através da modificação (recristalização de minerais modificando sua textura, estrutura e condições mineralógicas sobre ações de agentes do metamorfismo como pressões e temperaturas e ações de fluidos, como exemplo desse tipo de rochas temos os filitos, ardósias, xistos, mármore, gnaisses e quartzitos (FRAZÃO, 2007).

Os principais minerais constituintes das rochas em geral são os quartzos, feldspatos, micas, piroxênios, anfíbolitos, feldspatóides, olivina, calcita, dolomita e argilominerias. A Tabela 2 cita alguns tipos de rochas naturais mais comumente utilizados em obras de engenharia civil e de pavimentação como agregados.

Tabela 2. Tipos de rochas usados como agregados em obras de pavimentação

<b>PETROGRAFIA</b>	<b>DESCRIÇÃO DA ROCHA</b>
Andesito	Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina
Basalto	Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita ou biotita
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina
Gnaisse	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica
Sienito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita ou augita
Traquito	Variedade de Sienito de granulação fina, usualmente vulcânico

Fonte: Adaptado de (Bernucci, 2008; Frazão, 2007)

- **Artificiais:** São os constituídos dos resíduos industriais, ou fabricados especificamente de acordo com objetivos de alto desempenho, onde os mais utilizados são os derivados de vários tipos de escórias e subprodutos da indústria de aço e dependem de um tratamento adequado, pois, possuem diversos tipos de problemas de heterogeneidade, expansão volumétrica, etc.

- **Seixos:** São compostos por diferentes rochas ou mesmos diferentes níveis dentro destas mesmas rochas, a porção predominante dos seixos é de rocha vulcânica, principalmente, basaltos (FILASCO, 2006).

- Rochas recicladas e sintéticas: São agregados oriundos de fontes de geração como pedreiras, poços no solo e leitos dos rios (seixo, areia) e da indústria da construção civil e são compostos por fragmentos de rocha, cascalho, pedra e areia, que podem ser triturados, lavados e dimensionados conforme sua aplicação (ATHENS, 2011).

## **B) Textura.**

De acordo com a norma DNIT 031/2004 – ES, os agregados para utilização em pavimentação são classificados pelo seu tamanho dos grãos como graúdo, miúdo e material de enchimento (*filler*).

- Agregado graúdo: material com dimensões  $> 2,0$  mm, retido na peneira nº 10 que em geral são as britas, seixos e pedregulhos, cujos parâmetros a possuir são: Boa durabilidade, superfície rugosa, formas uniformes (cúbicas de preferência), ausência de argila e matéria que possam contaminar a mistura, índices de desgaste por abrasão  $\leq 50\%$  e por fim uma boa aderência;

Ainda a NBR 9935/2005 define o agregado graúdo como a porção que passa pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm e podem ser divididos em granulometrias denominadas de:

- ✓ Pedra 0: dimensão varia entre 4,5 e 9,5 mm, aplicado em lajes, brita graduada para base de pista de pavimentos e etc.;
  - ✓ Pedra 1: dimensão varia entre 9,5 e 19 mm, aplicada em massa asfáltica, estruturas de ferragem densa, lajes pré-moldadas;
  - ✓ Pedra 2: dimensão varia entre 19 e 32 mm, aplicada na confecção de concretos em geral e em drenagens;
  - ✓ Pedra 3: dimensão varia entre 25 e 38 mm, aplicada em reforços de subleito para pistas de tráfego pesado e lastros de ferrovias e,
  - ✓ Pedra 4: dimensão varia entre 25 e 76 mm, aplicado em reforço de subleito de pistas com tráfego pesado, gabião, fossas sépticas e sumidouros.
- Agregado Miúdo: material com dimensões  $> 0,075$  mm e  $< 2,0$  mm, retido na peneira de nº 200 e passante pela peneira de nº 10. Em geral são as areias, o pó de pedra etc. e,

- Material de enchimento (fíler): material onde pelo menos 65% das partículas são  $> 0,075$  mm, correspondente à peneira de nº 200. Em geral são a cal hidratada, cimento Portland e atualmente, o pó de pedra.

O tamanho máximo do agregado em uma mistura asfáltica pode afetar o desempenho dela de diversas formas. Pode torná-las muito estável quando tem em sua composição agregados com tamanhos muito pequenos, que podem reduzir e prejudicar a trabalhabilidade da mistura ou a segregação de material nas misturas com agregados com tamanhos excessivamente grande. Logo, a norma ASTM C 125, define o tamanho máximo de agregados de 2 (duas) formas:

- Tamanho máximo: é o tamanho imediatamente maior que o correspondente ao tamanho nominal máximo e,
- Tamanho nominal máximo: é a maior abertura de malha de peneira que retém alguma partícula de agregado, mas não mais de 10% em peso.

### C) Distribuição dos grãos.

A distribuição granulométrica (Figura 4) é uma característica física de suma importante para as misturas asfálticas e se subdivide em graduações, e auxilia na distinção de tipos de misturas asfálticas e suas características e graduações.

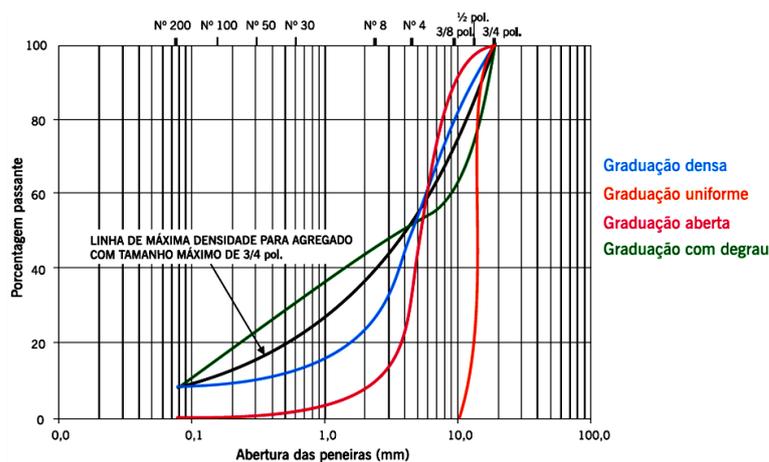


Figura 4. Curvas granulométricas convencionais dos agregados

Fonte: Bernucci (2008)

Agregados de graduação densa ou bem graduada são os que apresentam uma distribuição granulométrica contínua, ou seja, possui grãos de todas as

dimensões. A graduação aberta é a que apresenta uma distribuição granulométrica contínua, mas, com insuficiência de material fino, gerando um maior índice de vazios, pois a falta desse material fino acaba por não preencher os vazios entre os materiais maiores.

A graduação uniforme são os que apresentam distribuição granulométrica com maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita, ocasionado uma curva íngreme, sem presença de grãos, deixando a mistura aberta, sem uma determinada faixa de grãos. E agregados de graduação descontínua ou com degrau são os que apresentam uma descontinuidade na sua composição granulométrica, ou seja, há uma insuficiência de grãos com dimensões intermediários.

A distribuição dos grãos é uma das mais importantes características, pois tem grande influência no comportamento nos pavimentos, principalmente nos revestimentos asfálticos. A característica granulométrica, pode influenciar propriedades importantes do revestimento asfáltico como a rigidez, durabilidade, estabilidade, trabalhabilidade, permeabilidade, deformação e resistência a fadiga (BERNUCCI, 2008).

Os procedimentos do ensaio de granulometria dos agregados são descritos na norma NBR NM 248/2003 e os resultados são expressos em gráficos e tabelas.

## **2.5 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS AGREGADOS**

O desempenho regular de um agregado quando em serviço, depende da sua composição geoquímica e das propriedades físico-mecânicas. Informações sobre a formação, estrutura mineral, composição química, sua tendência à degradação, granulação e forma de desgastes quando submetidas às tensões de tráfego, acaba por contribuir na melhor e mais apropriada aplicação de forma racional dos agregados.

Staudt (2016) cita que, certas propriedades dos agregados dependem totalmente da sua composição química e mineral como a massa específica, resistência, alterabilidade, estrutura, porosidade e coloração, outras não tanto, como a forma e dimensão das partículas, textura superficial e absorção.

A variedade de agregado é relativamente vasta, contudo, a utilização inadequada com suas características específicas, acaba por inviabilizar ou reduzir as propriedades da matriz ao qual está inserido. Para que um pavimento e seu respectivo revestimento asfáltico tenham um comportamento tido como satisfatório, seu

desempenho deve ser durável e resistente. Para isso, é necessário que seus maiores constituintes (agregados) estejam em harmonia granulometricamente, e em proporções definidas e unidas por ligante asfáltico.

Sendo assim, é explícito a necessidade de se ter informações técnicas sobre os agregados pois, quanto maior for, melhor será o desempenho do pavimento como um todo, visto que, sua estrutura complexa com diferentes variáveis (técnicas, dimensionamento, matérias, cargas e ambiente) afetam de forma direta a durabilidade, além de serem a maior porção em massa na composição (BERNUCCI, 2008 e FILHO, 2013).

As propriedades físicas dos agregados são as que o definem, isto é, como será sua aplicação. As características químicas, estas possuem um fator determinante, em menor escala do que as físicas, exceto, quando passa a afetar a adesividade agregado-ligante.

Dessa forma, a caracterização tecnológica de agregados é obtida através de ensaios de determinação dos parâmetros físico, sendo os mais relevantes para aplicação em pavimentos, a análise granulométrica, o índice de formas, a massa específica (real e aparente), a massa unitária (solta e compactada), os teores de umidade, argila e material pulverulentos, torrões de argila, a porosidade, a absorção, a adesividade e degradação química (sanidade).

Os parâmetros mecânicos são obtidos por meio de ensaio de degradação por abrasão Los Angeles, impacto no aparelho Treton, esmagamento e 10% de finos.

## **2.6 APRECIÇÃO PETROGRÁFICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

A caracterização mineralógica das rochas (agregados) é obtida, através de análises ópticas no ensaio de petrografia e litológica com a técnica de difração de raios-X (DRX). Diversas características dos agregados como a porosidade, composição granulométrica, absorção, teor de umidade, índice de forma, textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e substâncias deletérias, que compõem a rocha estão diretamente ligadas, à composição mineralógica e química da rocha matriz.

Essas propriedades estão sujeitas às condições de exposição de pressão e temperatura, cuja rocha foi submetida, antes de ser transformada em agregado britado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A composição química das rochas (agregados) é obtida por meio de análise de fluorescência de raios-X (FRX), de forma quantitativa dos elementos químicos maiores e menores.

## 2.7 CORRELAÇÃO E INFLUÊNCIA ENTRE AS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS E MINERALÓGICAS DOS AGREGADOS

Tabela 3. Correlações entre os resultados dos ensaios de caracterização tecnológicas (física e mecânica) com a composição química e mineralógicas dos agregados graúdos.

Parâmetros	Composição Mineralogia	Composição Química	Mecânicos	Físicos
<b>Ensaio</b>	<b>Influência exercida</b>			
Índices de forma	x		x	x
Granulometria			x	
Massa específica	x		x	x
Absorção			x	x
Teor de material pulverulento				x
Teor de argilas	x			x
Teor de umidade				x
Porosidade			x	x
Massa unitária	x			
Adesividade		x		x
Degradação química	x	x		x
Resistência a impacto Treton	x			x
Resistência ao esmagamento	x			x
10% finos	x			x
Abrasão Los Angeles	x			x

x= influência significativa nos resultados

Fonte: Adaptado de Back (2018)

Na tabela 3 está contida a correlação de influência entre parâmetros tecnológicos e mineralógicos dos agregados, isto é, uma característica física pode justificar um comportamento mecânico, por exemplo, seja de maneira positiva ou negativa.

Isso demonstra a importância de uma correlação, haja vista que, uma análise conjunta dos resultados, gera um maior entendimento e mais preciso das características do agregado e de seu comportamento.

A) Índice de forma:

O índice de forma, classifica os agregados quanto a esfericidade dos grãos, cujo índice varia de zero a um. Com base nisso, o agregado é considerado bom, quando possuir valor  $\geq 0,50$ .

A forma do grão afeta os índices volumétricos e o desempenho de revestimento asfáltico, por exemplo, influenciando parâmetros como a trabalhabilidade e deformação permanente. Parâmetros físicos como granulometria e os mecânicos de abrasão Los Angeles, esmagamento, aparelho Treton e 10% de finos, também são afetados pela forma dos grãos, no caso do primeiro, afeta a resistência da mistura e nos demais a resistência a degradação.

A aplicação de agregados muitos alongados e lamelares na composição do pavimento e em massas asfálticas, acaba por reduzir a trabalhabilidade, e colaborando no aparecimento de patologias, em função, da quebra dos grãos durante a compactação e ou no decorrer do tráfego de veículos (FERNANDES, 2005).

Grãos com características lamelares, alongadas e convexas possuem maior facilidade de desagregação quando submetida a choque mecânico (MEURER, 2015).

Cunha et al., (2004) e Masad et al. (2002) destacam as limitações quanto ao uso de agregados alongados e lamelares, devido a facilidade de fraturarem sob ação do tráfego. No decorrer da análise do índice de forma, é identificado também os parâmetros de esfericidade e a angularidade, cujos valores obtidos determinam o grau de contato entre os grãos internamente.

Esse contato, na presença grãos com arestas e cantos lamelares acaba por proporcionar um intertravamento interno, conferindo assim, a mistura uma maior estabilidade, dando origem a uma estrutura rígida menos suscetível a deformações permanentes (CUNHA et al, 2004).

Características como a composição mineral e o tipo de britamento, métodos e equipamentos aplicados são fundamentais na forma final do grão (HICKEL et. al, 2018).

B) Composição granulométrica:

A composição granulométrica dos grãos é muito importante, isto é, através dela que se pode classificar as partículas de acordo com cada fração em pesos retidos em seus respectivos tamanhos.

Essa análise caracteriza a distribuição, em geral, expressa em porcentagem e denomina-se graduação do agregado. Ela é concebida pelo peneiramento das

partículas, através de um conjunto de peneiras, com aberturas progressivamente da maior para a menor pesando-se cada fração do material, retido em cada peneira (SILVA, 2006).

Para Roberts et al. (1996); Para Chang (2004) e Cunha et. al (2014) uma mistura bem graduada granulometricamente, consiste em uma estrutura densa, isto é, os arranjos das partículas estão bem distribuídos formando assim, uma estrutura estabilizada, obtida através de uma máxima densidade e do maior contato das partículas. Essa distribuição bem graduada proporciona índices de vazios baixos com espaços suficientes para a incorporação do ligante asfáltico, no caso de revestimentos em dosagem Marshall.

A propriedade granulométrica dos agregados, exerce uma significativa influência na rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga, resistência por atrito e no dano por umidade tanto das camadas do pavimento, e principalmente, em misturas asfálticas (BERNUCCI et. al, 2008).

A composição granulométrica tem influência direta no desempenho físico-mecânico da mistura asfáltica pois, à medida que o DMC e MF forem muito baixo, isto é, agregados com tamanho de partículas muito pequenas haverá instabilidade mecânica. Em geral, misturas compostas por agregados com diâmetro máximo característico (DMC) elevado tendem a consumir pouco ligante asfáltico, pois, quanto maior o tamanho da partícula, menor será sua área superficial a se recoberta pelo aglomerante (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Ainda Ahlrich (1996) afirma que a deformação permanente dos revestimentos asfálticos é influenciada pela granulometria na dosagem asfáltica. Stakston e Bahia (2003) enfatizam que, além disso, a angularidade também é influente no conjunto.

Galalipour et al. (2012) e Paiva (2017) citam que através da granulometria adequada que se obtém um bom intertravamento das partículas, não somente isso, mais com a proporção adequada de ligante. Partículas demasiadamente grandes haverá uma redução da trabalhabilidade, um aumento da permeabilidade, alta probabilidade de segregação dos componentes e a necessidade de carga de compactação alta.

Essa proporção inadequada, influencia na não coesão entres as partículas (atrito interno), visto que, há uma redução do contato entre os grãos, ocasionando perda da capacidade de armazenarem de energia das misturas asfálticas, propiciando

assim, o aparecimento de deformações permanentes, diminuição da resistência mecânica e no aumento do dano por fadiga do pavimento como um todo.

Fatores como o processo de britamento, tipo e modo de manipulação, transporte, armazenamento, produção das misturas, espalhamento e compactação durante a execução da camada de revestimento podem também afetar a granulometria inicial e o desempenho do produto final (revestimento).

Aire et al. (2008) citam que misturas abertas, ou seja, com ausência de determinadas frações de grãos tendem a ter uma maior degradação de seus agregados quando comparadas com as misturas densas que possui uma granulometria linear, isto é, contendo frações bem distribuídas.

#### C) Massa específica e absorção:

A massa específica de agregado graúdo é um parâmetro fundamental para a dosagem de misturas mineral, de modo geral, pois, por meio dela, obtém-se a quantidade em massa. Também, através da massa específica, em conjunto com o índice de absorção, uma correlação referente à sanidade (grau de degradação por soluções), pois, rochas alteradas tendem a apresentar massa específica inferiores às rochas no estado sã (PERDIZ, 2009).

Com relação ao índice de absorção de um agregado, esse parâmetro consiste na avaliação do aumento da massa do agregado devido aos poros permeáveis à água, ou seja, quanto maior índice de absorção mais poroso será o agregado.

Esse parâmetro, tem grande relevância e importância em relação ao consumo ligante asfáltico, e nos parâmetros volumétricos no ato de dosagem de misturas asfálticas pelo método Marshall (CABRAL, 2017).

#### D) Teor de material pulverulentos:

Agregados com partículas muito finas, ou seja, com teores altos de material pulverulentos acaba por prejudicar a aderência entre o ligante/agregado. O aumento do consumo de ligante, se dá devido as partículas muito menores terem superfície específica elevada, o que resulta na diminuição do contato do aglomerante com os grãos dos agregados em si (PERDIZ, 2009).

Com teor elevado de finos (pó) em misturas asfálticas, há uma tendência em obter uma melhora na trabalhabilidade até determinado ponto, acima de um determinado teor na mistura a trabalhabilidade é prejudicada, bem como a estabilidade do esqueleto mineral, devido à falta de contato entre os agregados maiores devido a formação de uma película, que impede a interação grão-a-grão, alterando também a capacidade de compactação da mistura.

Ainda com relação às partículas em pó, as com dimensões superiores a 0,040 mm atuarão como preenchimento de vazios entre os agregados graúdos e miúdos do esqueleto mineral da mistura, já as inferiores a 0,020 mm atuarão no ligante formando um filme denominado mástique.

Em certos agregados os minerais de determinadas rochas podem reagir com certas substâncias do meio que os envolve, sendo externo ou internos e, quando isso ocorre, fica caracterizada a propriedade de reatividade (ISAIA, 2007).

A presença elevada de finos pode conter partículas de argila como o silte e o pó-de-pedra na forma de películas superficiais que também influenciam no aumento do consumo de água, visto que há o aumento da área superficial dos grãos afetando trabalhabilidade dosada para tal finalidade e a ligação entre os agregados graúdos e miúdos (COELHO, 2009).

#### E) Teor de argila:

Segundo Perdiz (2009) substâncias deletérias como torrões de argila, partículas friáveis, material pulverulento e impurezas orgânicas podem afetar adversamente a trabalhabilidade, a pega, o endurecimento e as características de durabilidade.

Certas substâncias argilosas podem ter características deletérias, o que pode comprometer algumas propriedades em geral, sendo em geral, as mais comuns a argila, o silte e o pó de pedra (NEVILLE, 1997).

#### F) Teor de umidade:

O parâmetro de teor de umidade tem grande influência no surgimento de patologias do tipo panela e desagregação (CAVALCANTE et. al, 2012). Furlan et al. (2004) sua pesquisa, demonstrou que agregados mais porosos absorveram mais ligante. Essa absorção elevada de ligante, contribui para perdas maiores na resistência mecânica em CA, quando na presença de umidade, isto, pode ser

explicado, devido haver redução da espessura do filme de ligante em torno do agregado (partícula), evidenciando assim, danos causados pela umidade.

G) Índice de porosidade:

O índice de porosidade pode informar qual a intensidade de intemperismo ocorrido nos minerais primários, visto que, quanto mais poroso for, maior será seu grau de alteração. Para Monticeli et. al (2016), a porosidade dos minerais está ligada com o grau de alteração dos minerais constituintes da rocha, e se divide em grupos denominados de A1, A2 e A3.

No A1, o estado dos minerais são poucos alterados, onde a maioria dos minerais principais estão no seu estado são. No A2, o grau de alteração é descrito como mediano, pois, os minerais formadores da rocha possuem algum tipo de alteração evolutiva físico-químico. Já o A3, é tido como muito alterado, com um estágio muito evolutivo de alteração físico e físico-químico.

O índice de porosidade no grupo A1 de alteração, ocorre através de fissuras intraminerais (contorno), que são associadas a granulometria dos minerais e fissuras do tipo transminerais (interno), associada à sua fratura, promovendo assim, um maior contato dos agentes que ocasionam o processo de intemperismo dos minerais primários. Nesse grau de alteração tem-se o início de uma alteração, em que a porosidade dos minerais pode variar entre 0,2 % a 1%.

No grupo A2, a porosidade torna-se secundária, com formação de poros e fissuras variáveis de acordo com a presença e estágio de alteração dos alteromorfos. Neste o grau de alteração e a espessura das fissuras intramineral e transmineral são maiores, acarretando em uma porosidade maior entre 1 a 3%.

Já no A3, todos os minerais principais estão sob processo de alteração com a pinitização, colorização, saussoritização e sericitização. Esses processos promovem a decomposição dos minerais principais e acúmulo de argilominerais e óxidos e/ou hidróxidos de ferro, gerando assim, a desagregação desses minerais, originando uma cadeia de fissuras e vazios intraminerais e intersticiais, proporcionando uma porosidade nos intervalos de 3 a 7%.

H) Massa unitária (solta e compactada):

A massa unitária influencia na dosagem, no volume e no consumo, no ato da elaboração dos traços em relação a massa do agregado e o volume por ele (COELHO, 2009).

Autores como Basílio (1995); Frazão (2007); Mehta; Monteiro (2008), classificam os agregados quanto a sua densidade em:

- i. Pesados - como a barita, magnetita e escória, com massa unitária superior a  $2,080 \text{ kg/m}^3$ ;
- ii. Normais - pedra britada, areias, pedregulho e seixo-cascalho, com massa unitária  $2,080 \text{ kg/m}^3$  e  $1,120 \text{ kg/m}^3$  e,
- iii. Leves - como a argila expandida e vermiculita, com massa unitária inferior a  $1,120 \text{ kg/m}^3$ .

l) Adesividade e dano por umidade induzida:

A adesividade, juntamente com o parâmetro de dano por umidade consistem numa análise do comportamento das partículas quando cobertas por ligante asfáltico, e a interação entre ambos, em termos de desempenho adesivo e coesivo das misturas sob a ação da água (CERATTI e REIS, 2011).

O efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Esse agregado inaceitável é denominado de hidrófilo. Agregados silicosos, como o quartzito e alguns granitos, são exemplos de rochas que requerem atenção quanto à sua adesividade ao ligante asfáltico.

A adesividade nos concretos asfálticos é considerada como uma das fundamentais entre todas as propriedades dos agregados, pois é ela quem garante a união entre o ligante e o agregado, quando expostos a condições adversas de solicitações, tráfego e de umidade. De acordo com a definição feita por Pinilla (1965), a resistência que oferece ao ligante o afastamento do corpo sólido é definido como aderência.

Neves Filho *et al.* (2007) consideraram que os problemas concernentes à falha de adesividade estão sempre relacionados à presença e ação da água. Agregados com alta adesividade, em presença de água são denominados hidrofóbicos, e são aceitáveis para utilização em misturas asfálticas.

Alguns ligantes são compostos por hidrocarbonetos e grupos funcionais polares, os agregados, por sua vez, tem superfície heterogênea de cargas elétricas com diferentes composições químicas, e níveis de atividade.

Com isso, o contato entre os sítios ativos do agregado e o ligante fazem com que os grupos polares do ligante se liguem à superfície heterogênea dos agregados, através de forças eletrostáticas, pontes de hidrogênio e ou forças de Van der Waals (CURTIS *et al.*, 1993).

Esses grupos funcionais dos sulfóxidos e os ácidos carboxílicos tendem a ter uma afinidade mais elevada com os agregados, mas, suas deficiências estão em serem dissolvidos quando na presença de água, já os fenóis e as bases nitrogenadas garantem uma adesão (LITTLE; JONES, 2003).

A redução da resistência à compressão simples é a indicação da qualidade do agregado, em relação à adesividade. Essa relação de perda de resistência pelo efeito da água é dada pela razão entre a resistência confinada (RC'), pela não confinada (RC), ou seja,  $RC'/RC$ . Para que se considere aceitável, essa relação deve ser superior ou igual a 75%, ou seja, a perda por dano causado pela umidade induzida nas misturas asfáltica compactadas, deve ser menor ou igual a 25%, da resistência sem o dano induzido.

#### J) Degradação química – sanidade:

Certos tipos de agregados podem, inicialmente, apresentar boas características de resistência, mas podem sofrer processos de desintegração química quando expostos às condições ambientais no pavimento.

Essa característica de resistência à desintegração química é identificada em ensaio em que o agregado é atacado com solução saturada de sulfato de sódio ou de magnésio, com intuito de acelerar e aumentar a desintegração, simulando o efeito do tempo quando submetidos aos intemperismo em serviço (BACK, 2015).

Em geral, agregados com presença de constituintes nocivos, como alguns argilominerais, tendem a degradar quimicamente o ligante e o próprio mineral. Diversos minerais podem ser alterados por intemperismo do tipo oxidação, hidratação e lixiviação (Bernucci *et. al.*, 2008):

Frasca (2003) cita que os principais tipos de intemperismo das rochas são a oxidação e a hidrólise, cujos fatores causadores são o clima (temperatura, umidade do ar, ventos, pressão atmosférica e precipitações), os poluentes presentes na

atmosfera e a ação de cristalização de sais, sendo este último o mais influente e agressivo em meio poroso, ocasionando a perda de coesão entre os grãos dos minerais. Essa degradação será maior e mais efetiva, dependendo do fator pressão de cristalização dos sais (separação), sendo depende do grau de saturação e do tamanho dos poros, isto é, dos índices de absorção, porosidade e teor de umidade.

K) Resistência mecânica:

Uma das características mais importantes, no que diz respeito às propriedades físicas e mecânicas, é a resistência das rochas utilizadas como agregado. Essa característica depende da mineralogia, textura, da composição química e do grau de alteração das rochas, bem como da sua granulometria (MOORE; GRIBBLE, 1980).

A propriedade em resistir à degradação dos agregados é obtida pelo ensaio de abrasão, no equipamento denominado máquina de abrasão Los Angeles. Esse ensaio é aplicado aos agregados quando se quer conhecer e medir sua resistência, quando submetido à abrasão por atrito (KANDHAL; PARKER, 1998).

O ensaio de abrasão Los Angeles (NBR NM 51/2001) consiste no processo em que as partículas são submetidas a processos de degradação abrasiva, impacto e trituração, gerando redução da granulometria e mudança de forma por meio de trincamento internos, o que acaba sendo um teste de avaliação da resistência (ROGERS, 1998).

Essa resistência ao desgaste por abrasão é importante pelo fato de as partículas dos agregados sofrerem alteração em suas texturas superficiais, na sua graduação e perda de massa (SOARES, 2005).

Além do ensaio de resistência ao desgaste por atrito de abrasão, existe a quantificação de resistência em relação à perda de massa pelo choque e ou impacto, conforme descrito na DNER-ME 399/99.

A resistência ao impacto visa o quanto o agregado fragmentado pode a vir a prejudicar a mistura asfáltica (BERNUCCI et al., 2008).

A textura superficial do agregado deve ser observada onde indícios de uma alteração nessas superfície influência de forma negativa nas propriedades do concreto asfáltico, por exemplo, um caso típico é a caulinação dos minerais de feldspato existentes na rocha, que pode diminuir a ligação entre os grãos e o ligante, como pode ser visto nos granitos (BACK, 2015; CHIOSSI, 2013).

Ainda, Back (2015) cita que em uma rocha, quanto menor for a dureza de seus minerais constituintes, mais desgastável será, além do grau de compactidade da rocha também ser baixo.

O ensaio de determinação da resistência ao esmagamento dos agregados graúdos avalia o desempenho do agregado, em relação ao desgaste pelo atrito interno, simulando a compressão imposta pelos rolos compactadores, aos agregados durante a construção, e posteriormente, através do tráfego de veículos.

Para que um agregado seja considerado como satisfatório, as propriedades mecânicas devem estar dentro dos limites estabelecidos em norma conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Valores limites a serem obtidos após realização dos ensaios físico-mecânicos de Abrasão los Angeles, Esmagamento, 10% finos e Aparelho Treton.

<b>Método de ensaio</b>	<b>Valores limites satisfatórios</b>
DNER-ME 35/94 ou NBR NM 51/2001 – Agregado – determinação da <b>Abrasão Los Angeles</b>	LA ≤ 50%
DNER-ME 399/99 – Agregados – determinação da perda ao choque no Aparelho Treton	AT ≤ 50%
DNER-ME 96/98 – Agregado graúdo – avaliação da resistência mecânica pelo método dos <b>10% de finos</b>	10% finos ≥ 60kN
DNER-ME 197/97 ou NBR 9938/2013 – Agregados – determinação da resistência ao <b>Esmagamento</b> de agregados graúdos	E ≥ 60

Fonte: Adaptado de Bernucci et. al (2008)

#### L) Composição química e mineralógica:

Para Maciel Filho e Nummer (2014), a estrutura e textura dos agregados são características que podem definir sua anisotropia, promovendo assim, uma possível concepção da sua resistência mecânica. Essa resistência está ligada com a distribuição dos minerais, isto é, ela varia conforme a estrutura e o arranjo. A composição mineralógica e química dos agregados graúdos, podem afetar de forma relevante certas propriedades físicas e mecânicas, isto é, pelo simples fato, de se uma rocha é ácida, básica e ultrabásica, com base no teor de sílica (SiO<sub>2</sub>), ocorrer uma ligação química ineficiente com o ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2008 e MENEZES, 2013).

De acordo com Perdiz (2009), o prévio conhecimento petrográfico visa obter o conhecimento sobre as características das rochas. Esse conhecimento é obtido por meio de identificação da:

- composição mineralógica, isto é, quantificar os minerais essenciais, acessórios e secundários;
- textura relativa à forma e ao arranjo dos minerais;
- estado de alteração dos minerais;
- estrutura dos arranjos macroscopicamente e,
- grau e tipo de microfissuração, se são intercristalina ou intracristalina, fissuras abertas ou preenchidas.

Rohden (2011) cita que a textura superficial de um determinado grão depende, basicamente, da dureza, granulação e das características dos poros das rochas que a originou, onde essa textura se classifica em:

- i. Vítrea: com fratura conchoidal típica de rochas do tipo calcedônias e escórias;
- ii. Lisa: com fraturas demonstrando grãos mais uniformes mais ou menos arredondados como os grãos sedimentares, ardósias, mármore e riolitos;
- iii. Granulosa: com fraturas, cujos grãos apresentam-se mais uniformes mais ou menos arredondados como os arenitos, olitos;
- iv. Ásperas: com fraturas ásperas de granulação finas ou grosseiramente granulares com cristais não visíveis com facilidade como os basaltos, felsitos e o calcário e,
- v. Cristalina: fratura com grãos não uniformes com constituintes cristalinos facilmente visíveis como os granitos, gabros e gnaisses.

A composição química da rocha é importante, pois, é possível identificar e quantificar os minerais presentes na rocha, e classificá-las previamente, como ultrabásica, básica, intermediária ou ácida, através do teor de  $\text{SiO}_2$  (sílica) presente. A presença de óxidos ferrosos pode demonstrar uma possível desintegração por intemperismo desses minerais, ou seja, a ausência ou baixa presença proporciona uma elevada resistência a degradação química por intemperismo da rocha (BACK, 2015). O óxido de sílica, geralmente, aparece como quartzo (não somente ele), e esse mineral possui classificação de dureza 7,0 na escala de Mohs. Na maioria dos casos, o quartzo acaba por conferir uma maior resistência para rocha, dando a ela um menor índice de desgaste (FRAZÃO, 2007). Elementos químicos como óxido de potássio

(K<sub>2</sub>O) e óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) são mais suscetíveis. Os níveis elevados de alcalinidade ocorrem com aumento das hidroxilas (OH), que são responsáveis pela reação (álcali-agregado), devido serem solúveis em meio aquoso (sulfatos de sódio-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e cloreto de sódio-NaCl). Essa característica é comum em rochas como argilitos (sedimentar), gnaisses (metamórficas) e granitos (ígneas) (MIZUMOTO, 2009). Rochas graníticas são conhecidamente de natureza áspera, enquanto que seixos apresentam superfícies lisas (PAIVA, 2016).

## CAPÍTULO 3

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os procedimentos dessa pesquisa são baseados na caracterização tecnológica e na composição mineral de agregados graúdos do tipo pedra britada e seixo rolado. Essas características são as que determinam a aplicação dos agregados em obras de pavimentação. Os métodos aplicados foram ensaios tecnológicos, feitos em laboratórios com intuito de identificar as propriedades físicas e mecânicas, bem como, a composição mineralógica das rochas, visando sua aplicabilidade de forma racional e simétrica com suas características individuais em pavimentos rodoviários no estado do Amazonas.

Na Figura 5, está o fluxograma com as etapas e procedimentos metodológicos aplicados na pesquisa, iniciando-se na coleta de seis amostras de agregados, sendo quatro de brita e duas de seixo rolado, seguido de uma redução dessas amostras de campo, ensaios tecnológicos e análise dos resultados, sendo que esse último, será confrontado frente aos parâmetros normativos vigentes.

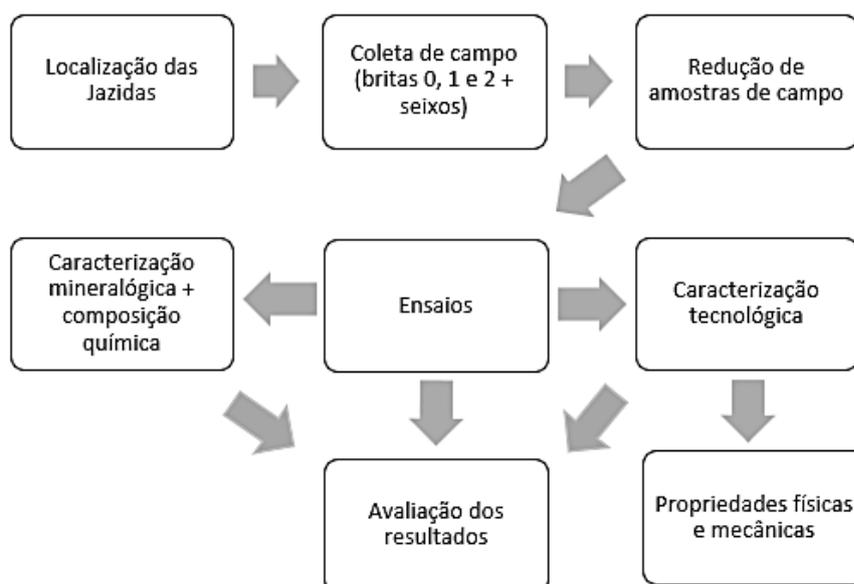


Figura 5. Fluxograma dos procedimentos metodológicos da pesquisa.

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 Agregados graúdos

Os materiais dessa pesquisa, consistem em amostras de brita e seixo rolado coletadas e identificadas (com nome, origem, data, horário e local de coleta), acondicionadas em sacos de fibra com massa total de 80 kg e transportadas para o Laboratório de Pavimentação - LABPAV da Faculdade de Tecnologia – FT da Universidade Federal do Amazonas – UFAM. Para as seis amostras coletadas foram convencionadas as seguintes nomenclaturas:

- i. **BBAR** - Brita Barcelos;
- ii. **BPF-1** - Brita de Presidente Figueiredo;
- iii. **BPF-2** - Brita de Presidente Figueiredo;
- iv. **BPF-3** - Brita de Presidente Figueiredo;
- v. **SXRJ** - Seixo do Rio Japurá e,
- vi. **SXRA** - Seixo do Rio Apuí.

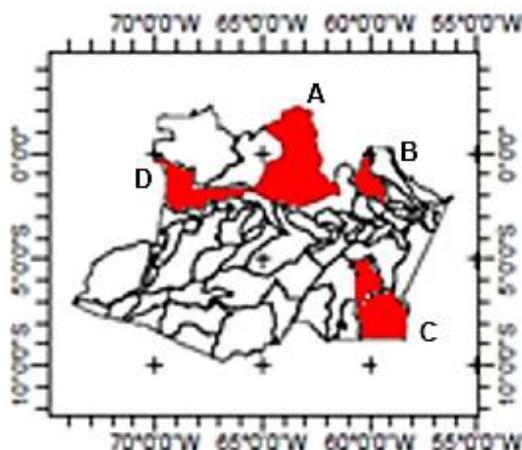


Figura 6. Mapa de localização das ocorrências e extração das Britas e seixos.

A) Pedreira Britamazon em Barcelos; B) Pedreira Samaúma, Pedreira Mercês e Pedreira da Fé ambas em Presidente Figueiredo na Rodovia Federal BR174 km 152, 165 e 202 respectivamente; C) Pedreira Ana Carolina em Apuí; D) Pedreira em Japurá, todos Municípios do Estado do Amazonas.

Fonte: Datum Sirgas 2000 (Oliveira, 2018)

Na Figura 6, está a localização georreferenciada dos locais de extração das britas e seixos rolados coletados e doados pelas Pedreiras Britamazon, Mercês, Samaúma, Santa fé e Navegação Ana Carolina, localizadas na cidade de Manaus no

estado do Amazonas. Segundo mapa da Figura 6 cedido por Oliveira (2018) responsável técnico das Pedreiras, as britas e os seixos foram extraídos de suas ocorrências localizadas em:

- i. Barcelos, na comunidade de Moura (BBAR), situada nas coordenadas  $1^{\circ}24'26.22''\text{S} / 61^{\circ}45'30''\text{W}$ ;
- ii. Presidente Figueiredo, na extensão da Rodovia Federal BR 174, nos quilômetros 152, 165 e 202 (BPF-1, BPF-2 e BPF-3), situada nas coordenadas  $1^{\circ}41'40''\text{S} / 60^{\circ}09'10''\text{W}$ ,  $1^{\circ}18'28.44''\text{S} / 60^{\circ}23'25.91''\text{W}$  e  $1^{\circ}8'28.02''\text{S} / 60^{\circ}23'24.7''\text{W}$  respectivamente e,
- iii. seixos rolados extraídos do Rio Novo Aripuanã (SXRA), em Apuí, situada nas coordenadas  $7^{\circ}29'00''\text{S} / 60^{\circ}39'00''\text{O}$ , e Rio Japurá (SXRJ), situada nas coordenadas  $1^{\circ}49'34''\text{S} / 66^{\circ}35'56''\text{O}$ , no município de Japurá.

### 3.2.2 Coleta de campo

Nessa etapa, além da coleta foram obtidas informações sobre técnicas das áreas de estudo, como a localização (Figuras 7 a 12) dos pátios de armazenamento das pedreiras, a identificação das amostras com informações de data, quantidade e especificações de granulometria (B0, B1 e B2) conforme NBR NM 26/2009. O procedimento de coleta das amostras seguiu a NBR NM 26/2009 - Amostragem de campo e a NBR NM 27/2009 – Redução de amostras de campo.



Figura 7. Local de coleta da brita BBAR nas granulometrias 0,1 e 2 no pátio da Pedreira Britamazon situada na rua Coréia do Sul, Ponta Negra, Manaus – AM nas coordenadas  $3^{\circ}05'43.3''\text{S}$  e  $60^{\circ}04'25.9''\text{W}$ .

Fonte: Google Earth (2019)

A quantidade coletada foi de aproximadamente 60 kg de cada amostra, totalizando 840 kg de material, distribuídos nas granulometrias de comercialização brita de número 0, 1 e 2 e os seixos rolados.



Figura 8. Local de coleta do seixo SXRA no pátio da Pedreira Navegação Ana Carolina situada na rua Flores, Compensa, Manaus - AM nas coordenadas 3°06'29.6"S / 60°04'08.6"W.



Figura 9. Local de coleta da brita BPF-1 nas granulometrias 0,1 e 2 no pátio da Pedreira Mercês situada na Avenida Torquato Tapajós, Manaus - AM nas coordenadas 3°01'51.7"S / 60°01'07.4"W.



Figura 10. Local de coleta da brita BPF-2 nas granulometrias 0,1 e 2 no pátio da Pedreira Samaúma situada na Avenida Margarita, Nova Cidade, Manaus - AM nas coordenadas 3°00'00.0"S / 59°59'22.9"W.



Figura 11. Local de coleta do seixo SXRJ no pátio da (não quis se identificar) situada na rua Vista Alegre Colônia Oliveira, Manaus - AM nas coordenadas 3°08'50.4"S / 60°00'29.8"W

Fonte: Google Earth (2019)



A metodologia aplicada foi baseada em Normas Brasileiras - NBR e diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT conforme mostra a Tabela 5. Os ensaios foram realizados nos laboratórios de Pavimentação – LABPAV e no Laboratório de materiais – LEM, ambos localizados na Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

Na Figura 13, está apresentada o processo de redução das amostras foi feito em conformidade com a NBR NM 27/2001 e, posteriormente, acondicionamento em sacos de fibra, com anotação das respectivas massas e em quantidades específicas para cada ensaio específico.



Figura 13. Coleta de material em campo (amostragem) NBR NM 26/2009.

A) Procedimento de coleta em pilhas de estocagem; B) armazenamento em sacos de fibra de 60 kg e identificação; C) secagem em chão plano sobre lonas plásticas e D) redução de amostras para ensaios.

Fonte: próprio autor (2017)

### 3.3.1 Caracterização Mineralógica

#### 3.3.1.1 Preparo das amostras para análise da Composição química e litológica das rochas por meio das técnicas de Espectrometria de fluorescências de raios-x(FRX) e Difração de Raios-X(DRX)

As britas e os seixos rolado foram triturados, moídos e pulverizados nos equipamentos apresentados moedor de impacto centrífugo modelo Contenco, da Pavitest e moedor de mandíbula modelo TX-50 da Astecma Equipamentos de Moagem Ltda, localizados no Laboratório de Laminação do Departamento de Geociência da UFAM (Figura 14). Esse preparo se faz necessário para composição de amostra necessária para realização dos ensaios de composição química (FRX) e mineralógica (DRX)

A moagem das rochas para realização de ambos ensaios, teve como objetivo, a obtenção de material fino, cuja granulometria fosse inferior ou igual a dada pela peneira de nº 200, ou seja, com diâmetro máximo característico (DMC) menor ou igual a 0,075 mm. Após o trituração e moagem tomou-se a quantidade de 20 g de cada rocha pulverizada e retirada a umidade higroscópica em estufa a 110 °C.



Figura 14. Equipamentos utilizados no preparo das amostras para ensaio de FRX e DRX.

Moedor de impacto centrífugo modelo Contenco da Pavitest (à esq.) e moedor de mandíbula modelo TX-50 da Astecma Equipamentos de Moagem Ltda (à dir.) - Laboratório de Laminação do Departamento de Geociência da UFAM.

Fonte: Próprio autor (2018)

### 3.3.1.2 Análise óptica (petrografia)

A análise petrográfica consistiu na visualização dos minerais constituinte, por meio da análise óptica de lâmina delgada (Figura 15), com apoio de um microscópio óptico, além da técnica de difração de raios-X (DRX).

Nesse ensaio foram utilizadas seis amostras, sendo uma lâmina delgada de cada, confeccionadas, junto ao Laboratório de Laminação da CPRM-Manaus feito em etapas distintas a seguir:

- A primeira etapa, feita no Laboratório de Microscopia da CPRM-Manaus, isto é, o preparo e confecção das lâminas delgadas de petrografia de acordo com a NBR NM 7389/2009-2 e,
- Uma segunda etapa, realizada no bloco da Pós-Graduação em Geociências da UFAM, com a análise das lâminas utilizando microscópio petrográfico de luz transmitida da marca LEICA, de modelo DM750P, nas objetivas de 10x e 20x.

Nessa última etapa, as fotomicrografias foram capturadas com câmera Samsung, modelo L5, acoplada manualmente ao microscópio. A quantificação das

fases minerais de cada seção delgada foi feita a partir da contagem modal de aproximadamente 100 pontos utilizando contador digital Pelcon.



Figura 15. Lâminas petrográfica das amostras para análise mineralógica NBR NM 7389/2009

À esquerda, microscópio ótico modelo Leica DM750P; a direita lâminas delgadas de petrografia.

Fonte: Próprio autor (2018)

Na análise macroscópica foi apreciado características como textura superficial, estrutura, coloração, formas dos grãos e grau de alteração. Já na microscopia, por meio de lâminas petrográficas, foi identificado e compreendido a composição mineralógica, granulação, microfissuras, minerais primários e secundários, modo de ocorrência e o grau de alteração, bem como a porção de poros e vazios das amostras.

### 3.3.1.3 Composição e classificação litológica por difratômetro de raios-X

Nesse método foram feitas análises da composição e classificação mineral. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análises Mineraias – LAMIN na CPRM Manaus, no equipamento difratômetro de raios-x (DRX) de modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60) da Panalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e tubo de raios-x cerâmico de anodo de Cu ( $K\alpha$ 11,5406 Å), modelo PW3373/00 e foco fino longo de 2200 watts (w) e 60 quilovolts (kv).

O detector utilizado foi do tipo RTMS, Pixel/1D, e a aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector na versão 2.1<sup>a</sup>. O tratamento dos dados foi através do software X'Pert HighScore de versão 3.0d da Panalytical. Foram utilizadas as seguintes condições de análise: Voltage (kV): 40; Current (mA): 40; Scan range (°

2 $\theta$ ): 5-70; Step size ( $^{\circ}$  2 $\theta$ ): 0,02; Scan mode: Continuous; Counting time (s): 50; Divergence slit: Slit Fixed 1/2 $^{\circ}$ ; Mask Fixed 10 mm; Anti-scatter slit Name: 5,7mm.

A identificação dos minerais foi feita através da comparação do difratograma obtido com padrões (fichas) do banco de dados do ICDD-PDF (International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File). As fichas são específicas para cada mineral (por ex., quartzo, 46-1045), podendo haver diferentes fichas para o mesmo mineral, principalmente, quando há variações na composição química, soluções-sólidas, etc.

### 3.3.2 Composição química por fluorescência de raios-X (FRX)

Foram feitas análises da composição química através de ensaio de espectrometria de fluorescências de raios-x – FRX no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LAMAC da Faculdade de Tecnologia/UFAM, utilizando equipamento da marca Panalytical modelo Epsilon 3-x, localizado no Laboratório de ensaios de materiais - LEM no Espectrômetro Panatycal com uma tensão máxima de 50 kv, corrente de 3 mA e gás hélio com pressão de 10 atm./kgf/cm<sup>2</sup>.

### 3.3.3 Ensaio tecnológicos

Os ensaios de caracterização física e mecânica dos agregados foram realizados no Laboratório de Pavimentação - LABPAV e no Laboratório de Ensaio de Materiais – LEM. Esses ensaios seguiram a metodologia com aplicação de diversos equipamentos, técnicas e procedimentos, todos regulamentados por Normas Brasileiras - NBRs e diretrizes do DNIT.

No ensaio de granulometria na Figura 16, uma amostra de 5000 gramas (g) foi definida pela dimensão máxima característica – DMC, é previamente seca em estufa a 110  $^{\circ}$ C por 24h. A amostra seca é passada por um conjunto de peneiras, em ordem decrescente e agitadas mecânica promovendo a passagem dos grãos por entre as malhas. Em cada peneira do conjunto é anotado a massa retida e comparada em forma de razão, com a massa total inicial, para obtenção do percentual de cada individual e acumulada. Com base nesses parâmetros foi possível a obtenção do DMC e do módulo de finura (MF) do agregado e posteriormente a sua classificação em relação à sua distribuição e tamanho dos grãos.



Figura 16. Ensaio de Análise Granulométrica NBR NM 248/2003 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM

A) secagem prévia em estufa a 110° C; B) peneiramento em conjunto de peneiras; C) separação por granulometrias; D) pesagem em balança Modelo AT 4500 com sensibilidade de 0,01g.

Fonte: Próprio autor (2018)

O ensaio de abrasão na Figura 17 a amostra com massa de 5000 g, de acordo com a graduação e DMC, é seca em estufa a 110 °C por 24 horas (h), e posteriormente, inserida no equipamento Los Angeles, em seguida, os grãos são submetidos a uma carga abrasiva. Essa carga abrasiva é composta por esferas de aço, com peso entre 390 g e 445 g e diâmetro de 47,60 mm. o ensaio em si, consiste na rotação do equipamento por um período de 500 ciclos de rotações.



Figura 17. Ensaio de Abrasão Los Angeles NBR NM 51/2001 no Laboratório de Ensaios Físico-químicos – LEM da UFAM

A) pesagem; B) inserção no equipamento; C) 500 ciclos de rotação no equipamento Los Angeles e D) retirada das amostras após término dos ciclos (500).

Fonte: Próprio autor (2018)

Após a submissão à carga abrasiva, o material é retirado do equipamento, peneirado na fração de 1,7mm, sendo descartado o material passante; em seguida, a fração retida é lavada seca em estufa a 110 °C até a constância de massa. Essa massa seca é anotada para cálculo do percentual de perda de massa por abrasão,

que é dado pela razão entre a massa inicial e a massa final após ensaio em porcentagem.

O índice de forma, como mostra a Figura 18, é obtido através da razão entre as dimensões de largura, comprimento e espessura dos grãos, tendo como amostras 200 unidade de grãos obtidos através do peneiramento, cuja quantidade é obtida de forma representativa de cada fração (peneira) de uma amostra de 3000 g (Figura 18).



Figura 18. Ensaio de Índice de formas NBR 7809/2008 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.

A) pesagem em balança Modelo Master com sensibilidade de 0,1g; B) Análise de granulometria em conjunto de peneiras; C) medição com paquímetro digital modelo digital Calliper de 150 mm do > comprimento do grão e D) medida da < espessura do grão.

Fonte: Próprio autor (2018)

No ensaio de obtenção da massa específica (real e aparente) e absorção na Figura 19, inicialmente, uma quantidade de amostra de 5000 g foi previamente lavada, seca em estufa a 110 °c por 24h, sendo essa a sua massa inicial.

Em seguida, a amostra é imersa em água a temperatura ambiente por 24 h, após esse período é retirada da imersão e espalhada em superfície plana sobre um pano absorvente seco, para remoção das películas de águas visíveis da superfície dos grãos e determinada a massa saturada superfície seca.

Imediatamente, a amostra deve ser inserida em um cesto padrão para a aquisição da massa tida como higroscópica (submersa) dos grãos e anotada

A massa específica real e aparente (Figura 19) é obtida através da razão entre as massas (seca, saturada superfície seca e submersa) obtidas em g/cm<sup>3</sup> e a absorção idem com resultado em porcentagem.



Figura 19. Ensaio de Massa Específica e Absorção NBR NM 53/2009 e teor de umidade NBR NM 9939/87 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM

A) lavagem prévia sob peneira nº 4; B) pesagem de 5000g em triplicata; C) imersão em água na temperatura ambiente e D) secagem grão a grão em pano seco absorvente e obtenção de massas saturadas e imersas.

Fonte: Próprio autor (2018)

No ensaio de massa unitária solta e compactada (Figura 20), a amostra é inserida em um cilindro padrão de 18 dm<sup>3</sup>. Esse preenchimento do cilindro é feito em três camadas de 1/3 cada, com apiloamento enérgico de 25 golpes com haste metálica especificada entre camadas, no caso do ensaio de mostra compactada, e despejada a 10 cm de altura da borda do cilindro para a análise solta, ambas sendo rasadas na borda do cilindro.



Figura 20. Ensaio de Massa Unitária solta e compactada NBR NM 45/2006 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.

A) preparo dos utensílios: cilindro com volume de 18 dm<sup>3</sup>, bandeja metálica e haste de socamento; B) preenchimento do vasilhame até a borda, em 3 frações de 1/3 com adensamento por 25 golpes com haste de socamento por fração; C) com posterior arrasamento e D) pesagem em balança digitam modelo Toledo de 50 kg e sensibilidade de 1 g.

Fonte: Próprio autor (2018)

Em seguida, após preenchimento do cilindro é obtido a massa da amostra solta e compactada, sendo descontado a massa do cilindro. A massa unitária é

calculada através da razão entre a massa da amostra pela massa do recipiente (cilindro).

A realização do ensaio de teor de material pulverulento (Figura 21) consiste na pesagem de 5000 g previamente seca em estufa a 110 °C por 24h, sendo essa a massa inicial.

Em seguida, a amostra é imersa em água à temperatura ambiente e agitada vigorosamente, sem provocar abrasão dos grãos. Após a agitação, o material deve ser passado na peneira de nº 0,075 mm, a qual está subjacente à de nº 1,2 mm, para não ser danificada.

Esse processo de imersão agitação e peneiramento consiste em um ciclo, e este deve ser repetido até que a água removida esteja limpa. Com a água limpa, o ciclo é finalizado e a amostra é seca em estufa e sua massa é novamente anotada, sendo essa a massa final.

A porcentagem de material pulverizado é obtida através da razão entre a massa inicial e final em porcentagem.



Figura 21. Ensaio de Teor de Material Pulverulento NBR NM 46/2003 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.

A) pesagem de 5000g em balança digital modelo Master com sensibilidade de 0,1g; B) processo de lavagem em água temperatura ambiente; C) agitação vigorosa sem perda de material e D) secagem e pesagem após total retirada das partículas finas.

Fonte: Próprio autor (2018)

O ensaio de adesividade, conforme mostra a Figura 22, é realizado submetendo uma amostra de 500 g, previamente lavada, e posteriormente, imersa em água destilada (por 1 minuto). Em seguida, aquece-se o ligante asfáltico para o procedimento de mistura entre os grãos, com intuito de envolvê-los por completo. Com todos os grãos recobertos, a mistura é esfriada em temperatura ambiente, e imediatamente, imersa em água, e em seguida inserido na estufa a 40 °C, por um

período de 96 h. O resultado do ensaio de adesividade será satisfatório quando após o término das 96 h em estufa não for observado o descolamento total e parcial da película de ligante da superfície do grão da amostra.



Figura 22. Ensaio de adesividade do agregado com o ligante betuminoso NBR 12583/2017 no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM.

A) Preparo, pesagem e aquecimento da amostra; B) aquecimento do ligante; C) amostra+ligante e D) amostra após 96 horas em estufa a 40 °C.

Fonte: Próprio autor (2018)

O ensaio de umidade induzida (Figura 23) consiste, na mensuração do dano produzida pela umidade na resistência à tração indireta de CA. Para isso, foram confeccionados seis corpos de prova (CP), desses três utilizados no ensaio de resistência não confinada (RT) e o restante para a não confinada (RT'). Os copos de provas foram produzidos em faixa de granulometria mineral e teor de ligante de projeto com índice volumétrico de 7% no índice de vazios.

Todos os CPs foram pesados e medidos suas alturas e diâmetros para então serem submetidos ao processo de saturação (S) na faixa de  $> 55\% S < 85\%$  de água por indução a vácuo por um período de cinco minutos, sob uma pressão mínima de 13 kPa e máxima de 67 kPa.

Imediatamente, após atingido a saturação os CPS são embalados em plástico filme, com cerca de 10 ml de água e submetidos ao resfriamento a temperatura de  $-18\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  por 16 h. Cessado o período de resfriamento, realiza-se a imersão dos CPs em banho maria a uma temperatura de 60 °C por 24 h. Após o banho maria executasse o rompimento em prensa padronizada, somente depois de atingir a temperatura de 25 °C. O dano por umidade induzida é definido pela razão entre a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova confinados e não confinados, denominada razão de resistência à tração retida (RRT).

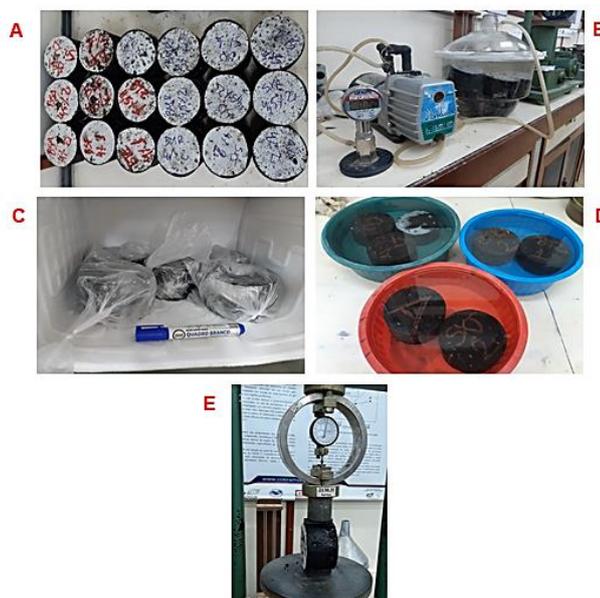


Figura 23. Ensaio de umidade induzida (adesividade modificada Lottman ASTHO 283-14).

A) confecção de corpos de prova de concreto asfáltico compactado com índices de vazios de 7%; B) processo de imersão em água destilada com pressão de vácuo de 67kpa de 5 a 10 minutos seguido de descanso também de 5 a 10 minutos; Processo de congelamento a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 18h seguido de banho maria a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24h e D) rompimento a tração diametral indireta RT do corpo de prova.

Fonte: Próprio autor (2019)

O ensaio de teor de argila (Figura 24) consistiu em imergir 3000 g de amostra, previamente seca em estufa, em água destilada, a uma temperatura ambiente por 24 h; em seguida, após esse período submerso executou-se o procedimento de lavagem sobre a peneira de 0,075mm de abertura. O teor de argila é dado pela razão entre a massa inicial e final após o ensaio em porcentagem.



Figura 24. Ensaio de Teor de argila NBR 7218/2010 realizado no Laboratório de Pavimentação – LABPAV da UFAM

A) peneiramento da amostra por frações granulométricas; B) pesagem e secagem em estufa a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  e C) imersão em água destilada a  $25^{\circ}\text{C}$  por 24h.

Fonte: Próprio autor (2019)

De posse da amostra submetida aos ciclos de degradação química, inicia-se o peneiramento para obtenção da perda de massa dos grãos, além de realizar uma análise qualitativa visual macroscópica dos grãos para identificação de danos.

A degradação química das amostras é obtida através da razão entre a massa inicial pela final das médias ponderadas de cada fração granulométrica.



Figura 25. Ensaio de Durabilidade por emprego de sulfato de sódio – Sanidade DNER ME 096/94.

A) imersão em solução de sulfato de sódio 350g/l após peneiramento por fração e pesagem de massa inicial por 16h; B) Secagem em estufa a 110 °C após as 16h de imersão por 24h; C) peneiramento após término de 5 ciclos de imersão e secagem (análise quantitativa) dos grãos e D) análise qualitativa visual macroscópica dos grãos após peneiramento final dos ciclos.

Fonte: Próprio autor (2019)

O ensaio de degradação química – sanidade como mostra a Figura 25, consiste no peneiramento prévio por fração, e na pesagem de massa inicial padrão. Em seguida, a amostra é imersa em solução de sulfato de sódio numa concentração de 350 gramas por litro (g/l) por um período de 16 h. Ao término desse tempo de imersão, o agregado é retirado da solução e seco em estufa a 110 °C por 24h. O processo de imersão e secagem constitui em um ciclo, devendo ser repetido até a conclusão de cinco ciclos.

Após o término dos ciclos. É feita procede-se à lavagem da amostra para retirada da solução e secagem estufa por 24 h, a 110 °C.

No ensaio de resistência dos grãos pelo método dos 10% de finos (Figura 26), uma amostra de granulometria entre 12,5 mm e 9,5 mm é dosada em um molde padrão, e, em seguida, inserida no cilindro de ensaio juntamente com o êmbolo de compressão padrão sobre ela. O conjunto de cilindro+amostra+êmbolo é inserido na prensa hidráulica para que receba uma carga de compressão capaz de penetrar cerca

de 20 mm do cilindro, no caso de amostra de brita, e 15 mm, para seixos. Após a penetração anota-se a carga.

No ensaio de resistência ao esmagamento dos grãos (Figura 26) o procedimento é idêntico ao método de 10% de finos, apenas uma mudança com relação à penetração do embolo, que, nesse ensaio, deve ser até que seja atingida a carga de 40 kN na prensa. A resistência de 10% de finos será a carga em quilonewton (kN) que foi capaz de produzir finos  $> 7,5\%$  e  $< 12,5\%$ . Já a resistência ao esmagamento da amostra será obtida pela razão da massa inicial pela diferença entre a massa inicial pela final, após o peneiramento na fração de 2,38 mm de abertura.



Figura 26. Ensaio de resistência pelo método dos 10% finos DNER-ME 096/1988 e de esmagamento NBR NM 9938/2013.

A) peneiramento na fração de 9,5mm e preenchimento de molde de dosagem para ambos ensaios; B) pesagem da amostra após preenchimento de recipiente; C) compressão até penetração do embolo em: 15mm para seixos e grãos arredondados e de 20mm para agregado britado no caso do ensaio de 10% finos e até que seja atingida a carga de 40kN para o ensaio de esmagamento e D) grãos após compressão em prensa hidráulica.

Fonte: Próprio autor (2019)

Para realização do ensaio de resistência ao impacto no aparelho Treton (Figura 27), inicialmente, a amostra foi peneirada na fração de 9,5 mm e separada uma massa de 150 g ou 15 a 20 unidades de grãos.

Em seguida, a amostra é inserida no cilindro de ensaio fixado na base do equipamento e desferido 10 golpes com um martelo em queda livre com 14,7 kg de massa e erguido a 39,37 cm da amostra.

Após o ensaio, a amostra é passada na peneira de 2,38 mm, para obtenção de massa perdida. A resistência ao impacto Treton é dada pela razão entre a massa inicial e a diferença da massa inicial pela final.

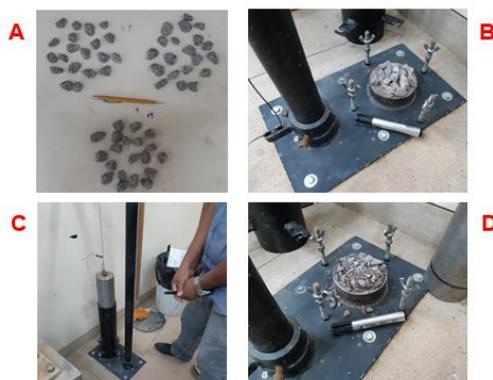


Figura 27. Ensaio de Impacto no Aparelho Treton DNER – ME 399/1999.

A) com peneiramento dos grãos na granulometria de 9,5mm e seleção de 15 a 20 grão mais cúbicos possíveis com massa mínima de 50x a massa específica do agregado; B) inserção na base do aparelho; C) sequência de 10 golpes em queda livre de um martelo com massa de 14,9kg a uma altura de 38cm e D) retirada da amostra após ensaio e determinação da massa para verificação de perda ao choque.

Fonte: Próprio autor (2019)

## CAPÍTULO 4

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Através da análise óptica por petrografia dos minerais foi possível obter a identificação e classificação mineral. No ensaio foram utilizados os parâmetros como grau de alteração, granulação, coloração, estrutura e deformação.

Nessa etapa, também foi realizado a técnica de DRX para confirmação da identificação dos minerais constituintes das rochas.

A Tabela 6 apresenta os minerais identificados e seus respectivos teores com base na análise modal de lâmina delgada.

Tabela 6. Resultado da caracterização mineral das amostras de rochas por meio de análise óptica (petrografia) e identificação dos minerais por meio de DRX.

Minerais (%)		Amostras					
	Nomenclatura e fórmula química	BBAR	BPF-1	BPF-2	BPF-3	SXRA	SXRJ
Feldspato	32	37	25	36	-	1	
Plagioclásio	13	14	10	5	-	-	
Hornblenda	6	1	2	4	-	-	
Biotita	4	2	2	6	-	-	
Clino-piroxênio	3	-	1	1	-	-	
Moscovita	2	5	5	3	-	-	
zircão	1	1	-	1	-	-	
<b>Secundário</b>	Clorita	2	-	2	4	-	-
	Epídoto	1	-	3	3	-	-
	Illita	1	0	-	1	-	-
	Caulinita	1	-	-	-	-	-

Fórmulas químicas: Quartzo -  $\text{SiO}_2$ ; Feldspato -  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ; Plagioclásio -  $\text{Na, Ca, Al (Si, Al) Si}_2\text{O}_8$ ; Hornblenda -  $\text{K}_2 (\text{Mg, Fe, Al})_5(\text{OH})_2(\text{Si, Al})_4\text{O}_{11}$ ; Biotita -  $\text{K}_2 (\text{Mg, Fe, Al})_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$ ; Clino-piroxênio -  $(\text{Mg, Fe}) \text{SiO}_3$ ; Clorita -  $\text{Mg, Al, Fe}_{12}[(\text{Si, Al})_5\text{O}_{28}(\text{OH})_{16}]$ ; Moscovita -  $\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSiO}_{10})$ ; Epídoto -  $\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})_3(\text{SiO}_4)_3\text{OH}$ ; Zircão -  $\text{ZrSiO}_4$ ; Illita ( $\text{K, H}_3\text{O}$ )  $(\text{Al, Mg, e})_2(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$  e Caulinita -  $\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{O H})_4$ .

Fonte: Próprio autor (2019)

Na Figura 28 observa-se que a BBAR possui uma coloração cinza, félsica-leucocrática, constituída predominantemente por quartzo, feldspato potássio, plagioclásio, hornblenda, biotita, Clino-piroxênio, muscovita e epídoto. Os minerais estão arranjados em uma textura fanerítica mirmequítica, caracterizada pelo intercrescimento de plagioclásio com quartzo vermicular. Sua granulação média a

grossa e uma estrutura maciça com estado de alteração pouco alterada a sã com propriedades físicas-mecânicas muito coerentes. Como base na descrição obtida pela análise petrográfica o agregado **classificou-se como um meta-sienogranito de rocha ígnea plutônica.**

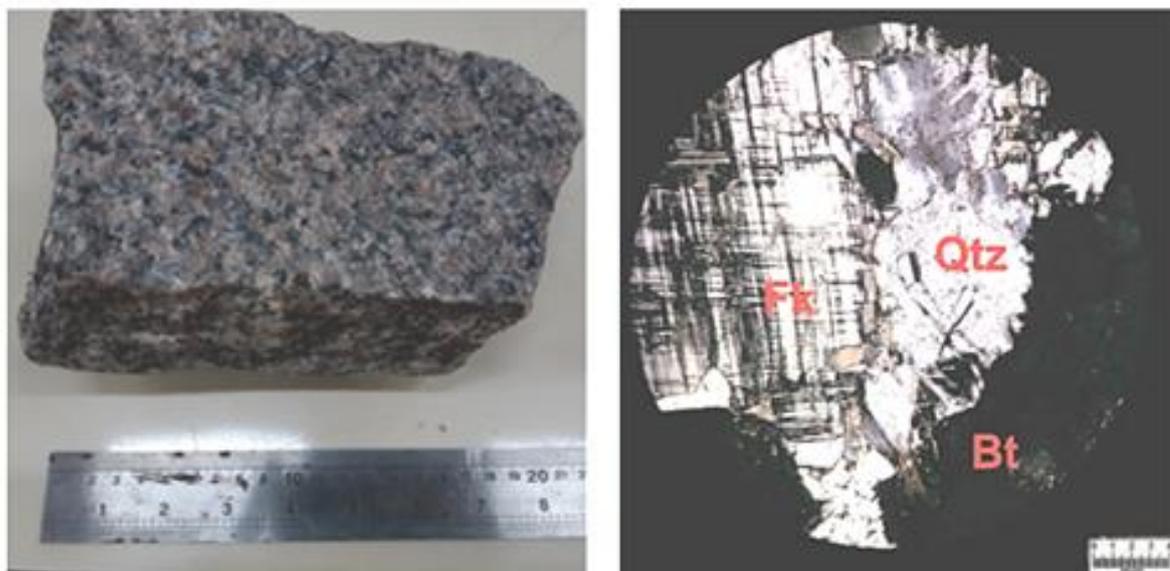


Figura 28. Rocha matriz (esquerda) e Lâmina petrográfica (direita) da amostra de brita **BBAR** em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociência – DEGEO.

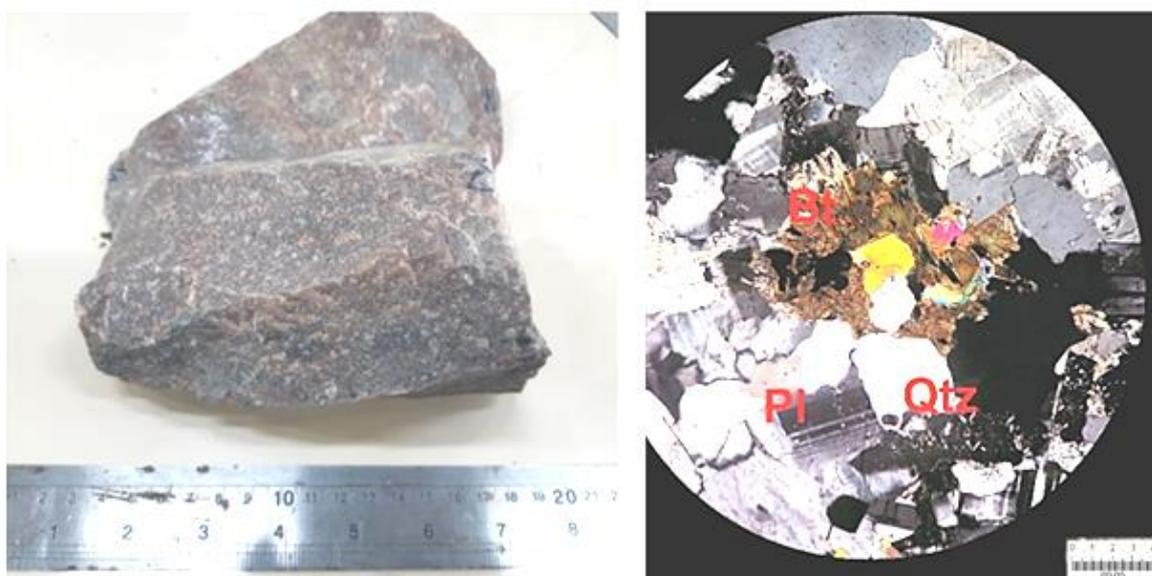


Figura 29. Rocha matriz (esquerda) e Lâmina petrográfica (direita) da amostra de brita **BPF-1** em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociência – DEGEO.

De forma similar o agregado BPF-1 (Figura 29) possui uma coloração rosácea-acinzentada, félsica-leucocrática, constituída, predominantemente, por quartzo, feldspato potássio, plagioclásio, muscovita, biotita, hornblenda, opacos e zircão. Seus minerais arrançados em uma textura fanerítica coronítica, caracterizada por reação de determinados minerais com a matriz. Possui granulação fina a média e estrutura maciça, seu estado de alteração é de pouco alterada a sã, além disso sua propriedade físico-mecânica é tida como muito coerente.

Sendo assim, após a análise petrográfica, o agregado **classificou-se em meta-sienogranito de rocha ígnea plutônica.**



Figura 30. Lâmina petrográfica da amostra de brita BPF-2 em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociências – DEGEO.

Fonte: Próprio autor (2019)

Na Figura 30 a BPF-2 é identificado na rocha uma coloração rosácea-acinzentada, félsica-leucocrática constituída predominantemente por quartzo, feldspato potássio, plagioclásio, muscovita, opacos, epídoto, clorita, biotita e zircão.

Seus minerais arrançados em uma textura afanítica com granulação fina e estrutura maciça. O estado de alteração é sã, e sua propriedade físico-mecânica é muito coerente. Logo pela análise da apreciação mineralógica o agregado **classificou-se como sendo um riolito de rocha ígnea vulcânica.**

O agregado BPF-3 na Figura 31, mostra ser uma rocha de coloração rosácea-acinzentada, félsica-leucocrática, constituída predominantemente por quartzo,

feldspato potássio, plagioclásio, muscovita, epídoto, clorita e biotita com minerais arranjados em uma textura afanítica.

Ele também, apresentou uma granulação média e uma estrutura maciça, seu estado de alteração é de medianamente-alterada a sã com propriedades físico-mecânicas coerente, classificando-se **como sendo um sienogranito de rocha ígnea plutônica**.



Figura 31. Lâmina petrográfica da amostra de brita BPF-3 em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociências – DEGEO.

Fonte: Próprio autor (2019)

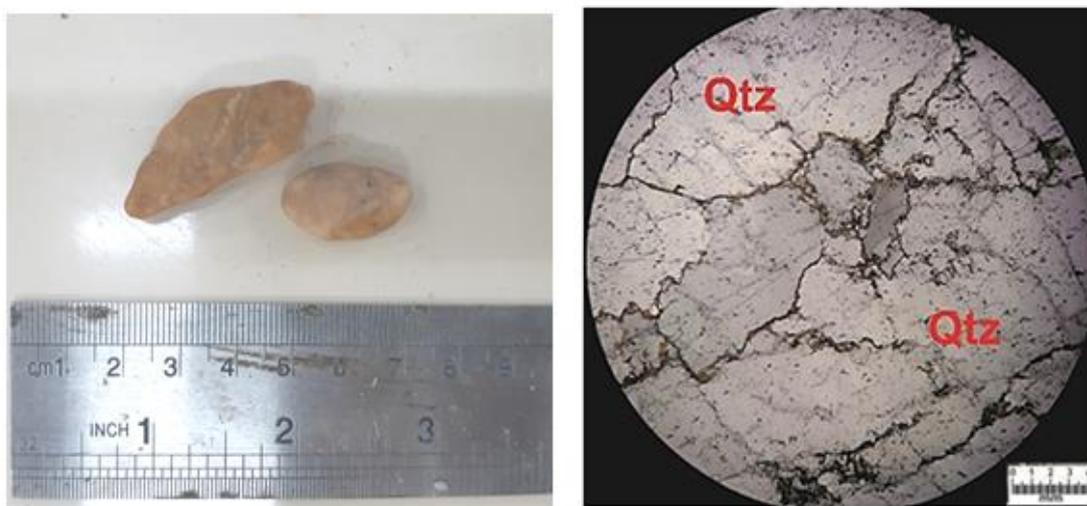


Figura 32. Lâmina petrográfica da amostra de grão sedimentar SXRA em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociências – DEGEO.

Fonte: Próprio autor (2019)

Diferente das britas, o seixo SXRA (Figura 32) apresentou, macroscopicamente, cor alaranjada e na microscopia, coloração cinza, constituída predominantemente por quartzo, com teor de 97%. Os minerais estão arranjados em uma textura fanerítica com granulação inequigranular fina, estrutura maciça, estado alterada, isto é, deformada e fraturada. Essas fraturas estão preenchidas com argilominerais. As propriedades físicos-mecânicas do agregado são pouco coerentes tendo características que o classificam **grão de quartzo**. (Simões, 2018) cita que os seixos, em regra, apresentam quartzo e arenito como minerais predominante com granulação média e estrutura maciça e medianamente a levemente alterada. Sua coloração é amarelada e o tipo de rocha, geralmente, é a sedimentar pouco consolidada. O agregado SXRJ (Figura 33) possui coloração cinza (microscópica) a alaranjada (macroscópica), constituída, predominantemente, por quartzo 95%.

Seus minerais estão arranjados em uma textura afanítica microcristalino, granulação inequigranular fina e estrutura maciça, em parte alterada, deformada e fraturada. As propriedades físicos-mecânicas pouco coerentes sendo classificado como como **mineraloide**, isto é, composto por cerca de 95% sílica amorfa.

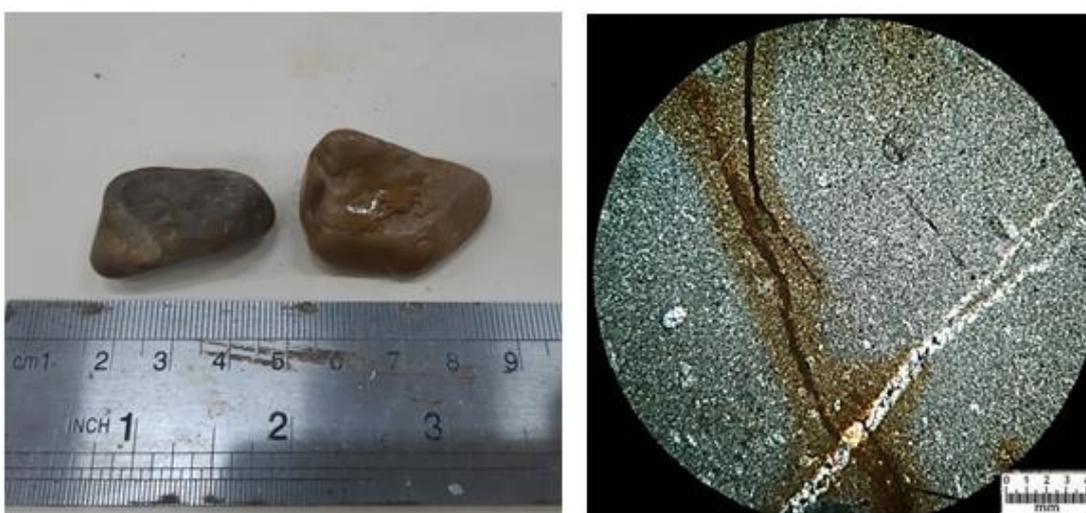


Figura 33. Lâmina petrográfica da amostra de grão sedimentar SXRJ em microscópio binocular modelo Leica DM 750P com Ampliação de 100x, realizado no laboratório de Microscopia do Departamento de Geociência – DEGEO.

Fonte: Próprio autor (2019)

Com base na análise petrográfica a rocha BPF-2 (Figura 30) foi a que obteve presença elevada dos principais minerais constituintes desse tipo de rochas graníticas com presença de quartzo, feldspatos potássio e hornblenda em teores elevados em

relação às demais amostras de britas. De acordo com Frazão (2007), esse elevado teor poderá acarretar numa maior resistência mecânica devido à dureza elevada dos minerais identificados através da escala de Mohs. Por outro lado, a amostra BBAR (Figura 28) seguida pelas BPF-2 (Figura 30) e BPF-3 (Figura 31) foram as que obtiveram maior teor de minerais secundários, logo, uma maior probabilidade de alteração química, principalmente, os minerais que possuem na sua composição, elementos químicos como: ferro, magnésio, cálcio e sódio justificando uma degradação química por intemperismo (MIZZUMOTO, 2009).

## 4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Com a caracterização da composição química feita por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) foi possível identificar os elementos químicos maiores e menores constituintes das rochas, e classifica-las como óxidos e silicatos, além do nível de acidez relativo ao pH da rocha, classificando-as em ácidas e intermediárias conforme teor de SiO<sub>2</sub> (sílica) como mostra a tabela 7.

Tabela 7. Resultado de análise da composição química das amostras através da técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX).

<b>Composto (%) e amostras</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>
Britamazon (BBAR)	68,60	13,70	7,35	5,95	3,70	0,58	1,67	0,11
Mercês (BPF-1)	59,90	14,60	9,90	3,50	3,45	0,98	4,31	0,15
Samaúma (BPF-2)	71,20	13,50	5,30	5,60	3,55	0,32	1,14	0,08
Santa Fé (BPF-3)	67,30	13,00	7,25	4,90	4,15	0,54	1,49	0,16
Apuí (SXRA)	97,00	0,990	4,00	<LQ=0,2	<LQ=0,2	<LQ=0,2	<LQ=0,2	<LQ=0,2
Japurá (SXRJ)	95,00	1,210	5,35	0,15	<LQ=0,2	<LQ=0,2	<LQ=0,2	<LQ=0,2

<LQ= menor que o limite de quantificação

Fonte: Próprio autor (2019)

A Tabela 7 apresenta os compostos químicos encontrados, em especial, a presença do óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), cuja presença na maior porção encontra-se nos minerais como quartzo e k-feldspato, em parte no plagioclásio e hornblenda, e em menores proporções na biotita, clorita, muscovita, Illita e caulinita. A partir do teor de sílica presente determinou-se a classificação das rochas BBAR, BPF-2, BPF3, SXRA e SXRJ como ácidas, com teor de SiO<sub>2</sub> > 65%, e BPF-1 como básica a intermediária, com teor de SiO<sub>2</sub> > 52% e <65%.

De acordo com os autores Curtis et al (1993); Pinilla (1965); Little (2003); Jones (2003); Neves e Filho et al (2007); Ceratti (2001) e Reis (2011), uma rocha básica tende a ter boa adesividade com o ligante, uma vez que, rochas ácidas possuem características hidrófilas quando na presença de água. Essa presença dificulta a aderência do ligante na superfície dos grãos, reduzindo de forma significativa a união de ambos e conseqüentemente, na instabilidade da mistura asfáltica.

A característica hidrófila, é em consequência, do fato das ligações eletronegativas entre as moléculas do ligante com a superfície do grão. Essa ligação insatisfatória, poderá ser observada e possivelmente constatada nas rochas BBAR, BPF-2, BPF3, SXRA e SXRJ classificadas como ácidas, onde essa característica pode vir a afetar no ensaio de adesividade mais adiante. Em regra, agregados classificados como básicos, teores menores ou iguais a 45% a 52% de sílica tendem a possuir maior adesividade do que agregados ácidos (teores  $\geq$  65% de sílica), o que poderá ser observado na rocha BPF-1.

Como o elemento predominante em todas as rochas dessa pesquisa foi o óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), esse composto químico acaba por ser o principal fator de caracterização e classificação geoquímica. Esse elemento químico tem característica ácida, isto é, sua interação eletroquímica é negativa, o que acaba fazendo que haja a repelência (afastamento) do ligante à medida que quanta maior for a sua presença na rocha (BERNUCCI et. al 2008). A concentração dos óxidos de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) presente nos k-feldspatos, hornblenda, biotita, piroxênios e muscovita e de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) presente nos plagioclásios, juntos representam os álcalis de uma rocha, isto é, reação negativa com o aglomerante, onde valores muitos próximos ou acima de 10% na composição química das rochas podem indicar uma possível reação deletéria. Essa proporção de álcalis ficou explícita na BBAR com 9,7%, na BPF-2 com 9,2%, cujos valores ficaram muito próximo do limite especificado pela NBR 15577/2008. O que indica uma tendência a ser uma rocha reativa de álcali-agregado (PERDIZ, 2009). Ainda, é possível obter informações prévias acerca da alterabilidade dos minerais por meio da composição química, isto é, minerais com presença elevada de elementos químicos de alta a média mobilidade como o magnésio (Mg), o sódio (Na), o cálcio (Ca) e o ferro (Fe) e o silício (Si).

Em geral, esses elementos estão presentes na maioria dos minerais secundário como a clorita, Illita, epídoto e caulinita, cujas proporções maiores foram

identificadas na rocha BBAR, e vai decrescendo na BPF-2, BPF-3 e por fim relativamente baixa na BPF-1. Essas proporções acima citadas, em regra, definem que a rocha BBAR obterá no ensaio de degradação química mais adiante, o maior percentual de perda por alterabilidade química e o BPF-1 o menor, face à presença desses minerais secundários. Com relação aos seixos rolados, levando em consideração apenas o elemento sílica, ambos seriam os mais alteráveis e reativos quimicamente. A presença de álcalis, ou seja, sódio e potássio em teores elevados, e de sílica, poderiam fazer a reação ter maior intensidade nas rochas BBAR, BPF-2 e BPF-3, e justificar assim, uma possível reatividade dos minerais (MIZZUMOTO, 2009; SANTOS, 2014; PAIVA, 2016).

A densidade da sílica elemento predominante é em média de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , sendo assim, acaba por definir a massa específica das rochas, com valores similares e bem próximos a dela, pelo fato de esse composto ser o mais abundante.

### **4.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA**

#### **4.3.1 Propriedades físicas**

##### **4.3.1.1 Granulometria**

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de granulometria, e com base nos dados foi possível a determinação da dimensão máxima característica (DMC) e do respectivo módulo de finura (Mf). Uma vez obtidos os parâmetros de DMC e MF (Tabela 8) foi determinada a classificação da distribuição granulométrica dos grãos, tendo a rocha BBAR, BPF-1, BPF-2, BPF-3 uma graduação uniforme (densa), e o SXRA e SXRJ descontínua (aberta). Esses valores encontrados estão dentro dos intervalos estabelecidos para agregados graúdos, cujo DMC é no intervalo de  $4,8 \text{ mm} \leq \text{DMC} \leq 50 \text{ mm}$  e o módulo de finura de  $2,90 < \text{MF} < 3,90$ . Com base no MF houve o enquadramento dos agregados na zona de utilização ótima, isto é, dentro do intervalo inferior e superior de cada classificação de B0, B1 e B2. Essa classificação é típica de mistura mineral ou asfáltica com boa trabalhabilidade, resistência mecânica e com pouca permeabilidade. Com relação aos seixos foi observado ausência de grãos nas frações entre 6,3mm a 9,5mm. Essa ausência é característica e típica de granulometria aberta ou descontínua, com base nas especificações da NBR 248/2003.

Tabela 8. Resultado de análise granulométrica das amostras de agregados de britas e seixos rolados

FAIXAS ABERT. #	GRAU0	GRAU1	GRAU2	BBAR			BPF-2			BPF-1			BPF-3		SXRJ	
				B0	B1	B2	B0	B1	B2	B0	B1	B2	B0	B1		
25				0	0,2	3,6	0	0,3	27,5	0	0	21,5	0	0	0	
19,5				0	12,7	82,1	0	5,1	82,4	0	10,3	79,5	0	0,8	0,2	
12,5	2a15			0,4	76,5	95,9	0,9	61,5	96,7	1,0	81,9	88,9	0	7,9	3,1	
9,5	02a15			15,7	95,6	96,6	14,1	89,6	99,1	14,6	95,1	99,6	8,7	88,3	16,6	
6,3	40-65	92-100		41,6	96,8	96,9	45,5	93,1	99,4	45,4	96,1	99,6	8,7	88,3	39,3	
4,75	80-100	95-100		83,1	99,5	97,5	82,9	99	99,9	81,1	98	99,6	62,3	99,7	39,4	
2,36	95-100			95,2	99,7	97,5	95,3	99,4	99,9	99,3	98,3	99,6	85,6	99,8	71,2	
<b>MASSA RETIDA ACUMULADA (%)</b>																
Classificação	GRAU0	MIÚDO	FÍLLER	B0	B1	B2	B0	B1	B2	B0	B1	B2	B0	B1	B2	GR
DMC	LIMITES DE DMC			RESULTADOS DE DIÂMETRO MÁXIMO CARACTERÍSTICO - DMC												
	≥4,8mm ≤50mm	≤4,8mm	≤0,075mm	9,5	19,5	25	12,5	19	31,5	12,5	25	31,5	25	31,5	9,5	19,5
MF	LIMITES DE MF			RESULTADOS DE MÓDULO DE FINURA - MF												
	≤5,0	≥5,0≤7,0	≥7,0≤8,0	5,82	7,06	7,64	5,80	6,91	7,81	5,72	6,95	7,77	5,23	6,81	4,95	6,42

Fonte: Próprio autor (2018)

Na comparação entre a curva granulométrica dos seixos com a de referência na Figura 34 foi possível identificar valores de frações retidas acumuladas fora de parâmetros normativos, ou seja, o SXRJ obteve um lapso da fração entre 6,3 mm a 9,5 mm. Esses valores demonstram uma classificação não definida para agregados,

em relação à distribuição granular, ficando entre o limite superior para a B0. Na amostra SXRA a presença elevada da fração de finos, devido a porcentagem elevada de grãos  $\leq 2,36$  mm com 35%.

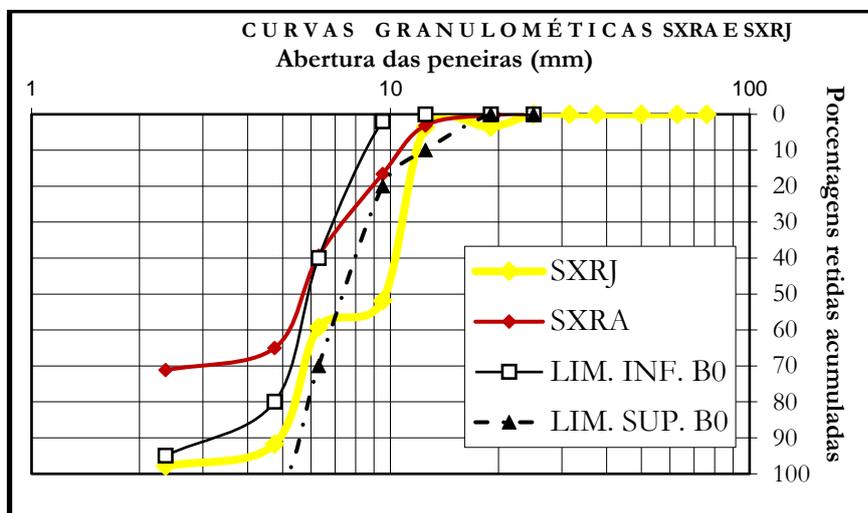


Figura 34. Ensaio de granulometria das amostras de seixo SXRA e SXRJ com suas respectivas curvas granulométricas e de referência (limites mínimos e máximos).

Fonte: Próprio autor (2019)

Em relação a massa total ele apresentou resultado fora do limite inferior especificado para uma B0, com uma fração alta de finos com granulometria próxima de areia grossa. A presença predominante de grãos finos característico em seixos rolados de rios, pode estar relacionado a grande distância do ponto de origem e formação, fato esse que colabora para frações finas elevadas e superfície lisas dos grãos, e também pela falta de controle tecnológico da granulometria justificado pelo método de extração por sucção (dragagem). Na Figura 35 apenas a BPF-3 obteve curva totalmente fora dos limites mínimo e máximo das granulometrias de brita B0 e B1. Também foi identificado uma leve alteração na curva da BBAR e BPF-1, com valores muito similares e próximos do limite inferior, com frações entre 2,36 mm a 6,3 mm na B0 e de frações entre 9,5 mm a 12,5 mm na B1 em seu limite superior.

A BPF-2 não apresentou desvios significativos na sua distribuição granular obtendo assim a melhor graduação entre as amostras analisadas. Valores de graduação fora ou muito próximos dos limites normativos podem ser justificados pela composição mineral das amostras, e isso, pode ser observado na BPF-3 que apresentou uma tendência significativa a sofrer degradação e sofrer alterações na sua forma e tamanho nominal, alterando assim, a granulometria dos grãos.

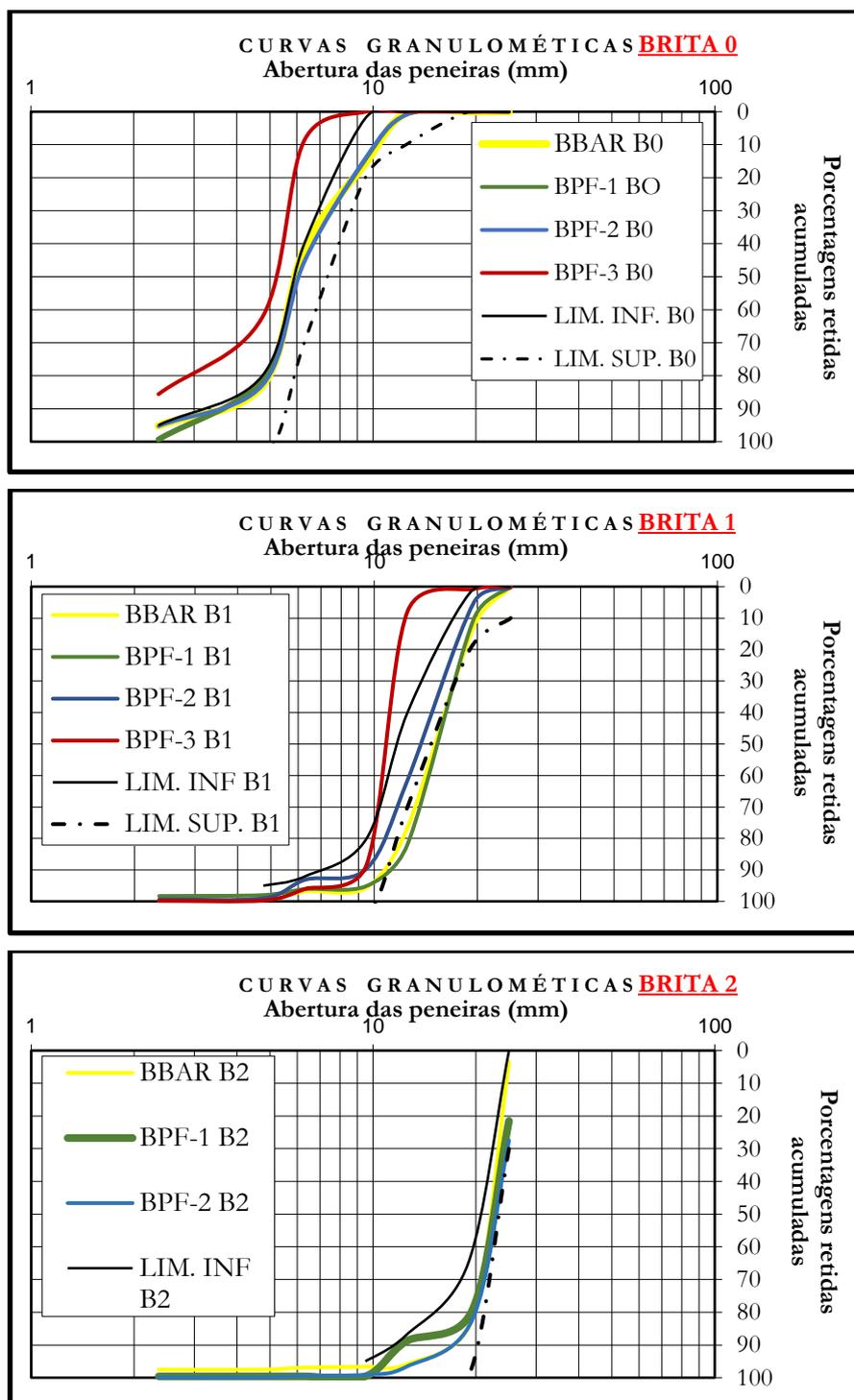


Figura 35. Resultado do ensaio de granulometria das amostras de brita B0, B1 e B2 com suas respectivas curvas granulométrica e de referência (limites mínimos e máximos).

Fonte: Próprio autor (2019)

#### 4.3.1.2 Massa unitária

Nesse ensaio é determinado a massa específica dos grãos em seu estado solto, simulando o comportamento quando submetidos uma queda de altura não padronizada, quando transportados na caçamba do caminhão, por exemplo. Sem a

compactação, a massa unitária tem intenção de determinar o volume de transporte com base na acomodação natural dos grãos.

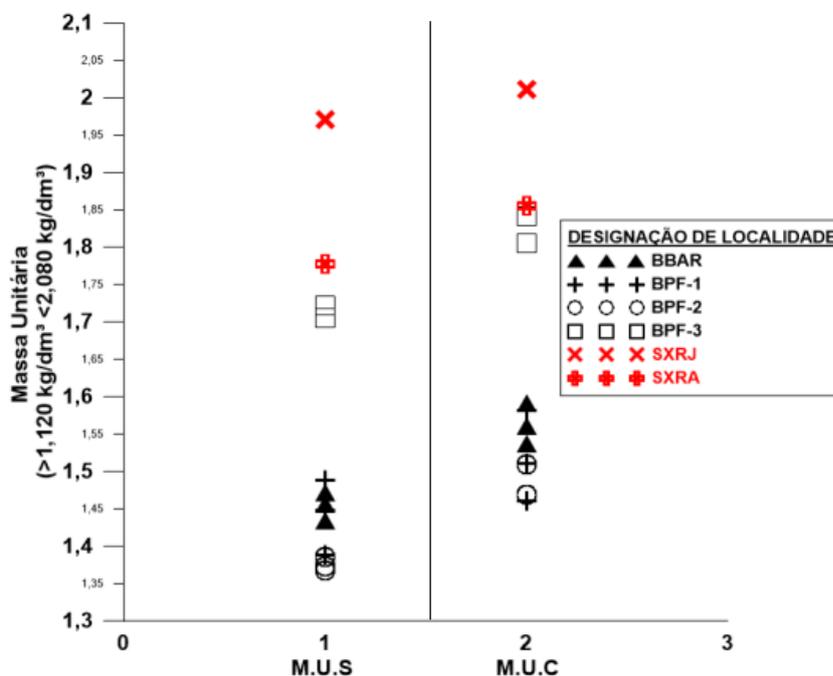


Figura 36. Resultado dos ensaios de Massa unitária solta – M.U.S a esquerda, e compactada – M.U.C a direita (DNER – ME 152/95).

\*Os dados apresentados contêm os resultados das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

Na Figura 36 está contido os resultados do ensaio de massa unitária, cujos valores obtidos dentro da faixa de  $\geq 1,120 \text{ kg/dm}^3$  DMC  $\leq 2,080 \text{ kg/dm}^3$  demonstram um estado são das rochas e valores muito próximos ou abaixo do limite inferior apresentam característica de pouco a muito alterada. Valores muito baixos de massa específica e massa unitária em rochas ígneas, por exemplo, podem indicar uma possível alteração de seus minerais constituintes, sendo assim, a BBAR, BPF-1, BPF-2 e BPF-3 apresentaram valores normais para a M.E.R e M.U. esses valores são típicos de rocha sã, enquanto que os valores obtidos pelos seixos SXRA e SXRJ são característico de uma rocha alterada (FRAZÃO, 2007 e PERDIZ, 2009).

As massas unitárias solta e compactada da BPF-3, SXRA e SXRJ foram maiores em relação as demais, isso pode ser justificado devido às características não lamelares (forma) de seus grãos o que proporcionou uma graduação granulométrica menos dispersa e mais densa, com poucos vazios na acomodação dos grãos no

interior do cilindro de ensaio. Para que agregados graúdos tenham um elevado grau de intertravamento, ou adequado grau de compactação (GC) das partículas, seja em uma mistura mineral ou asfáltica, é necessário que a relação de razão entre a massa unitária compactada e solta, esteja no intervalo entre  $\geq 0,95$  GC  $\leq 1,05$  de índice de compacidade (CUNHA et al., 2014; VAVRIK et al., 2002). Sendo assim, todas as amostras dessa pesquisa demonstraram grau de compactação satisfatório dentro dos limites estabelecidos.

Analisando o grau de intertravamento, infere-se que valores abaixo do limite mínimo indicaria a necessidade de carga elevada para a compactação da mistura, para, assim, obter maior interação das partículas internamente, e conseqüentemente uma mistura menos permeável e mais estável. Dessa forma, as rochas que não se enquadraram no intervalo especificado foi a BPF-1, devido ao índice abaixo do especificado de compactação com 0,93, além da BPF-2 com 0,91, já a BBAR com 0,95, o SXRA com 0,98 e o SXRJ com 0,96 ficaram dentro do limite de intervalo.

Tanto a M.U.S. quanto a MUC podem ser influenciadas por parâmetros como massa específica do agregado, índice de formas dos grãos, dimensão máxima característica – DMC e pela composição granulométrica (BERNUCCI et al, 2008). Metha e Monteiro (2008) classificam os agregados graúdos segundo sua densidade, isto é, de acordo com a massa unitária pode ser leves, normais ou pesados. Com isso, todas rochas de brita e seixos dessa pesquisa classificaram-se como sendo agregados normais quanto a M.E.R, com característica típicas de pedras britadas, areias, pedregulhos e seixos, devido suas massas unitárias se enquadrarem no intervalo de 1.120 kg/dm<sup>3</sup> a 2,080 kg/dm<sup>3</sup>.

#### **4.3.1.3 Massa específica real e aparente (M.E.R/MEA) e absorção**

Os resultados apresentados na Figura 37 demonstram que a BBAR, BPF-1, BPF-2 e BPF-3 apresentaram massa específica real em média de 2,610 g/cm<sup>3</sup>, o que já era esperado, devido todas serem rochas ígneas e possuírem similaridade na composição mineral (quartzo, feldspatos, plagioclásio e hornblenda), além de uma similaridade com as rochas A, B e B1 analisadas por Perdiz (2009), cuja MER foram na média de 2,62 g/cm<sup>3</sup>. Para os seixos SXRA e SXRJ a MER foi em média de 2,570 g/cm<sup>3</sup>, que de forma análoga as britas possuem similaridade com os seixos de Perdiz

(2009) e de Campelo et al. (2017), onde as medias foram de 2,59 g/cm<sup>3</sup>, já que ambos minerais constituintes predominantes é o quartzo.

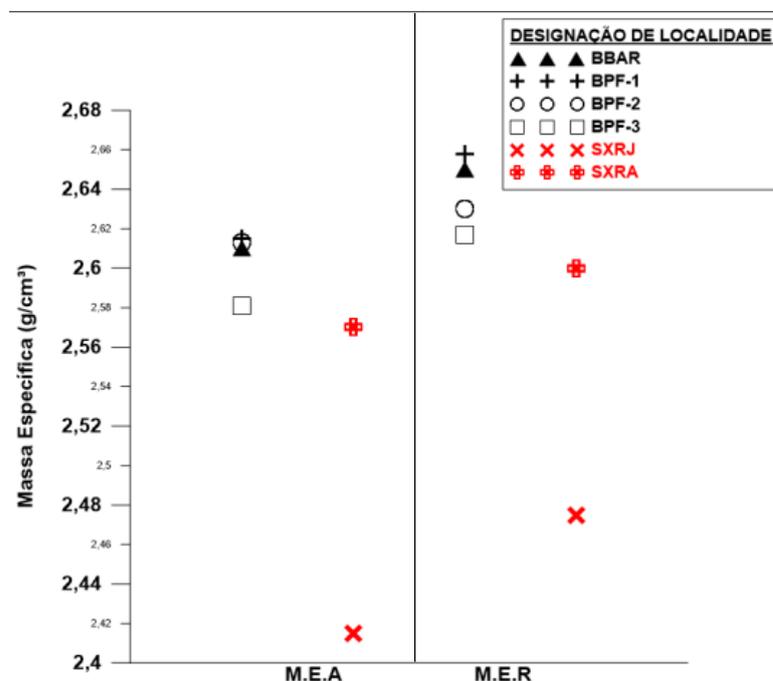


Figura 37. Resultado do ensaio de massa específica e absorção.

\*Os dados apresentados contêm os resultados das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2, além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

A falta de similaridade de MER, em regra, é influenciada pela composição mineralógica, isto é, à presença em maiores proporções dos minerais mais densos como o k-feldspato (2,570 g/cm<sup>3</sup>) e em menores como o plagioclásio (2,760 g/cm<sup>3</sup>) e hornblenda (3,450 g/cm<sup>3</sup>) presente nas britas, e somente o quartzo (2,650 g/cm<sup>3</sup>) nos seixos, o que acaba por justificar a baixa densidade do SXRA e SXRJ. Entre as britas, a BBAR e BPF-1 foram as mais densas.

Essa densidade alta está correlacionado com o quantitativo de elementos químicos, onde esse fator acaba por diferenciá-las, com base em seus minerais constituintes e as condições de sua formação, isto é, por serem rochas intrusivas, cujos minerais foram formados em maiores profundidades e em condições de pressão elevadas, tendem a ser mais densos em relação a rocha extrusiva como a BPF-2 (KLEIN, 2012). Na Figura 38 o índice de absorção foi relativamente baixo (>1%) em todas as rochas, o que significa que possuem uma baixa porosidade e teor de umidade. Com base em normas e na literatura, esses valores constam dentro dos

limites especificados que é  $> 3\%$ , com apenas uma observação, a BPF-2 com 0,24% obteve o menor índice e o SXRA com 1,08% o maior semelhante ao seixo de CAMPELO et al, (2017) com 1% de absorção.

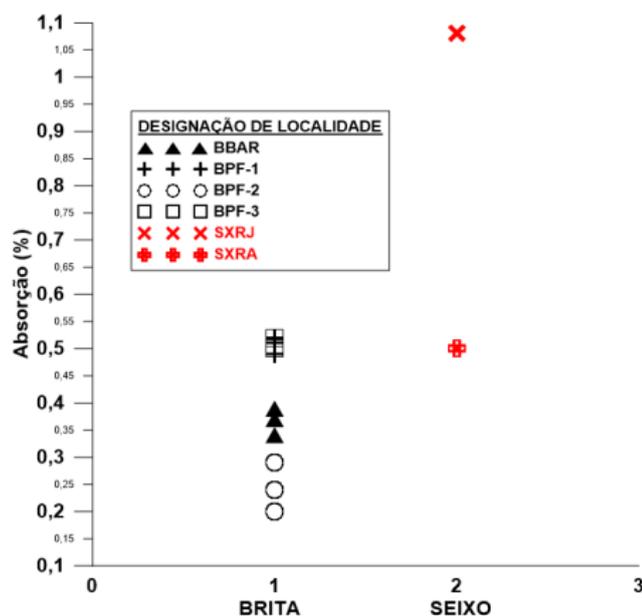


Figura 38. Resultados do ensaio de Absorção de água dos agregados de brita e seixo.

\*Os dados apresentados contêm os resultados das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

Esses valores podem ser justificados pelas características de estado de alteração de fraturado e pouco coerente que os seixos SXRA e SXRJ apresentaram na análise petrográfica no item 4.2. A alta absorção dos seixos dessa pesquisa se comportou de forma atípica com as características habituais desse tipo rocha natural, visto que a composição mineral e a textura do seixo são de superfície com aspecto vitrificado o que acaba por conferir uma certa impermeabilização do grão.

Agregados com índices de absorção  $\leq 1\%$  são os mais desejáveis, pois minimizam o consumo de ligante necessário na mistura e ajudam na redução no dano por umidade e degradação química por intempéries dos grãos (GOUVEIA, 2002).

#### 4.3.1.4 Índice de porosidade

Em agregados muito porosos a absorção é elevada, fato esse que contribui em perdas elevadas da resistência das misturas asfálticas com a presença de água

(umidade), isto se dá pelo fato de se ter uma significativa diminuição da espessura do filme de ligante asfáltico nas partículas dos grãos do agregado que compõem a mistura, além de uma suscetibilidade maior a degradação química (FURLAN et. al, 2004).

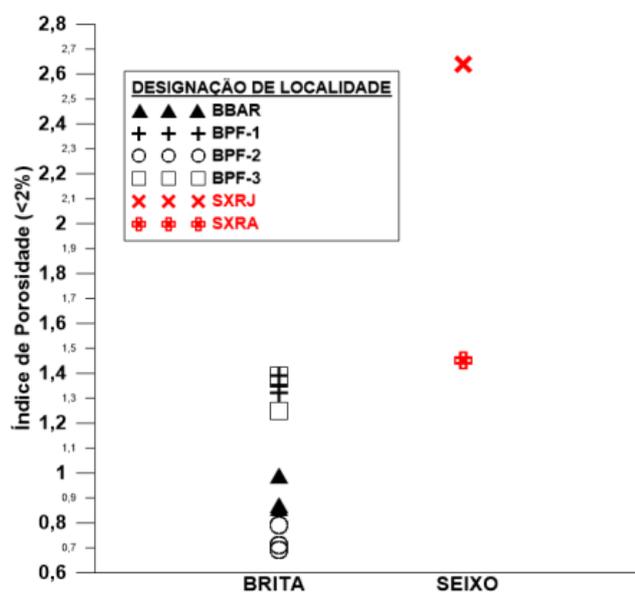


Figura 39. Resultados do ensaio de Porosidade dos agregados de brita e seixo.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

Analisando a Figura 39, a amostra BPF-2 foi a menos porosa entre as britas com 0,7%, sendo a BPF-1 e BPF-3 as mais porosas com 1,4% em média. Com relação aos seixos o SXRA obteve 1,5% de porosidade e o SXRJ 2,6%, sendo esses resultados atípicos, já que em diversas literaturas como a de Perdiz (2009) por exemplo, a porosidade dos seixos é menor em relação as britas. Essa alta porosidade dos seixos dessa pesquisa, é justificada pela classificação petrográfica onde as suas estruturas foram de alteradas e fraturadas.

#### 4.3.1.5 Teor de material pulverulento

Pela Figura 40 observa-se que o maior teor de finos foi obtido pela BBAR com 1,18%, enquanto que a BPF-1 obteve o menor de 0,27%. Diferentemente da brita de Perdiz (2009) denominada de A com 5% e a 1B com 1,6% de finos, enquanto que o seixo B apresentou 1,80%.

O teor elevado da BBAR é indesejado para aplicação em revestimento asfáltico, de acordo com algumas literaturas conceituadas na temática de pavimentação como a de Bernucci et al, (2008), pois podem afetar a interação dos grãos e a adesividade com o ligante.

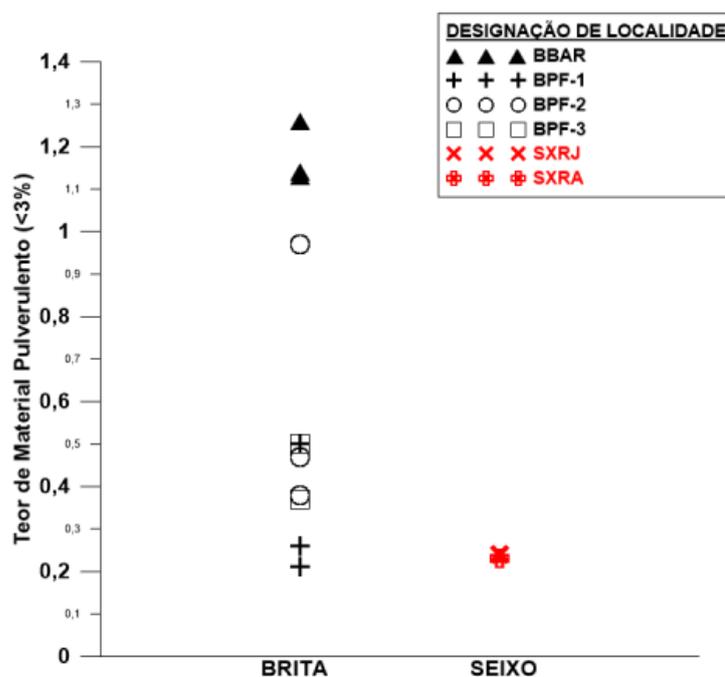


Figura 40. Resultados do ensaio de Teor de material pulverulento.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

Esses autores sugerem valores abaixo de 1% de finos, pois acima o excedente deve ser incluído na dosagem da mistura mineral como fíler. Os finos acabam por contribuir na interação (contato) entre os grãos, e na melhora da adesividade formando uma espécie de mastigue com o ligante, sendo assim, valores elevados podem ter efeito contrários diminuindo o contato interno e afetar a aderência entre o ligante/agregado.

Diversos fatores podem ter contribuído na diferença de valores obtidos entre as rochas, como o tipo de formação da rocha (textura, fratura, granulação e composição mineral), a forma de transporte, extração, beneficiamento armazenamento e manuseio, bem como processos químicos de degradação dos grãos (desagregação, esfarelamento, lascamento) em relação aos seus minerais constituintes.

Nessa pesquisa os fatores como transporte, manuseio e armazenamento podem ter sido os mais influentes nas britas BBAR, BPF-2. Essas amostras apresentaram teor de fino maiores, visto que, a BBAR veio de uma região muito distante da capital (de Barcelos) por meio de balsa e o local de armazenamento no pátio da pedreira situa-se em meio aberto diretamente no solo natural com constantes movimentações (por meio máquinas. Na BPF-2 não havia tanto manejo no pátio da pedreira Samaúma, mas o armazenamento era idem ao da BBAR em solo natural com agravante de ter pontos de acúmulo de água.

#### 4.3.1.6 Teor de umidade dano por umidade induzida

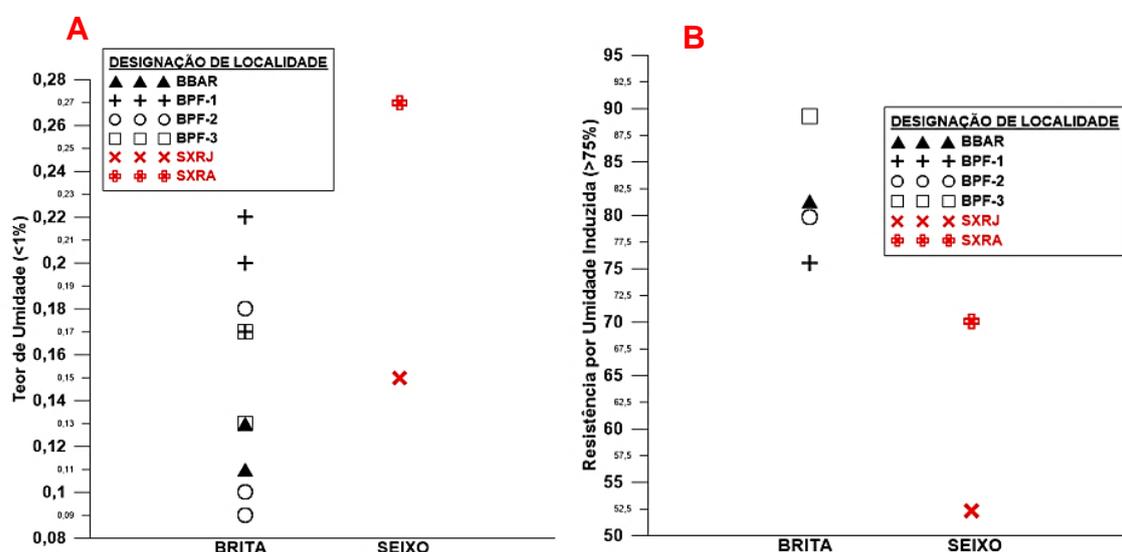


Figura 41. Resultado do ensaio de teor de umidade (6A) e dano por umidade induzida (6B).

\*Os dados apresentados na figura 41A e 41B contém os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

Como pode ser observado na figura 41A os teores de umidade da BPF-1, BPF-3, o SXRJ e o SXRA foram em média 50% maiores do que as da BPF-2 e BBAR. De acordo com os autores Monticeli et. al, (2016), essa diferença está relacionada com grau de alteração da rocha, cuja classificação é feita em grupos com base no teor de umidade, porosidade e absorção dos grãos, sendo assim, todas as rochas britadas BBAR, BPF-1, BPF-2 e BPF-3 se enquadraram no grupo A1, onde a estrutura da rocha possui um estado de alteração sã a não alterada, no qual a BPF-2 apresentou o menor

estado de alteração, justificado pelo teor de umidade baixo conforme descrito no item 4.1.

Já os seixos SXRA e SXRJ foram classificados no grupo A2, onde as características de estrutura microscópicas são de mediamente alteradas com fissuras, trincamento, lascamento e alteração química baixa dos minerais, o que também justifica o alto teor de umidade. O dano por umidade em mistura asfáltica compactada, se reflete na adesividade, e é influenciado pelo índice de absorção, teor de umidade e degradação química (sanidade), isto é, quanto maior a susceptibilidade desses grãos a água pior serão os resultados de resistência da mistura.

Na Figura 41B esse dano ficou evidenciado nos seixos, devido ao elevado teor de umidade, absorção e degradação química respectivamente. Com base nesses resultados, o comportamento mecânico de resistência na mistura asfáltica contendo os agregados SXRA e SXRJ na composição apresentaram resultados não satisfatórios em relação a estabilidade e resistência a tração indireta (RT), isto é abaixo do especificado em norma (>75%), enquanto que a BPF-3 obteve o melhor desempenho. O desempenho insatisfatório no ensaio de dano por umidade induzida dos seixos, pode ser justificado, devido ambos terem sido classificados no item 4.2 no ensaio de composição química como rochas ácidas, além da terem textura superficial lisa conforme descrito no item 4.3.1.7 e degradação química elevada (no item 4.3.1.10). Características como teor de umidade, absorção e porosidade demasiadamente altos, até certo ponto, dificultam a aderência e adesividade do ligante/agregado, e amplificam a instabilidade mecânica do pavimento pela perda de massa por intemperismo (BIAVA e STEINER, 2015).

#### **4.3.1.7 Índice de forma**

O índice de forma apresentado na Figura 42, mostra a forma dos grãos obtidos com base nos parâmetros dimensionais de largura, comprimento e espessura das amostras de brita na graduação de B0, B1 e B2 e dos seixos rolados, tendo como resultados as seguintes classificações:

**BBAR** - Cúbica/angular;

**BPF-1** - Lamelar e angular;

**BPF-2** - Lamelar/achatada e alongada;

**BPF-3** - Cúbica;

**SXRA** - Arredondado e,

**SXRJ** - Subarredondado.



Figura 42. Índices de forma dos agregados.

A) Largura do grão individual de cada amostra; B) Comprimento do grão; C) Espessura do grão.

Fonte: Próprio autor (2019)

A forma cúbica é a mais desejável, devido à sua menor tensão de atrito interno, consumo baixo de ligante e menor índices de vazios do que as lamelares e ou alongadas, sendo assim, as britas BPF-1 e BPF-2 classificadas como lamelares e alongadas, tendem a ser inversamente proporcional ao exposto acima, em comparação com a forma cúbica.

A forma dos grãos das rochas BPF-1 e BPF-2 tem como fator preponderante a presença predominante do quartzo, pois esse tipo de mineral de acordo com a literatura, possui fratura intragranular mineral em forma conchoidal, o que proporciona uma forma mais lamelar e alongada. Outro fator provável, pode ser o tipo de processo de beneficiamento (britamento), visto que, os britadores de mandíbulas tendem a conferir formas lamelares, diferente dos britadores do tipo cone, cuja tendência são as formas mais cúbica (BESSA et al, 2001; HICKEL et al, 2018).

Ainda, por meio do ensaio do índice de forma, é obtido os parâmetros de textura superficial dos grãos, onde a classificação foram as seguintes:

BBAR = 2,45 – muito rugosa;	BPF-3 = 2,47 - muito rugosa;
BPF-1=3,01 - moderadamente rugosa;	SXRJ= 2,01 - polida e
BPF-2=2,87 moderadamente rugosa;	SXRA=1,95 - polida e macia.

Para a pavimentação, em especial, para os revestimentos de concreto asfáltico, é desejável a forma cúbica, pois agregados lamelares e/ou alongados tendem a ocasionar deformações permanente, aumentar a fadiga e dificultar a

trabalhabilidade da mistura, tornando-a insatisfatória, devido a quebra dos grãos sob aplicação de carga, seja ela de compactação ou de tráfego.

Essa quebra interna, acaba alterando a sua granulometria aumentando as frações de partículas menores e os índices de vazios tornando tanto a mistura quanto os grãos fraturados mais suscetíveis a oxidação pela introdução da água, diminuindo a resistência e durabilidade do pavimento e ou revestimento asfáltico, o que poderá vir a ocorrer em estruturas contendo a BPF-2 e BPF-1, cujas formas são lamelares e alongadas (CUNHA *et al.*, 2004 e SOARES *et. al.*, 2015).

#### **4.3.1.8 Teor de torrões de argila**

Parâmetros como a resistência mecânica, trabalhabilidade e adesividade podem ser afetadas pela presença de materiais friáveis como os argilominerais, por isso, é que os agregados aplicados em misturas asfálticas devem estar isentos de substâncias friáveis como argila e matéria orgânica. Em geral, diversos tipos de argilas, são as mais comumente encontradas, tanto interno como externamente nos agregados. Esses argilominerías podem ser deletérios, isto é, sofrerem degradação em solutos, bem como uma expansão elevada, alterando assim, o estado da rocha (internamente) dando características a microfissuras, aumentando assim, a porosidade e a absorção do grão. Já de forma externa, pode afetar a adesividade, devido a deposição de forma excessiva na superfície do grão, uma vez que, são facilmente alteráveis, facilitaria a redução da adesividade e a coesão entre os grãos.

A Figura 43 mostra que todas as rochas apresentaram resultados dentro do especificado na NBR 7218/2010, isto é,  $\leq 3\%$ , estando a BPF-1 com o maior teor entre as demais com 0,37% de teor de argila. O resultado obtido pela BPF-1, pode ter sido influenciado por fatores intrínsecos da rocha, como a composição mineralógica, a resistência mecânica, e a alta degradação química, ou ainda, por fatores extrínsecos como tipo de beneficiamento, manuseio e armazenamento.

No caso do fator intrínseco, acredita-se que composição mineralógica do BPF-1 não tenha sido a contribuinte, uma vez que, a presença de quartzo mineral de dureza mediana não justificaria tal teor. Porém, a presença significativa de minerais secundários na BPF-1 com características alteráveis conforme visto no item 4.2, justificaria tal teor, devido ao aparecimento de argilominerais advindo dessa degradação. Com relação aos fatores extrínsecos, a forma de armazenamento da

BPF-1 é em céu aberto sobre solo natural, o que poderia ter contribuído no elevado índice de argila presente.

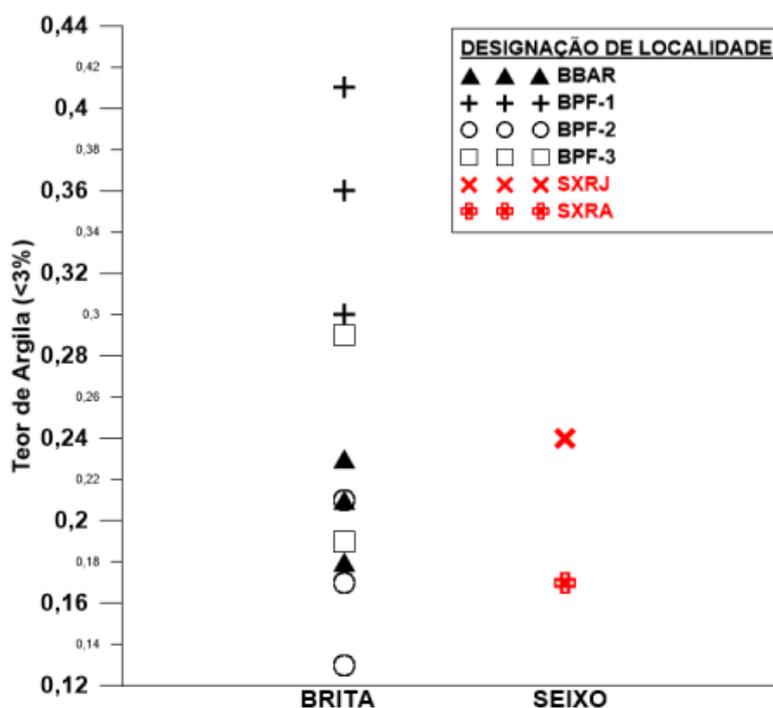


Figura 43. Resultado do ensaio de Teor de torrões de argila.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

#### 4.3.1.9 Adesividade do ligante

Agregados aplicados na pavimentação devem possuir superfície dos grãos limpa e rugosa, e características hidrofóbicas, isto é, ter uma boa relação entre agregado/ligante quando na presença de água.

A amostras de brita obtiveram resultado qualitativo visual conforme determina a NBR NM 12583/2017, ou seja, sem o descolamento da película de ligante que envolvia os grãos após ciclo de 96h imersos em água destilada a uma temperatura de 60 °C (Figura 44).



Figura 44. Ensaio de adesividade com ligante asfáltico

Fonte: Próprio autor (2018)



Figura 45. Escorregamento da película de ligante das amostras de seixo SXRA (a esquerda) e SXRJ (a direita).

Fonte: Próprio autor (2018)

Em relação as amostras de seixo, no SXRA e SXRJ houve um descolamento não significativo, mas um escorregamento do ligante da superfície dos grãos, deixando a camada de ligante estava muito fina como pode ser visto na Figura 45.

O resultado insatisfatório do SXRA e SXRJ, pode ter sido influenciado pela composição química em função do alto teor de sílica (>95%) em ambos seixos, pois rochas ácidas tem a pior ligação química, e essa acaba por interferir na atração entre as moléculas do aglomerante e das rochas por terem a mesma polaridade.

Essa repelência causa instabilidade, devido a adsorção em água e pela textura superficial muito lisa e arredondada. Esses fatores quando associados são

gatilhos que colaboram e muito na diminuição da aderência do ligante e por consequência na pouca ou nenhuma adesividade (FRAZÃO, 2002; PAIVA, 2017).

#### **4.3.1.10 Degradação química - Sanidade**

Na maioria das vezes, diversos agregados apresentam resultados satisfatórios nos ensaios físicos e mecânicos, mas, eles podem sofrer processos de alteração ou desintegração quando expostos ao clima, a reagentes, principalmente, solução aquosa ou materiais nocivos presentes na composição e do meio ao qual foi inserido.

A rocha BPF-2, classificada de ígnea extrusiva (meta-riólito) apresentou uma menor alterabilidade (Figura 46 ) do que as demais amostras BBAR, BPF-1, BPF-3 (sienogranitos) e os seixos SXRA (grãos de quartzo) e o SXRJ (sílica amorfa), isso ocorre devido ao processo químico que durante o ensaio os cristais de sais expandem nos poros da rocha ocasionando assim sua desintegração de determinadas partículas por fendilhamento, quebra e esfarelamento, isto é, durante o ensaio, os cristais de sal crescem nos poros dos agregados e causam a desintegração de algumas partículas.

Esse fenômeno pode ter contribuído no desempenho satisfatório da BPF-2 tendo como fatores preponderantes a predominância do mineral quartzo (em geral são menos alteráveis), ou pela baixa presença de minerais alteráveis como o k-feldspatos, plagioclásios, hornblenda e micas, que em regra, são alterados em argilominerais como a caulinita, por exemplo, ou pela forma de cristalização.

Em rochas vulcânicas, a formação ocorre em pouca profundidade e em temperatura alta, seguido de um resfriamento rápido originando assim, uma textura de grãos finos, com pouca porosidade (vazios), devido a liberação de voláteis (gases) pela erupção fenômeno típico de rochas ígneas extrusivas vulcânicas (RENNER E WINTER, 2010 E NUMMER, 2014). Os sienogranitos (BBAR, BPF-3 e BPF-1) possuem característica de foliação devido a cristalização lenta (resfriamento) formando assim textura de grãos mais grandes o que propicia a sua alterabilidade devido ao índice de porosidade elevada (vazios), isto é, quanto maior a absorção, maior deve ser o grau de degradação por alterabilidade, justificando assim, os resultados elevados das amostras BBAR, BPF-1 e BPF-3 com valores de 0,40%, 0,50% e 0,52% de absorção e 7,95, 9,3% e 5,3% de degradação respectivamente (PAIVA, 2017).

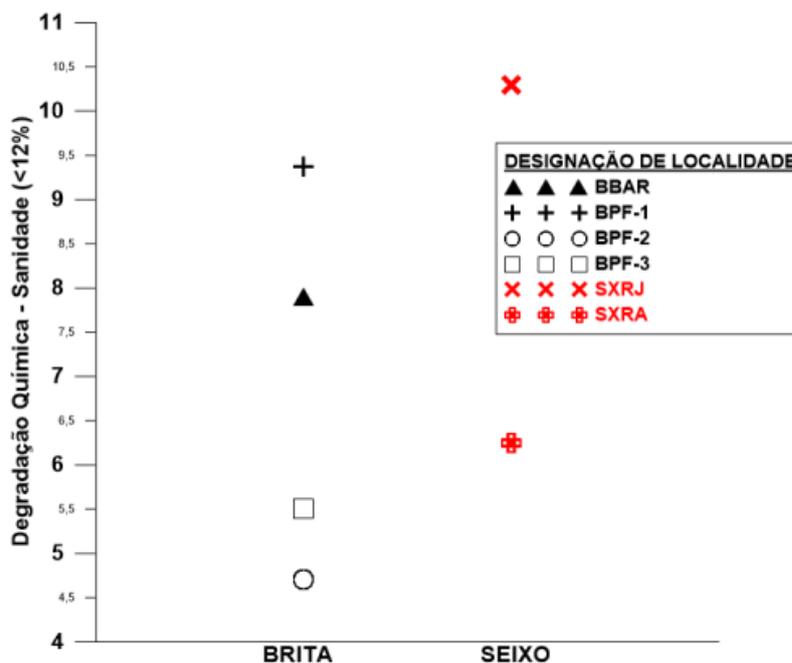


Figura 46. Resultado de degradação química através de ensaio de sanidade (DNER ME 089/1994) limite normativo de perda de massa  $\leq 12\%$  x índice de absorção x teor de umidade.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

Os seixos, em regra, são rochas detríticas, isto é, formadas por material depositado pelo transporte de partículas, a partir da cimentação por percolação pelo preenchendo dos poros. Esse tipo de formação, consiste na concepção de que, medida que esses poros são preenchidos e consolidados a porosidade reduz e com ela a absorção, o que explica assim, a absorção obtida pelo SXRA de 1,10% e de 0,50% pelo SXRJ. A absorção elevada e as condições mineralógica alteradas e fraturadas descritos no item 4.1, justificam a degradação química elevada do seixos, em relação as britas, devido esse tipo de rocha possuírem minerais herdados como o quartzo, micas e feldspatos ou pela neoformações de minerais pré-existentes, onde são facilmente intemperizadas, dando origem a areias, siltes e argilominerías (LEAL, 2012). De acordo com a norma DNIT DNER – ME 089/1994 e DNIT ES031/2006 a perda de massa após ataque químico deve ser  $\leq 12\%$  em relação a massa inicial. O maior percentual de degradação foi do agregado SXRJ com percentual de 10,3% de degradação e o BPF-2 com o menor de 4,5%. Os minerais quartzo e zircão são minerais primários e por isso os menos solúveis, pois não possuem elementos como Sódio – Na, o Potássio – K, o Cálcio – Ca e Magnésio – Mg classificados com alta e

média mobilidade, estando eles presentes, mais comumente nos minerais secundários e argilominerais.

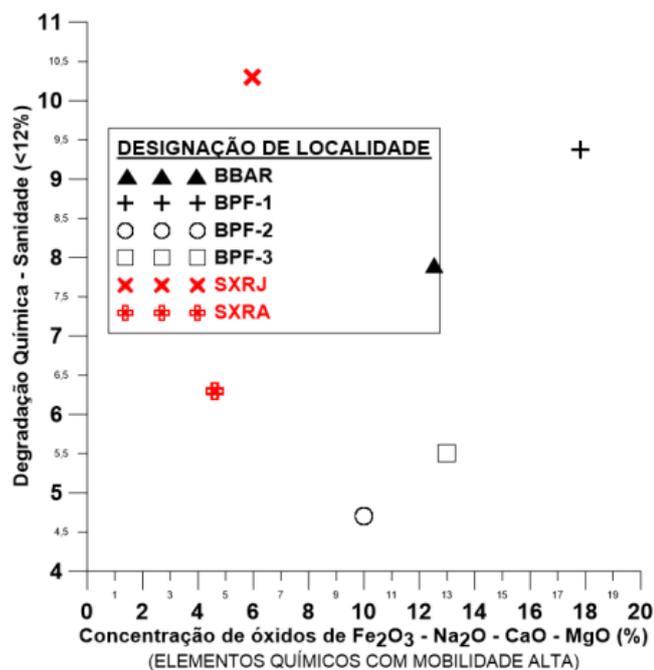


Figura 47. Degradação química – sanidade x elementos químicos presentes em cada amostra.

\*Os dados apresentados no gráfico 9 contém os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

O intemperismo ferralítico (Figura 47) ocasionado pela oxidação e lixiviação dos elementos mais móveis e solúveis está associado ao transporte pela água em regiões com índice pluviométrico elevado (clima tropical), ao contrário da sílica que tende a ser lixiviada de forma gradativa ao longo de sua evolução de degradação, enquanto que o ferro e o alumínio em forma de óxidos e hidróxidos tendem a ser insolúveis que diminui à medida que a cristalização dos minerais aumenta (SANTOS, 2014). Nos resultado das britas, observa-se uma diferença no proporção de degradação química, apesar de terem classificação de rochas ígneas, isso pode estar correlacionado com a proporção (presença) dos minerais secundários e suas respectivas proporções ou pela presença de minerais com instabilidade química, isto é, alguns elementos químicos possuem maior potencial de mobilidade do que outros na presença de meio aquoso (água), resultando na degradação química mais acentuada na amostras BBAR, BPF-2 e SXRJ respectivamente (Figura 47).

Conforme mostra a Tabela 9, as britas obtiveram o mesmo resultado na análise qualitativa (macroscópica), pelo fato de serem rochas ígneas, ou seja, a degradação foi do tipo desintegração dos grãos podendo ser imputado ainda as características expansivas condicionada aos minerais (muscovita, clorita e biotita) presentes nas rochas analisadas.

Tabela 9. Resultados qualitativo visual do ensaio de degradação química (durabilidade) após imersão em solução de sulfato de sódio.

Amostras	Análise qualitativa
	Macroscópica (visual)
BBAR	Desintegração por quebra dos grãos e de seus minerais constituintes sem fendilhamento.
BPF-1	
BPF-2	
BPF-3	
SXRA	Houve fendilhamento e quebra dos grãos do tipo lascamento e esfarelamento.
SXRJ	

Fonte: Próprio autor (2019)

De forma diferente os seixos SXRA e SXRJ obtiveram degradação do tipo lascamento e esfarelamento ocasionado possivelmente pela porosidade elevada e estrutura fraturada (alterada) o que pode ter potencializado a expansão dos minerais devido a susceptibilidade a água dos seus minerais constituintes. Foi observado também em todas as amostras uma perceptível mudança na textura e coloração (análise macro) dos grãos após completados os ciclos de imersão e secagem em solução de sulfato de sódio (meio aquoso com pH 10%).

#### 4.3.2 Propriedades mecânicas

Essa propriedade determina a resistência do agregado através dos índices de desgaste por abrasão, impacto e esmagamento dos grãos. Diversas características da rocha influenciam nos resultados sendo elas a composição mineralógica, a tenacidade e dureza as mais significativas além das secundárias como a microestrutura e a presença de minerais de alteração.

### 4.3.2.1 Abrasão Los Angeles

Todas as amostras apresentaram resultados dentro das especificações normativas vigentes para aplicação em obras de pavimentação, isto é, abaixo do limite  $\leq 50\%$  de perda por desgaste segundo a norma vigente, sendo as maiores perdas de massa obtidas pelas amostras SXRA, SXRJ, BBAR e BPF-3 com 27%, 26%, 25% e 22% respectivamente e as menores perdas o BPF-1 e BPF-2 com 15% e 15% de acordo com a Figura 48, mesma média de desgaste obtidos pelas rochas de Perdiz (2009), onde a brita denominada 1B obteve 32% perda e o seixo B com 29%.

A resistência de um determinado agregado está condicionada em parte pela sua composição mineral, isto é, quanto maior for a dureza dos minerais que compõem a rocha menor será sua degradação ou desgaste.

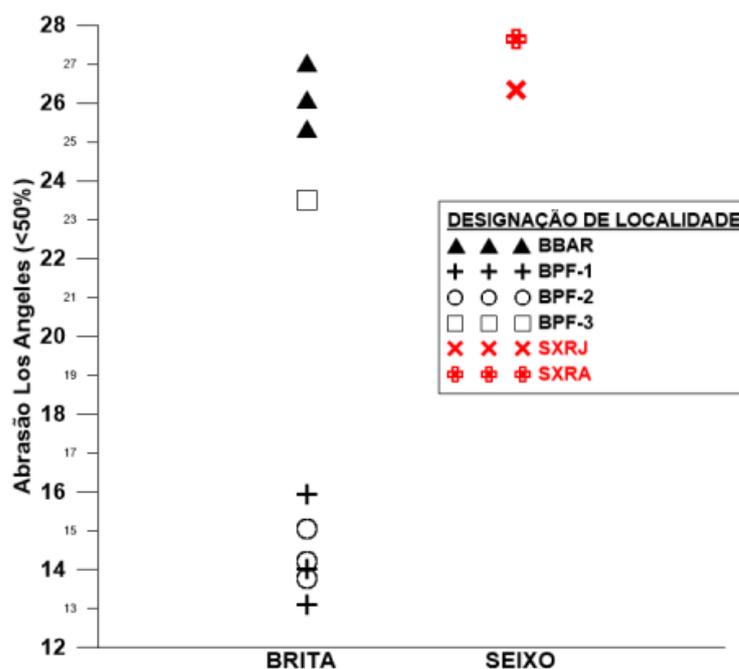


Figura 48. Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

Com base nisso, pode se dizer que, dentre os resultados de desgaste por abrasão apresentados a brita BBAR obteve a maior perda. O fator preponderante pode ter sido a sua composição mineral, visto que ele possui a menor porção de quartzo (dureza 7,0) e maiores presenças do feldspato (dureza de 6,0) e da biotita

(dureza de 2,5) em relação as amostras de brita, isto é, além de menor presença do mineral feldspato as rochas BPF-1, BPF-2 e BPF-3 que são constituídas por porções maiores de plagioclásio (dureza 6,5) e quartzo (dureza 7). Os seixos SXRA e SXRJ apesar de serem construídas predominantemente por quartzo (dureza 7), ambos, possuem muitas fissuras internas demonstrando serem rochas alteradas (não são) e pouco coesas o que explica o desgaste mais acentuado em relação as britas conforme caracterização mineralógica (item 4.2). ainda obtiveram perda muito semelhante com o seixo da pesquisa de Campelo et al, (2017) em média de 21% de perda.

#### **4.3.2.2 Resistência pelo método dos 10% finos**

Determinação da carga ao qual haja uma produção de 10% finos (material passante pela peneira de 2,4mm) após submissão das amostras ao esmagamento, esse ensaio simula como será comportamento dos grãos no momento da compactação da camada de revestimento no pavimento. Esse método é o indicativo da resistência que o agregado possui até determinado ponto (carga) em que ele começa a sofrer alterações em sua granulometria e forma, o que poderia vir a prejudicar a estabilidade, trabalhabilidade, adesividade, permeabilidade a suscetibilidade a umidade da mistura como um todo.

Os resultados apresentados na Figura 49, mostram um desempenho satisfatório exigidos na DNER ME 089/1994, isto é, uma resistência a produção de material fino dentro do intervalo de  $\geq 7,5\%$  finos  $\leq 12,5\%$  com carga  $\geq 60$  kN.

De forma análoga aos resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles na resistência de 10% finos, a presença de minerais com maior dureza na rocha.

A estrutura coesa e textura granular fina, com pouca porosidade e baixa absorção, também influenciaram no resultado de desempenho mecânico de resistência das amostras, visto que, a presença elevada de quartzo (mineral mais duro presente na composição mineral descrita na petrografia no item 4.2) fez com que a rocha BPF-2 obtivesse uma carga de 253 kN para então produzir material fino. Esse valor ficou bem acima, em relação a rocha BPF-1 com 221 kN, da BPF-3 com 181 kN e da BBAR com 170 kN de acordo com a presença de quartzo (decrecente) em cada amostra respectivamente.

De forma surpresa apesar de serem rochas fraturadas e não coesas constatada na apreciação petrográfica no item 4.2 os seixos SXRA e SXRJ obtiveram

os maiores valores de carga necessárias para então se produzir finos com 210 kN e 390 kN. Acredita-se que por eles (seixos) serem compostos 100% de quartzo um mineral de dureza 7 e com formas arredondadas e texturas lisa podem ter podem ter corroborado no alto desempenho da resistência superior as britas.

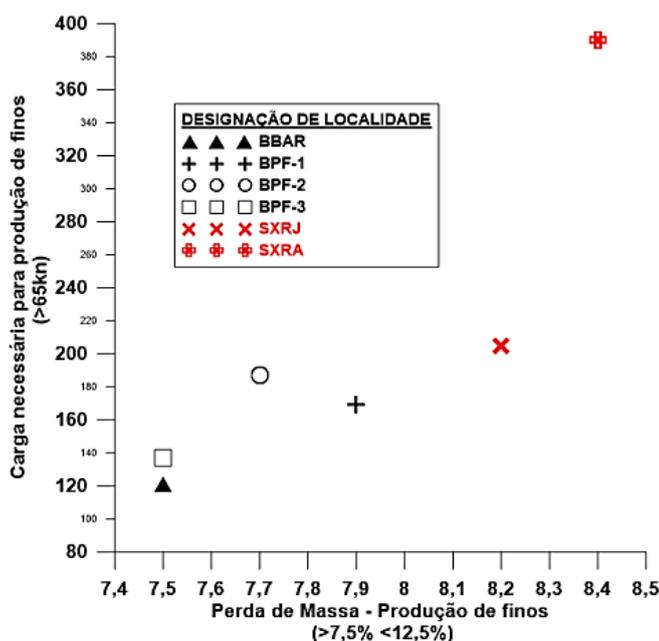


Figura 49. Resultado do ensaio de 10% finos carga (kN) x perda de massa (produção de finos %).

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

#### 4.3.2.3 Resistência ao esmagamento

Através desse ensaio foi obtido o parâmetro de resistência ao esmagamento das partículas que simula os efeitos da compressão por compactação durante a execução de construção da camada de revestimento do pavimento e ou pela ação de carga proveniente do tráfego de veículos, sendo levado em consideração fatores como o desgaste do material pelo atrito interno das partículas na mistura asfáltica (Figura 50).

A perda de massa por esmagamento foi menor nas rochas BBAR, BPF-3 e SXRA como mostra a Figura 50, o que não era esperado já que o índice de forma dessas amostras classificou-se como cúbicas para as britas e arredondada para o seixo. Em geral, partículas com essas formas (cúbicas e arredondadas) proporcionam uma quantidade baixa de vazios na mistura asfáltica, o que possibilita uma maior

interação dos grãos reduzindo a quebra que ocasiona a alteração da granulometria inicial.

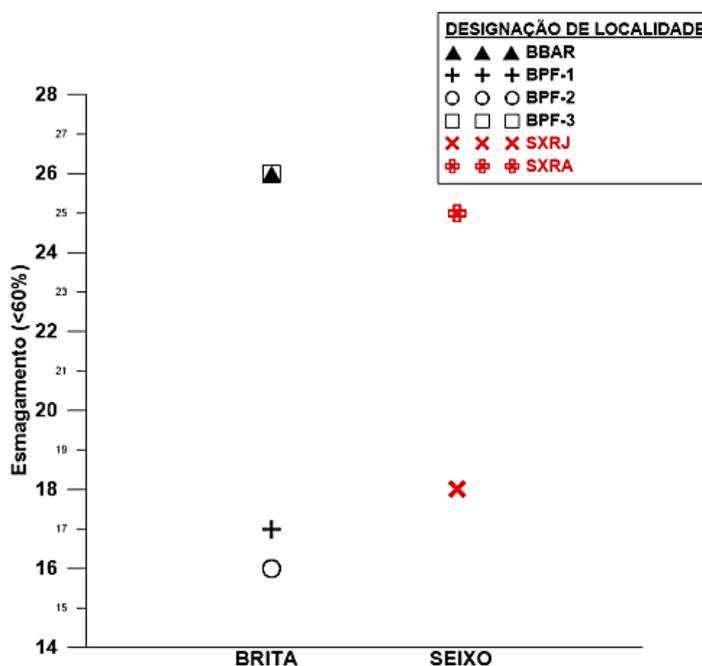


Figura 50. Resultado do ensaio de esmagamento.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

Nos resultados analisados a forma pode não ter sido preponderante, isto é, características intrínsecas como composição mineral, o estado de alteração e degradação mineral química podem ter influenciado nos resultados (PAIVA, 2017). Apesar de apresentarem perdas elevadas em relação aos demais os agregados BBAR, BPF-3 e SXRA apresentaram resultados dentro e bem abaixo do especificado em norma de  $\leq 50\%$  de perda de massa.

Pode a ser ainda que devido a presença de baixa mineral muscovita na caracterização mineralógica item 4.2 de dureza igual a 2,5 na escala de Mohs das amostras BBAR e BPF-3 em relação a BPF-1 e BPF-2, pois esse minerais possuem propriedades físicas de tenacidade elevada e flexibilidade devido a sua característica de deformação elástica com capacidade alta de absorção de carga sem fraturar (FRASCÁ, 2003).

#### 4.3.2.4 Resistência ao impacto no Aparelho Treton

Na resistência ao impacto no aparelho Treton (Figura 51) a amostra SXRA obteve perda de massa em média de 31%, a BBAR com 21%, a BPF-3 igual a 22%, sendo que em relação as britas classificadas como rochas ígneas plutônicas intrusivas (exceto a BPF-2 extrusiva).

A presença de minerais de média dureza (quartzo, plagioclásio e feldspatos), com textura fanerítica grossa, acabam por ser fatores determinantes na resistência baixa, pelo fato de terem capacidade de absorção menor de carga sem fraturar, isto é, menos tenazes, o que proporciona a quebra e degradação, ao contrário de uma rocha cuja textura é afanítica fina como na BPF-2. Em relação ao SXRA sua estrutura muito alterada (fraturada) pode ter sido a responsável por sua resistência baixa de acordo com análise mineralógica por petrografia feita no item 4.2 (PAIVA, 2017).

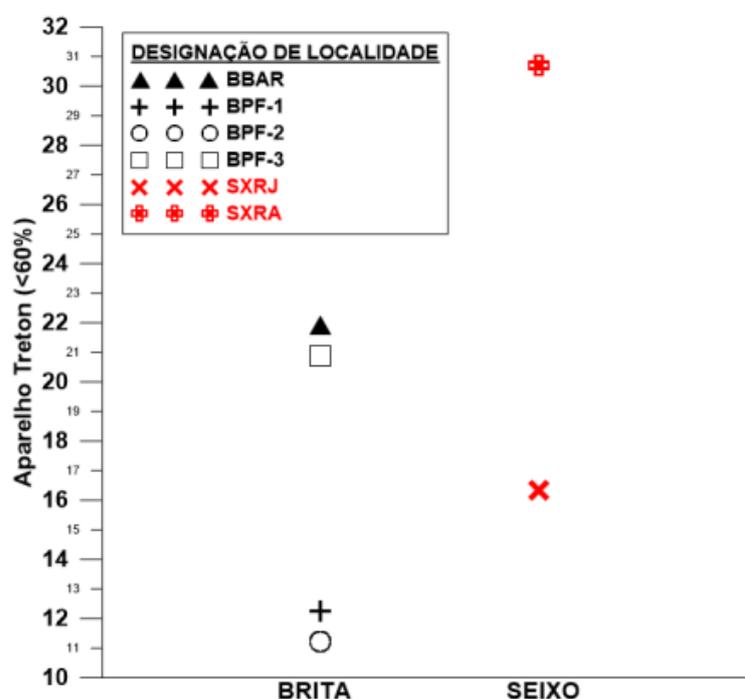


Figura 51. Resultado do ensaio de resistência ao impacto no aparelho Treton.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2018)

De maneira análoga aos resultados de resistência a abrasão, os índices físicos como a granulometria não densa com muitos vazios, a textura superficial polida

e a forma dos grãos lamelares e alongados, tendem a influenciar no resultado de resistência do aparelho Treton, uma vez que agregados com essas características como pode ser observado nas amostras BPF-2, BPF-1, SXRA e SXRJ são mais suscetíveis a quebra e fratura das partículas, quando submetidos a carga abrasiva, de impacto, choque e ou esmagamento (WOJAHN, 2018).

#### **4.4 CORRELAÇÃO DE PROPRIEDADES IMPORTANTES**

Certos parâmetros físicos tendem a ter influência em determinadas propriedades mecânicas e também físicas, bem como a composição mineralógica. Por isso, a importância de ser correlacionar os resultados obtidos na caracterização tecnológica de forma holística para um melhor entendimento prévio sobre a influência exercida entre si e no comportamento em termos de desempenho físico, químico e mecânico das amostras de forma individual e global.

Diversos autores como Furlan et al, (2004); Bernucci et al, (2008); Perdiz, (2009); Cavalcante et al,(2012) e Cabral, (2017) demonstram em suas pesquisas, que o índice físico de porosidade, exerce influência significativamente, direta nos resultados de diversas propriedades físicas e mecânicas, isto é, um agregado muito poroso, por exemplo, pode apresentar absorção elevada, e conseqüentemente, um consumo alto de ligante asfáltico.

A porosidade alta pode proporcionar ao agregado uma tendência a degradação química maior, e afetar a adesividade (ligante/agregado) com índices elevados de ambos, em misturas asfálticas.

Na mesma linha de raciocínio, a composição mineral, pode influenciar na resistência mecânica e na degradação dos grãos, através da alterabilidade dos minerais constituintes (FRESCÁ, 2003 e BACK, 2015). Conforme mostra a Figura 52, quanto maior a porosidade do grão (agregado) menor será sua massa específica.

Com base na análise constata-se o pressuposto descrito acima, visto que as britas BBAR e BPF-1 obtiveram valores de massa específica real levemente maiores que as demais devido sua baixa porosidade, ao contrário do seixo SXRA que possui menor M.E.R e porosidade elevada.

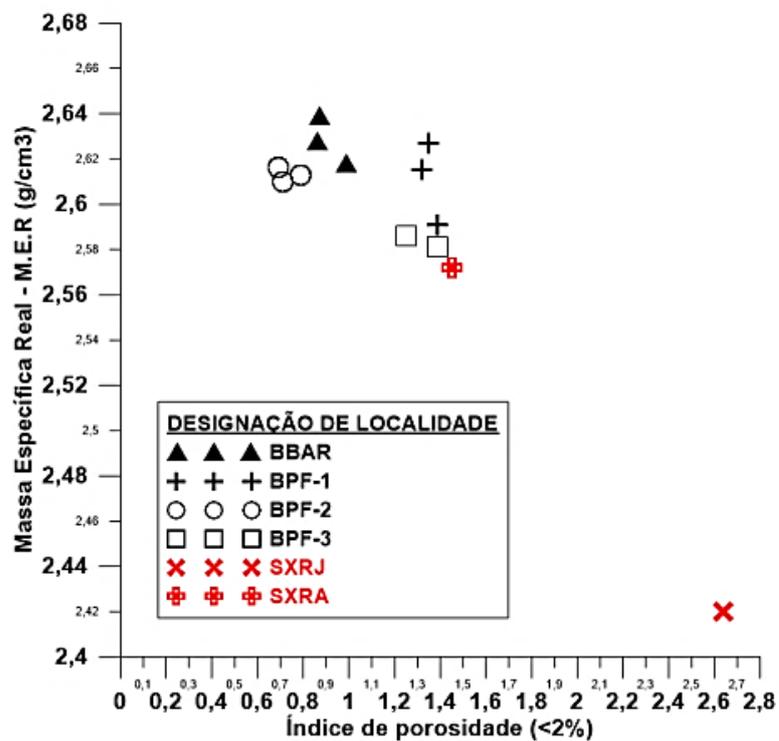


Figura 52. Resultados do ensaio de Porosidade e Massa específica real MER

Fonte: Próprio autor (2019)

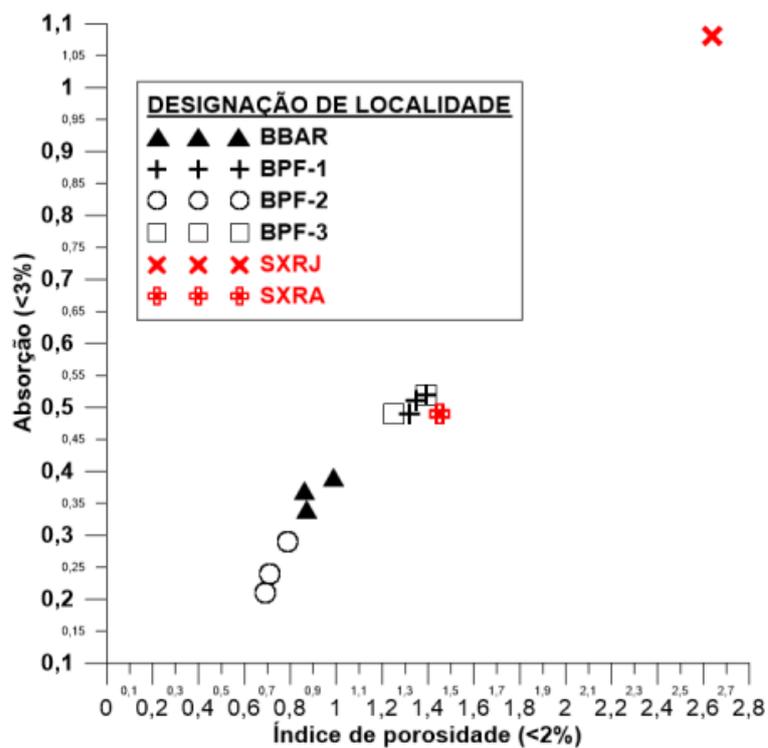


Figura 53. Resultado do ensaio de porosidade e absorção.

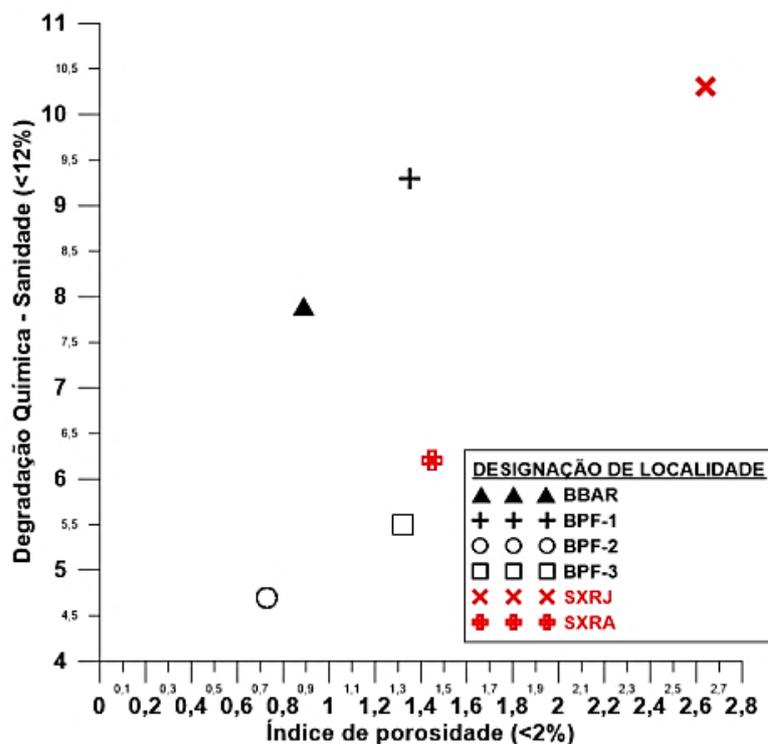


Figura 54. Resultado do ensaio de Porosidade e Degradação química – Sanidade.

Fonte: Próprio autor (2019)

A relação entre a porosidade e a degradação química apresentada na figura 54 demonstra uma atuação de protagonista do índice de porosidade, ou seja, a alterabilidade dos minerais na amostra SXRJ foi ligeiramente acentuada com 10,3% de perda de massa devido a porosidade de 2,6%, ao passo que com a porosidade baixa de 0,7% a brita BPF-2 obteve uma degradação química de 4,5%. Analisando a Figura 55, observa-se uma correlação significativa, isto é, uma influência da porosidade na resistência mecânica de abrasão los Angeles no qual as amostras que com índice de porosidade alta obtiveram as maiores degradação por abrasão (perda de massa), isso ocorreu devido aos vazios internos dos grãos que confere menor resistência as cargas a que são submetidos, além é claro do índice forma dos grãos. Na Figura 56, pode ser observado que o parâmetro físico de porosidade teve uma atuação coadjuvante na resistência a degradação mecânica no ensaio de 10% de finos, isso porque a amostra BBAR (brita), cuja porosidade de 0,9% a carga necessária para se produzir material fino (passante na peneira 2,38mm) foi de 170 kN, bem abaixo das demais amostras com porosidades bem acima.

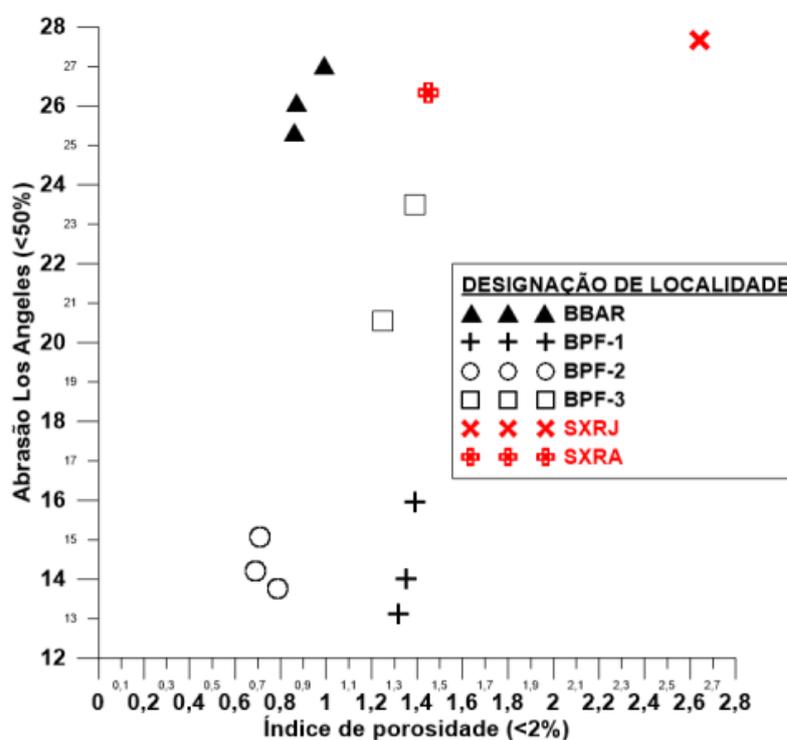


Figura 55. Resultados do ensaio de Porosidade e Abrasão Los Angeles.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2019)

Esse resultado é atípico levando em consideração os parâmetros de porosidade e resistência de 10% finos, uma vez que com uma porosidade baixa a resistência deveria ser inversamente proporcional, ocorrendo contrário, isto é, as amostras BPF-1, BPF-3, SXRA e SXRJ obtiveram porosidade bem acima da BBAR e ao invés de menores resistências, obtiveram valores bem acentuadas o que de fato demonstra uma participação não majoritária da porosidade no desempenho mecânico das amostras analisadas nessa pesquisa. Tal fenômeno pode ser atribuído por exemplo a composição mineral onde a brita BBAR na caracterização petrográfica obteve a menor presença de minerais duros (quartzo, feldspato, plagioclásio e hornblenda) em relação as demais, justificando assim o comportamento atípico na relação porosidade e resistência. Na Figura 57 observa-se que à medida que a porosidade aumenta a resistência ao esmagamento diminui. Esse fenômeno em função dos poros dos grãos a resistência diminui. Isso pode ser constatado, pelo resultado obtido na amostra BPF-2 que teve menor índice de porosidade e consequentemente, menor perda de massa ao esmagamento, ao passo que na

amostra BPF-3 a porosidade aumentou cerca de 54% enquanto que a resistência reduziu em 59%.

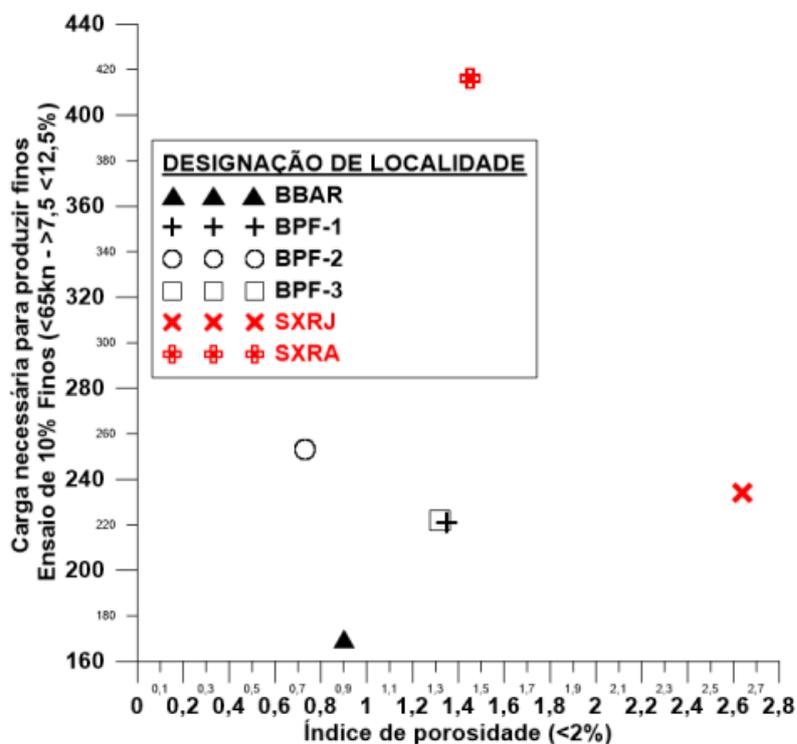


Figura 56. Resultado do ensaio de Porosidade e resistência pelo método de 10% finos.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2019)

Com relação aos seixos SXRA e SXRJ, apesar de ter obtido menor índice de porosidade o SXRA obteve perda de massa ao esmagamento maior, visto que em relação ao SXRJ o mesmo obteve característica de alterada e fraturada na análise mineralógica enquanto que o SXRJ apenas alterada, fatores esse que podem ter influenciado na inversão de proporcionalidade ( $>$  porosidade  $<$  resistência mecânica). Observando a Figura 58, constata-se, que quanto maior a porosidade do agregado menor a resistência mecânica ao impacto, mas a composição mineralógica também influenciou de forma significativa, pois na amostra BPF-2 a resistência foi maior (11% de perda) e a porosidade (0,7%) a menor, mas na amostra BPF-1 a porosidade foi maior (1,4%) e a resistência foi maior (12% de perda), esse fenômeno é devido a esse agregado BPF-1) ter presente na sua composição o mineral quartzo porção elevada em relação as demais, o que acabou por ajudar no seu desempenho mecânico.

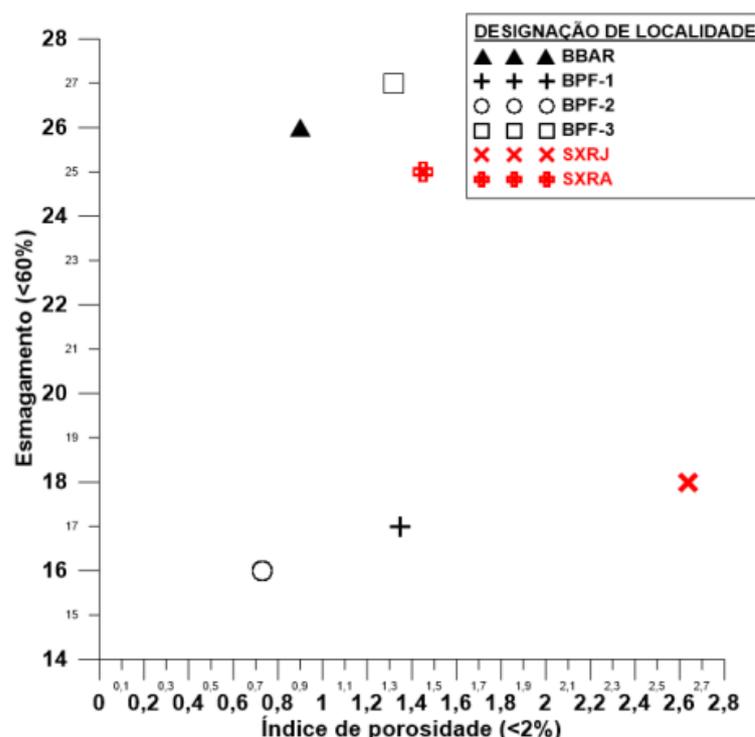


Figura 57. Resultado do ensaio de Porosidade e Esmagamento dos grãos.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2019)

Nos seixos SXRA e SXRJ se não fosse a estrutura mineralógica alterada do SXRJ e fraturada do SXRA, ambos poderiam ter tido resultados de resistência bem mais satisfatório, uma vez que são construídos predominantemente de quartzo (mineral com dureza média), mesmo com porosidade elevada como pode ser visto na Figura 58. Apesar de que na análise mineralógica as britas obtiveram em sua composição minerais como plagioclásio, hornblenda, biotita, muscovita, zircão clorita, piroxênios e ilita, essa correlação levará em consideração apenas o mineral quartzo, pois o mesmo possui maior dureza e compõe todas as amostras dessa pesquisa de forma majoritária no caso das britas em média de 41% ou predominante no caso dos seixos com 96%. Observando a Figura 59 entende-se que a presença do quartzo apresenta uma tendência, de que quanto maior sua proporção, melhor a resistência a degradação por atrito (abrasão), isto é, com 36% de quartzo a amostra BBAR obteve 26% de perda de massa, enquanto que a BPF-1 e BPF-2 com 40% e 45%, respectivamente, obtiveram 14% de perda de massa em média. Mesmo com 95% de

quartzo na sua composição os seixos apresentaram estrutura fraturada para o SXRA e, muito alterada para o SXRJ o que corroborou na alta perda por abrasão.

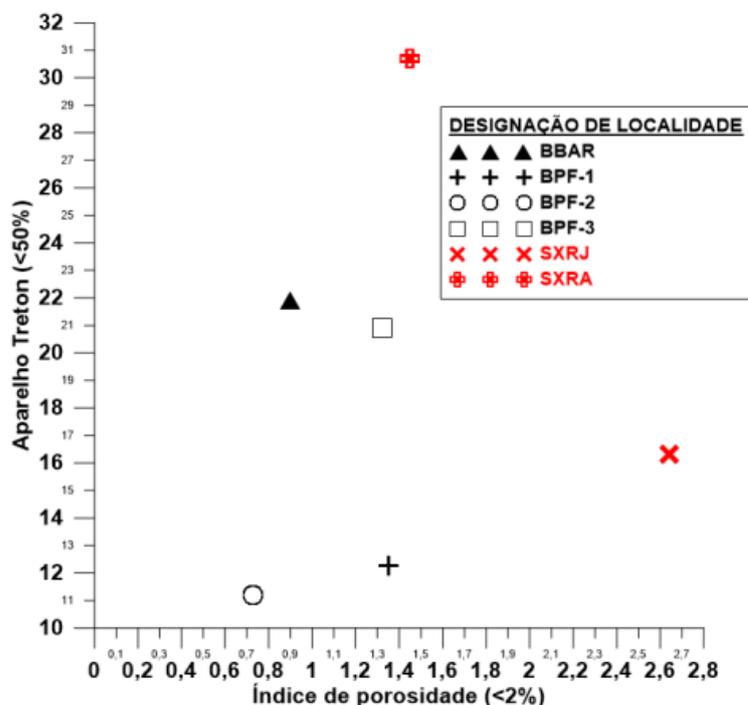


Figura 58. Resultado do Ensaio de Porosidade e Resistência no Aparelho Treton.

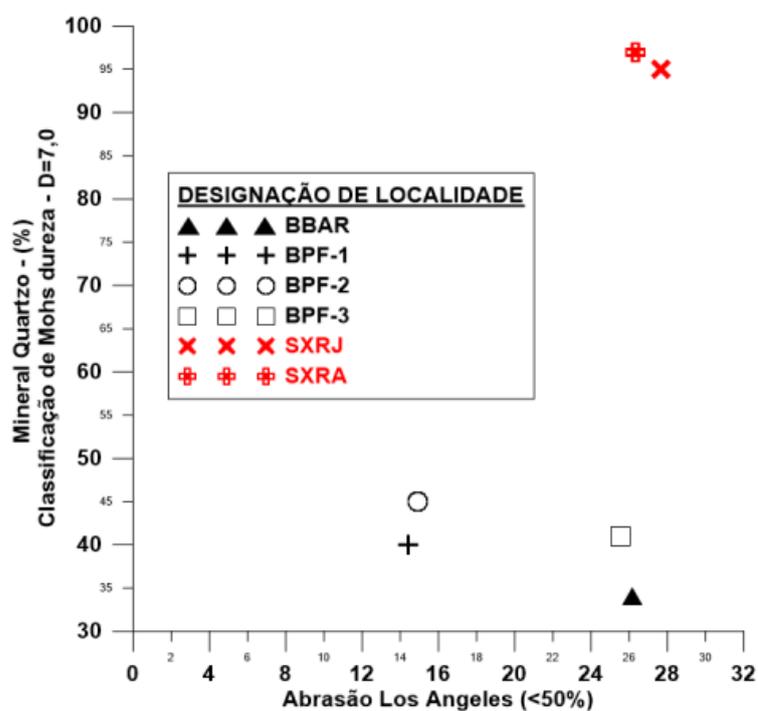


Figura 59. Resultado do ensaio de composição mineralógica e Resistência a abrasão Los Angeles.

Fonte: Próprio autor (2019)

De forma similar ao item 4.5.8 à medida que a presença do mineral quartzo se faz presente na composição da rocha, a carga necessária para produzir material fino, passante na peneira 2,38 mm, tende a ser maior. Esse fenômeno pode ser visto na amostra BBAR (Figura 60), cuja presença de quartzo é de 36% e a carga aplicada foi de 170 kN, enquanto na amostra SXRA a carga foi de 425 kN devido à presença predominante de quartzo em média de 96%.

Nesse ensaio há uma simulação da interação entre as partículas internamente na mistura asfáltica, pois no ato da compactação in loco os grãos fraturam e podem alterar propriedades físicas e mecânicas com a produção de material fino que antes não existira.

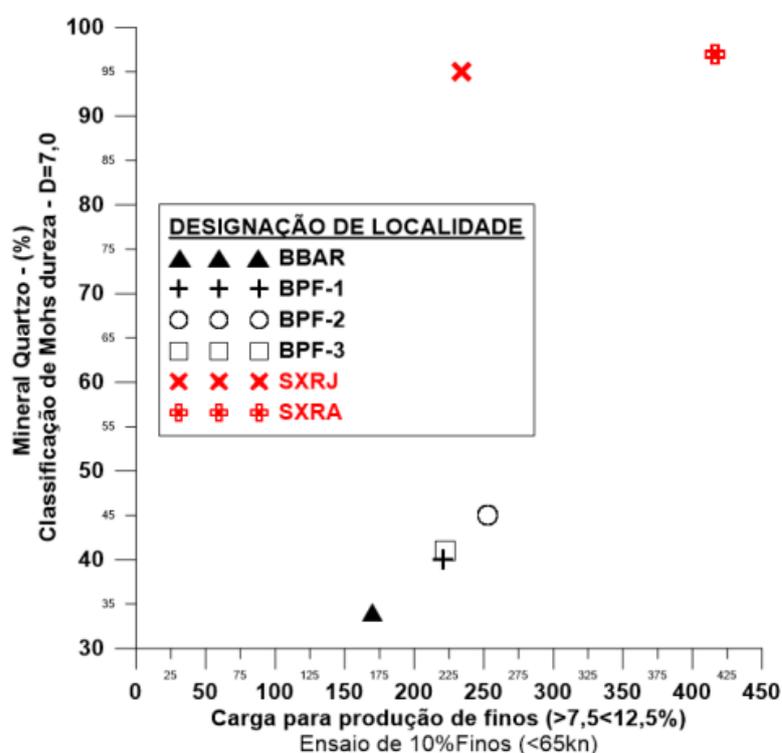


Figura 60. Resultado do ensaio de composição mineralógica e resistência pelo Método de 10% finos.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2019)

Pela Figura 61 infere-se que os resultados da apreciação mineralógica, influenciou no ensaio de esmagamento, principalmente, devido a presença do quartzo, que na BBAR apresentou 36% em massa e a BPF-3 40%, sendo suas perdas em média de 26% e 25%, respectivamente. Já o percentual do quartzo no BPF-1 foi de

41% seguido do BPF-2 com 45%, do SXRA igual a 96% e o SXRJ com 97%, e por terem presença maiores, suas respectivas perdas foram menores em média de 16%, 14%, 18% e 24%.

Esses valores demonstram uma isolada e aparente influência da composição mineral no resultado de resistência ao esmagamento dos grãos, pois ficou evidenciado que além da composição mineral, a forma das partículas também podem exercer parcela de contribuição na degradação química, visto que forma cúbica e angular das britas BBAR e BPF-3 manifestaram uma maior coesão entre as partículas internamente e conseqüentemente, uma reação a carga. Essa atuação se dá de forma rápida e enérgica, devido a forma cúbica proporcionar poucos vazios, fazendo com que a degradação fosse mais intensa.

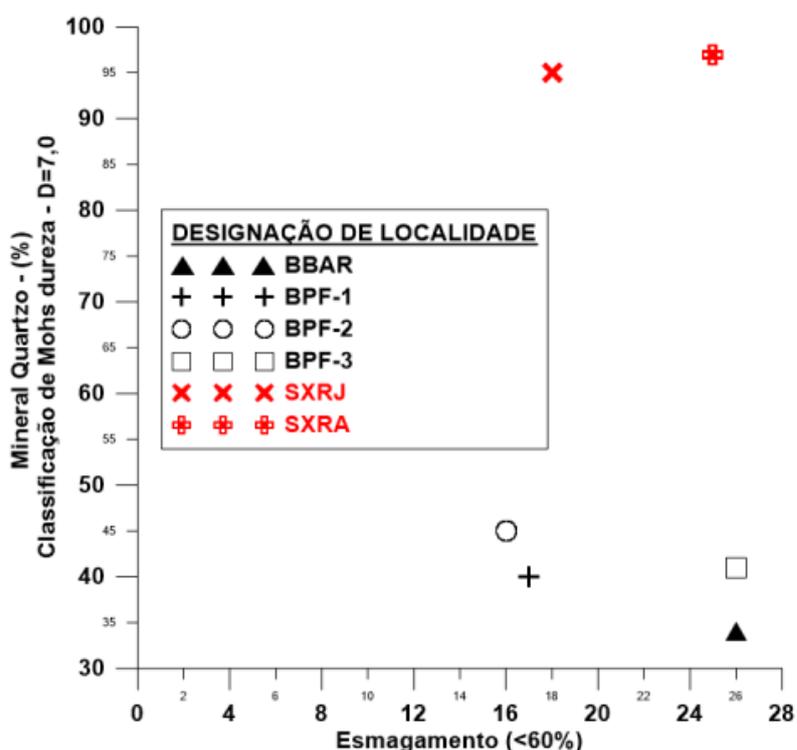


Figura 61. Resultado do ensaio de composição mineralógica e resistência ao esmagamento dos grãos.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2019)

De forma contrária, a forma lamelar e alongada tendem a fraturar com mais facilidade em função dos índices de vazios elevados entre essas partículas o que ocasiona uma absorção da carga atuante de forma lenta com reação em menor

intensidade devido ao preenchimento inicial desses vazios com as partículas que estão sendo fraturadas, justificando assim a menor degradação das amostras BPF-1 e BPF-2.

O seixo SXRA apesar de ser composto em sua totalidade por quartzo isso possui estrutura alterada e fraturada com base na apreciação mineral no item 4.2.

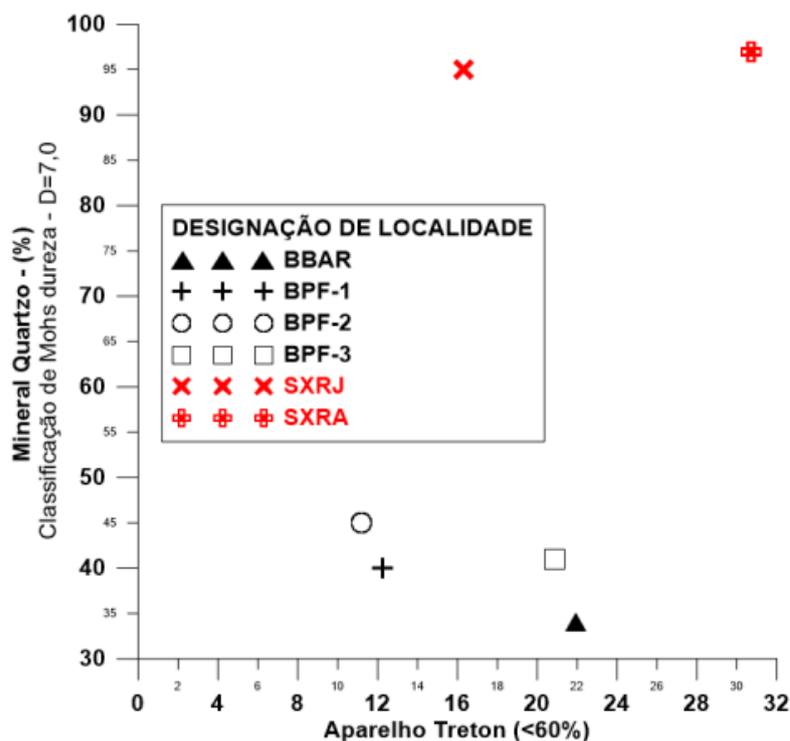


Figura 62. Resultado do ensaio de composição mineralógica e resistência ao impacto no Aparelho Treton.

\*Os dados apresentados contêm os resultados com base na média aritmética simples das amostras de brita nas granulometrias de B0, B1 e B2 além dos seixos, cujos valores individuais estão detalhados na tabela de ensaio tecnológico no Anexo I dessa pesquisa.

Fonte: Próprio autor (2019)

Na Figura 62 a brita BBAR com 22% de perda de massa possui uma presença de 35% de quartzo, enquanto que, na amostra BPF-2 com 45% de quartzo a perda de massa foi de 11%. Esses valores apresentam uma correlação entres esses parâmetros de proporcionalidade, isto é, quanto menor a presença de quartzo (no caso das britas) menor será a resistência e maior a perda de massa. No caso dos resultados obtidos para o SXRA, composto por cerca de 95% de quartzo, sua perda de massa foi cerca 27% maior que as demais amostras, devido sua estrutura microscópica não coesa (alterada e fraturada) obtido na apreciação petrográfica no item 4.2.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tomando por base o objetivo global que norteou essa pesquisa, todas as amostras foram devidamente caracterizadas em suas propriedades físicas e mecânicas além da apreciação da composição mineralógica e química. A partir das análises foi possível definir as propriedades técnicas e geoquímicas das rochas, que dão origem ao material objeto dessa pesquisa (britas e seixos).

Ficou constatado, que não houve nenhuma restrição em relação a aplicabilidade das amostras de brita, ao contrário dos seixos, que obtiveram restrição parcial, visto que, os resultados foram insatisfatórios ou fora dos parâmetros normativos para o índice de forma, textura superficial lisa/polida e a adesividade, sendo essa última devido a composição química classificada como rocha ácida.

Com relação a composição mineralógica, diversos agregados, ainda que sejam, de uma mesma origem geológica, podem apresentar características divergentes em relação a porosidade, rugosidade, absorção, textura e angularidade, o que ocorreu com as britas BPF-1 e BPF-2 (FURLAN et. al, 2004). A característica fésica das rochas analisadas, é justificada pela composição mineral, ou seja, rocha que possui teor elevado de sílica, baixo de ferro e magnésio, acabam por conferir coloração muito próxima da clara, em função, da maior ou menor presença de minerais escuros a base de ferro-magnesianos (RIKER et al, 2016).

Na caracterização tecnológica ficou evidente que a interferência do índice de forma das britas BPF-1 e BPF-2, não foi o protagonista na perda de massa por degradação mecânica, se comportando de forma diferente do previsto para a forma lamelar e alongada, sendo superiores as demais rochas, cuja forma foi a cúbica.

Com relação ao teor de material pulverulento, sugere-se a incorporação do teor acima de 1% da BBAR pois, de acordo com a literatura, a porção abaixo desse valor, pode melhorar a adesividade, a trabalhabilidade, a redução dos poros dos agregados e a redução de vazios dos esqueleto mineral, ao passo que, teores elevados de finos, afetam a estabilidade da mistura e o contato entre as partículas maiores (BERNUCCI et al., 2008).

No ensaio de adesividade com ligante asfáltico, o desempenho dos seixos, foi insatisfatório, o que já era esperado dadas as suas características geoquímicas, pois segundo Bernucci et. al, (2008), agregados com predominância de quartzo (sílica) como os granitos e os seixos possuem caráter eletronegativo, e ambos na sua maioria, requer atenção maior, pois, esse tipo de ligação é prejudicial para a aderência ligante/agregado.

Em sua pesquisa, Meurer (2015) cita que é comum a utilização de melhorador de adesividade nesse tipo de agregados, para fornecer uma adesividade satisfatória, em condições habituais in loco (de campo).

Os ensaios de resistência mecânica das britas demonstraram bons resultados, com destaque para a brita BPF-2, que apresentou a menor degradação e os seixos SXRA e SXRJ com as maiores perda de massa. Esses resultados expõem os seixos a um questionamento de que, não apenas a composição mineral prevaleceu, devido ambos terem 96% de quartzo (dureza 7), mas sim, o conjunto todo, incluindo as condições de estrutura, textura e coesão dos grãos, além é claro dos parâmetros físicos de índice de forma e textura superficial. Rochas com características minerais de estrutura alterada não coesas e com textura lisa e arredondada tendem a se degradar mais, o que ocorreu nos seixos.

Com relação a absorção e o teor de umidade, todos os resultados foram ótimos, ou seja, bem baixos, demonstrando assim, que as rochas dessa pesquisa possuem baixa susceptibilidade a água e a sais, sem significativo potencial de deterioração dos minerais sob oxidação e ou lixiviação. Esses teores baixos, significam que consumo de ligante asfáltico também será baixo, em uma relação de proporcionalidade, de modo que quanto menor o teor de umidade menor o consumo e menor a taxa de degradação química.

Nesses parâmetros, ou seja, teor de umidade, absorção e de porosidade a brita BPF-2 foi a que obteve os melhores e menores índices.

A correlação entre os resultados porosidade e massa específica, expôs um panorama de interdependência, visto que nessa pesquisa, quanto maior foi o teor de porosidade, menor foi a MER e MEA das rochas.

De forma análoga, a porosidade, também deteve lugar de destaque nos índices de absorção e umidade, pois à medida que o teor de porosidade das rochas variava para maior, a absorção também aumentava de forma proporcional.

Ainda, na mesma linha de raciocínio, a degradação química dos grãos foi maior e a resistência mecânica de abrasão, impacto, esmagamento e 10% de finos forma menor, nas amostras, cuja porosidade foi também maior.

As características de composição mineral, evidenciou uma significativa influencia, nos ensaios de resistência mecânica, em que, as rochas analisadas que em sua composição, apresentaram proporção elevada de minerais de dureza elevada, nesse caso foi o quartzo, obtiveram bons resultados em termos de perda de massa por degradação mecânica.

De forma global, constatou-se, um desempenho realçado da brita BBAR, seguida da BPF-3, em que ambas rochas, obtiveram resultados superiores, em todas as análises físicas, químicas, mecânicas e mineralógica, em relação a BPF-1 e BPF-2 bem como dos seixos SXRA e SXRJ, tornando-as assim, a BBAR e a BPF-3, como as mais tecnicamente aplicáveis, seguida da BPF-1, BPF-2, SXRA e SXRJ,. com base nos resultados de caracterização tecnológica e de apreciação geoquímica.

De certo, com base nessa pesquisa, conclui-se que, as propriedades tecnológicas e geoquímicas dos agregados graúdos, podem influenciar no desempenho em termos de resistência, durabilidade dos pavimentos rodoviários ao qual eles estiverem inseridos, quando aplicados em desconformidade com suas propriedades, além é claro, de proporcionar um bom dimensionamento em termos de qualidade e quantidade desses e de outros componentes.

## **5.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

- Analisar o comportamento mecânico de resistência a tração, estabilidade e fluência de misturas asfálticas contendo s agregados da região de estudo;
- Correlacionar os resultados de caracterização tecnológica obtidos nessa pesquisa com os parâmetros da mistura asfáltica para avaliar a influência dos agregados no esqueleto mineral e na dosagem, no comportamento mecânico de fadiga, deformação permanente;
- Avaliar o índice de reação álcali agregado das amostras em estudo e a influência desse parâmetro na adesividade de misturas asfálticas.

## 6 REFERÊNCIAS

### 6.1 NORMAS APLICADAS

Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT. Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto - NBR 7389: 1992.

\_\_\_\_\_ABNT. Rochas para revestimento – Análise petrográfica - NBR NM 12.768: 1992, 1992.

\_\_\_\_\_ABNT. Norma Brasileira - NBR 7211 – Agregados para Concreto – Especificação, 11 págs., Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ ABNT. NM – Agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis - NBR 7218 –. Rio de Janeiro, 1987;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 26 – Agregados – Amostragem, 10 págs., Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_ – NBR NM 27 – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, 7 págs., Rio de Janeiro, 2001;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 45 – Agregado em Estado solto - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 8 págs., Rio de Janeiro, 2006;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 46 – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75nm, por lavagem, 6 págs., Rio de Janeiro, 2003;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica, 8 págs., Rio de Janeiro, 2003;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 53 – Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 8 págs., Rio de Janeiro, 2009;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 9939 – Agregados - Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio, 3 págs., Rio de Janeiro, 2011;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 51 – Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles", 6 págs., Rio de Janeiro, 2001;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 7809 – Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio, 3 págs., Rio de Janeiro, 2008;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 9938 – Agregados — Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos — Método de ensaio, págs., Rio de Janeiro, 2013;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 12583 – Agregado graúdo - Determinação da adesividade ao ligante betuminoso, 2 págs., Rio de Janeiro, 2003;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 15577 – Reatividade álcali-agregado, 2 págs., Rio de Janeiro, 2018;

\_\_\_\_\_ – NBR NM 7389 – Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 2: Agregado graúdo, 5 págs., Rio de Janeiro, 2009;

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNIT, DNER-ME- 096, Agregado graúdo - avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos, 1998.

\_\_\_\_\_ – DNIT, DNER-ME- 399, Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton, 1999.

\_\_\_\_\_ – DNIT, DNER-ME- 089, Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio, 1995.

## 6.2 LITERATURAS

AIREY, Gordon; Hunter, Alistair e Collop, Andrew. ***The Effect of Asphalt Mixture Gradation and Compaction Energy on Aggregate Degradation.*** Construction and Building Materials, Nottingham Centre for Pavement Engineering, University of Nottingham, Nottingham, NG7 2RD, UK - Volume 22, 972–980, 2008.

ALVES, Victor Augusto Hilquias Silva.; Barroso, Emilio Velloso.; Motta, Laura Maria Goretti da. ***Avaliação de agregados da região Metropolitana do Rio de Janeiro por técnicas digitais de imagens.*** Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2015.

Agencia Nacional de Mineração – ANP, ***Anuário Mineral Brasileiro.*** Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-2010>>. anuario dnpm pg 115>. Acesso em 20 de agosto de 2018.

ALHADAS, Jacques Medina de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. Mecânica dos pavimentos. **Rio de Janeiro: Editora UFRJ**, v. 2, 1997.

ALHADAS, Medina Jacques; Motta, Laura Maria Goretti da. ***Mecânica dos pavimentos.*** 2ª edição. Editora UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 2005.

ALHADAS, Miguel Fernando Schettini. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Belo Horizonte, 2008.

AHLRICH, Randy. **Influence of Aggregate Properties on Performance of Heavy-Duty Hot-Mix Asphalt Pavements**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V. 1547, p. 7-14. DOI: 10.3141/1547-02- (1996).

AMORIM, Nailde Coelho; ALMEIDA, Marconi Oliveira de; SOUSA, José Getulio Gomes de. **Identificativo and Determination of Physical Characteristics of Aggregates Juazeiro (BA)/Petrolina (PE)**, 2009. Anais do 52<sup>a</sup> Congresso Brasileiro de Concreto – Revista IBRACAON, 2009.

ATHENS, S. B. United States Patent Number 7655088b2: **Synthetic aggregates comprising sewage sludge and other waste materials and methods for producing such aggregates**. [s.l: s.n.]. v. 2.

AMORIM, Nailde Coelho; ALMEIDA, Marconi Oliveira de; SOUSA, José Getulio Gomes de. **Identification and Determination of Physical Characteristics of Aggregates Juazeiro**. Anais do IBRACON, 52<sup>o</sup> congresso brasileiro de concreto n. 1, p. 1–15, 2009. In portuguese.

BACK, Ana H.elen. **Macroanálise de uma Jazida de rocha em Santa Maria/RS e caracterização de seu material granular**. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de tecnologia do curso de Graduação em Engenharia civil. Santa Maria, RS, 2015. 2015.

BASTOS, Gerson Alves. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, p. 247, 2010.

BERNUCCI, Liedi Bariane; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa e MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras. ABEDA, Rio de Janeiro, 2008. v. 3, p. 558, 2008.

BESSA, Iuri Sidney; SOARES, Jorge Barbosa, BRANCO, Verônica Castelo. **Análise da influência do tamanho nas propriedades de forma de agregados analisados através do processamento digital de imagens**. 8<sup>o</sup> Congresso Brasileiro

de Rodovias e Concessões, Santos, SP. In Portuguese. Universidade Federal do Ceará Departamento de Engenharia de Transportes, n. 1996, p. 15, 2001.

BIAVA, Leonardo Rovaris; STEINER, Luiz Renato. **Análise de agregados por meio da determinação do dano por umidade induzida e adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso**. Trabalho de conclusão do curso de graduação em Engenharia civil. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. p. 1–17, 2015.

BASTOS, Gerson Alves. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas para pavimentos flexíveis**. 2010. Tese de Doutorado. PUC-Rio, 2010.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos, 2015.

BASÍLIO, Eduardo S. **Agregados para concreto**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1995.

BERNUCCI, Liedi Légis Bariane, Motta, Laura Maria Goretti da CERATTI, Jorge Augusto Pereira e SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, v. 504, 2008.

BESSA, Iuri Sidney; SOARES, Jorge Barbosa, BRANCO, Verônica Castelo. **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, Santos, SP. In Portuguese. 2013.

BIAVA, Leonardo Rovaris; STEINER, L. R. **Análise de agregados por meio da determinação do dano por umidade induzida e adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso**- UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2017.

BESSA, Iuri Sidney; SOARES, Jorge Barbosa, BRANCO, Verônica Castelo. **Avaliação da Resistência ao Polimento e a Degradação de Agregados Utilizando a Abrasão Los Angeles e o Processamento Digital de Imagens**. In: 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz Do Iguaçu. 2011.

BESSA, Iuri Sidney; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo; SOARES, Jorge Barbosa. **Avaliação da resistência ao polimento e à degradação de agregados utilizando a abrasão los angeles e o processamento digital de imagens**. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia de Transportes Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, 2005.

BESSA, Iuri Sidney; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo; SOARES, Jorge Barbosa. ***Avaliação da Resistência ao Polimento e a Degradação de Agregados Utilizando a Abrasão Los Angeles e o Processamento Digital de Imagens***. In: 7o Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz Do Iguaçu. 2011.

BUDNY, Jaelson. ***Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas***. Dissertação de Mestrado em Engenharia civil da Universidade do Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro – RJ, 2012.

CABRAL, Aline Magalhães. ***Comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregado sinterizado de argila modificadas por nanomaterial de multicamadas de grafeno***. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas. Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais. p. 0–130, 2017.

CAMPOS, Edson Esteves, FRAZÃO, E. B., CALAES, G. D., & HERRMANN, H. (2007). Org.: Tannús, MB; Do Carmo, JCC. ***Agregados para a construção civil no Brasil: contribuições para formulação de políticas públicas***. Belo Horizonte: CETEC. 2007.

CAMPOS, Arlene Maria Lamêgo da Silva e CAMPELO, Nilton de Souza. ***O efeito da temperatura de queima no agregado sintético de argila calcinada, aplicado em concreto asfáltico***. Dissertação de Mestrado em Engenharia civil. Universidade Federal do Amazonas. September, p. 159, 2008.

CAVALCANTE, Daiana Góes; CRISÓSTOMO, Pedro Henrique da Silva; Lourdes Cristina Porfirio da Silva; SOUZA, Reginaldo José Queiroz de; GUIMARÃES, Daniela Muniz D'Antona, e FROTA, Consuelo Alves da. ***Visual Survey of pathologies in city of Manaus-Am, Teoria e Prática na Engenharia Civil***, n.19, p.77-87, Maio, 2012 v. Maio, n. 19, p. 77–87, 2012. (in portuguese).

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. ***Pesquisa CNT de rodovias 2017: Atual Conjuntura do transporte***. Investimentos. p. 1–4, 2018.

CUNHA, Marcos Bottene; GOUVEIA, Lílian Taís de; JÚNIOR, José Leomar Fernandes; MOTTA, Laura Maria Goretti da. ***Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do método bailey***. 18º Congresso de pesquisa e ensino dos transportes. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil – COPPE, Rio de Janeiro, p. 115–126, 2014.

CAMPELO, Nilton de Souza; Campos, Arlene Maria Lamêgo da Silva e Aragão, Aroldo Figueiredo. **Comparative analysis of asphalt concrete mixtures employing pebbles and synthetic coarse aggregate of calcined clay in the Amazon region**. International Journal of Pavement Engineering, 2017.

CHANG, M.K.; CHEN, J.; LIN, K.Y. **Influence of coarse aggregate shape on the strength of asphalt concrete mixtures**. Journal of the eastern asia society for transportation studies, VOL. 6, PP. 1062 – 1075, 2005.

CUNHA, Marcos Bottene; GOUVEIA Lilian Tais de; JÚNIOR, José Leomar Fernandes e MOTTA, Laura Maria Goretti da (2004). **Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do método Bailey**. In: XVIII congresso de pesquisa e ensino em transportes, anpet, Florianópolis, SC.

CURTIS, Christine; ENSLEY, Keith; EPPS, Jon. **Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption**. National Academy of Science. Washington, DC: National Research Council, 1993.

FRASCÁ, Maria Heloise Barros de Oliveira. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 2003.

FRAZÃO, ELY BORGES. **Tecnologia de rochas na construção civil** – São Paulo: ABGE, 2002.

FRAZÃO, ELY BORGES. **Tecnologia para a produção e utilização de agregados**. IN: Edson, 2002.

FRAZÃO, Ely Borges. **Tecnologia para a produção e utilização de agregados**. In: Edson Esteves Campos et al. Agregados para a construção civil no Brasil: contribuições para formulação de políticas públicas. Belo Horizonte: CETEC, 2007. p. 25-74.

FRAZÃO, Ely Borges. **A importância das características tecnológicas da pedra para lastro ferroviário**. Solos e Rochas, São Paulo, v. 10, n.3, p. 11-20, 1987.

FRAZÃO, Ely Borges; PARAGUASSU, Antenor Braga. **Materiais Rochosos para Construção**. In: Antônio Manoel dos Santos Oliveira; Sérgio Nertan Alves de Brito. (Org.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 1998, v. único, p. 331-342.

FRAZÃO, Ely Borges; QUITETE, E. B. **Ensaio tecnológicos em pedra britada para lastro ferroviário**. 1998.

FERNANDES, Maria Isabel Gonçalves. **Caracterização petrográfica , química e física de agregados graníticos em betões**. Estudo de casos de obra. Departamento de geologia. Faculdade de ciências Universidade do Porto. 2005.

FILASCO, Thiago Bauer; STEINER, Luiz Renato. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas utilizando seixo como agregado pétreo**. Trabalho de conclusão de curso - TCC. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2006.

FURLAN, A. P; GOUVEIA, L. T. de; FABBRI, G. T. P e FERNANDES, J. L. Júnior. **Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas**. 17º encontro de asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, n. April, 2004.

GARRIDO, R.; BALBO, José Tadeu. **Deformações permanentes em mistura asfáltica reciclada**. In: 9º Congresso Ibero-Latino Americano del Asfalto. Asunción-Paraguay. 1997.

GOLALIPOUR, Amir; JAMSHIDI, Ehsan; NIAZI, Yunus; AFSHARIKIA, Zahra e KHADEM, Mahmood. **Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements**. SIV – 5th international congress – sustainability of road infrastructures, 2012.

xGALALIPOUR, Amir; JAMSHIDI, Ensan; NIAZI, Yunus; AFSHARIKIA, Zahra; KHADEM, Mahmood. (2012) **Effect of Aggregate Gradation on Rutting of asphalt Pavements**. Procedia - Social and Behavioral Science. V. 53, p. 440-449. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.895.

GOUVÊA, P. H. V. A. **Exploração de Minerais Aplicados à Construção Civil na Região Metropolitana de Manaus e Alguns Aspectos Ambientais**. Centro de Estudos Superiores para a Exploração de Minas e Pedreiras à Céu Aberto. CESECO, 2001.

HICKEL, Guilherme Cardoso; Boaventura, Giovane Carlos; Souza, Rafael Andrade de; Calçada, Luciana Maltez; Casali, Juliana Machado; Betioli, Andrea Murilo; Oliveira, Alexandre Lima de. **Influence of crusher type in the shape of fine crushed aggregate grains**. Revista IBRACON de materiais e estruturas, v. 11, n. 4, 2018 (In portuguese).

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R.B. **Aggregate tests for hot mix asphalt: state of the practice in North America**. proceedings, Canadian technical asphalt association, vol XLII, November, 1997 (L).

LEAL, Sara Manuela Farias. **Carcterização petrográfica de agregados sedimentares e metamórficos para betão**. Dissertação de mestrado, 2012. 182 p. (Mestrado em geologia) – Faculdade de ciências da Universidade do Porto. Porto, 2012.

LITTLE, Dallas N.; EPPS, Jon e SEBAALY, Peter. **The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. Arlington (Virginia, USA)**: National Lime Association, 2006.

MALYSZ, Rodrigo. **"Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação"**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto alegre (L) (2004).

MASAD, E.; V. K. JANDHYALA; N. DASGUPTA; N. SOMADEVAN E N. Shashidhar (2002) **characterization of air void distribution in asphalt mixes using x-ray computed tomography**. Journal of materials in civil engineering, P 122-129.

MARRANO, Alberto; FRAZÃO, Ely Barbosa.; RODRIGUES, J. E.; PARAGUASSU, A. B. **Caracterização tecnológica das rochas basálticas da usina hidrelétrica de Canoas I, Rio Paranapanema, SP/PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, 1997.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melarango. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais**. 1. Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. 674 p.

MCGOVERN, Edwards Washignton. United States Patent Number 5762699 : **pavement aggregate treating composton**. n. 19, p. 3–7, 1994.

MEURER, Priscila. **Caracterização de materiais rochosos do norte de santa catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação**. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura), Curso de Graduação em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa catarina. Centro de Joinvile - SC. 2015.

MONTICELI, João Paulo; CACCIARI, Pedro Pazotto; SÍGOLO, Joel Batista e FUTAI, Marcos. M. **O uso da Análise Petrográfica e Micromorfológica na Determinação dos Graus de Alteração de um Maciço Rochoso Gnáissico**. In: Proceedings... Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Mecânica das Rochas e

Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento. Conferência Especializada ISRM. 2010.

MOORE, I. C.; GRIBBLE, C. D. ***The suitability of aggregates from weathered Peterhead granites***. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 13, n. 4, p. 305-313, 1980.

NEVES, Marion Freitas. ***Alterações hidrotermais em rochas paleoproterozóicas na região de Presidente Figueiredo, NE do Amazonas***. Dissertação de mestrado, 2016.

NEVES, Filho. Armando Siqueira. ***Avaliação de adição de dopes no comportamento de misturas asfálticas a quente***. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, 2006.

NEVILLE, Adam Matthews. ***Propriedades do concreto***. 2A. ED. PINI. São Paulo, 1997.

PAIVA, Danyel Flavio Lopes de. ***A influência do agregado graúdo na resistência mecânica e propriedades de fratura de um concreto para pavimentação rígida***. Dissertação de mestrado em engenharia civil - Universidade Federal do Rio grande do Norte, centro de tecnologia, departamento de engenharia. 2016.

PAIVA, Priscila Santos de. ***Caracterização e avaliação das propriedades geomecânicas para uso em pavimentação de agregados de rochas vulcânicas da porção central do Rio Grande do Sul***. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. 2017.

PALMA, Katherine Andrea León. ***Gênese e distribuição das silicificações nos paleossolos e rochas sedimentares aflorantes em Manaus***. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Amazonas. Instituto de ciências exatas programa de Pós-graduação em geociências. 2014.

PAZOS, Abraham Guerrero; SACRAMENTO, Francisco Thiago; MOTTA, Laura Maria Goretti da. ***Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas***. 44ª RAPV – reunião anual de pavimentação e 18º enacor – encontro nacional de conservação rodoviária. Foz do Iguaçu, PR. p. 147, 2015.

PERDIZ, Rogério Sales. ***Avaliação Da Utilização Do Granito Da Região De Moura do Município de Barcelos como agregado graúdo em concreto***.

Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de tecnologia. Programa de pós-graduação em engenharia civil. p. 128, 2009.

PERDIZ, Rogério Salles; VASCONCELOS, Raimundo Pereira de. ***Avaliação da utilização do granito da região de moura, como agregado graúdo, considerando as propriedades mecânicas do concreto.*** In: congresso brasileiro do concreto, 50°, 2008, Salvador.

PINTO FILHO, Washigton Luiz e CAMPELO, Nilton de Souza. ***Avaliação e diagnóstico de vias urbanas expressas de manaus: condições estruturais e funcionais.*** Dissertação de Mestrado de Engenharia civil. Universidade Federal do Amazonas, faculdade de tecnologia, Programa de pós - graduação em engenharia civil. 2013.

PINTO, Isaac Eduardo. ***Estudo das características físicas e mecânicas de misturas recicladas com espuma de asfalto.*** São Paulo: Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002 (L).

PINILLA, A. S. ***Aderência entre betumes asfálticos e agregados pétreos.*** Conselho Nacional de Pesquisa. IPR, Rio de Janeiro, 1965.

PHILPOTS, ANTHONY; AGUE, JAY; WINTER, J. ***Principles of igneous and metamorphic petrology.*** University Cambridge Press, New York, EUA. Pearson new international edition, second edition, 2010.

REIS, Nelson Joaquim; FERREIRA, Amaro Luiz. ***Geologia e recursos minerais do Estado do Amazonas.*** 2006.

RENNER, Leonardo Cardoso. ***geoquímica de sills basálticos da formação serra geral, sul do brasil, com base em rocha total e microanálise de minerais.*** Tese de doutorado (doutorado em ciências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 226 p, 2010.

RIKER, Silvio Roberto Lopes; LIMA, Felipe José da Cruz; MOTTA, Marcelo Batista; SILVA, Desaix Paulo Balieiro. ***Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus do estado do Amazonas.*** CPRM-Manaus, 2016.

ROBERTS, Freddy; KANDHAL, P.S.; BROWN, R.E.; LEE, D.; KENNEDY, T.W. ***Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.*** NAPA. Maryland, USA, 1996.

ROBERTS, Freddy; P. S. Kandhal; E. R. Brown; D. Y. Lee e T. W. Kennedy (1991) ***Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction***. Ed. NAPA Education Foundation. Lanham, Maryland, 1991.

SANTOS, Caroline Couto. mobilidade ***de elementos químicos no perfil de solo e seu controle na prospecção geoquímica: aplicação na região de Santa Maria da Vitória, BA. Mobilidade de elementos químicos no perfil de solo e seu controle na prospecção geoquímica***. Dissertação de mestardo. Universidade de Brasília. Instituto de geociências. DF, 2014.

SARGES, Roseane Ribeiro. ***Relações entre as estruturas tectônicas, sedimentação coluvial e geomorfogênese da região de Manaus, Amazonas***. Instituto de Geociências,. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP. v. Ph.D. São Paulo-SP, 2007.

SANDERS, C. A. e L. Dukatz (1992) ***Evaluation of Percent Fracture of Hot Mix Asphalt Gravels in Indiana***. In: Meininger, R. C. (ed.) Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

SENÇO, Wlastermiler de. ***Manual de técnicas de pavimentação***. 1ªED. São Paulo, V.1, P.746, 1997.

SILVA, P.D.E.A. ***Estudo do reforço de controle de cimento portland (whitetopping) na pista circular experimental do instituto de pesquisas rodoviárias***. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de janeiro, 2001.

SILVA, Clauzionor Lima. ***Análise da tectônica cenozóica da região de Manaus e adjacências***. 2005. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 30.11. 2005 (L).

SILVA, Eduardo Souza da e CAMPELO, Nilton de Souza. ***Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus***. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Amazonas faculdade de tecnologia programa de pós – graduação em engenharia civil. 2013.

SILVA, Marcelino Aurélio Vieira da. ***Comportamento de misturas asfálticas a quente utilizando agregado de argila calcinada***. 2006.

SIMAS, Lídici Pomin de; MAGALHÃES, Patrícia Aragão Valença; FROTA, Consuelo Alves da. ***Análise superficial de revestimentos do tipo areia asfalto no município de Manaus – AM***. EBSCO, 2015.

SIMÕES, Matheus S; MELONI, Raul E.; BENEVIDES FILHO, Paulo R. R.; LISBOA, Tomas M. **Revisão da Estratigrafia do Sudeste do Amazonas**. Diretoria de Geologia e Recursos Minerais. Departamento de Geologia Superintendência Regional de Manaus. Gerência de Geologia e Recursos Minerais. n. April, 2018.

SOUZA, Andréa Cristine. **Litogeoquímica e química mineral das rochas félsicas e máficas aflorantes entre os km 151-155 da br 174, município de presidente figueiredo (AM)**. Dissertação de mestrado. Universidade federal do Amazonas. Instituto de Ciências exatas, 2012.

STAUDT, Alcinei; BERTOLDI, Loivo. **Caracterização de agregados graúdos disponíveis na região extremo oeste de santa catarina, utilizados na dosagem de concreto**. Anuário pesquisa e extensão. Seminário de iniciação científica da UNOESC de São Miguel do Oeste, ISSN 2237/6593, 2016.

STAKSTON, Anthony D.; BAHIA, Hussain U. **The Effect of fine Aggregate angularity, asphalt content and performance graded asphalt on hot mix asphalt performance**. WisDOT Highway Research Study 0092-45-98, 2003. Disponível em: < minds.wisconsin.edu/handle/1793/6859 >. Acesso em: 14/08/2019.

VAVRIK, William R; HUBER, G.; PINE, W. J e CARPENTER, S. H. **Bailey method for gradation selection in HMA mixture design**. Transportation Research Circular No. E-C044. Transportation Research Board, Transportation Research Record, Circular nº. E-C044, 2002.

WOJAHN, Rael Ernani. **Caracterização geológica-geotécnica de duas jazidas utilizadas para construção civil localizadas no batólito de Pelotas/RS**. Trabalho de conclusão de curso - TCC. Universidade Federal do Pampa. Curso de graduação em geologia, pelotas/RS, 2018.

WANKE, PETER. **Logística e transporte de cargas no brasil: produtividade e eficiência no século XXI**. São Paulo: atlas, 2010.

## 7 ANEXO I

Tabela 10. Resultados geral da caracterização tecnológica: Parâmetros físicos.

NOMENCLATURA	AMOSTRAS	Ensaio físico com média de 3 séries por amostras												
		Massa específica NBR NM 53/2003	Absorção NBR NM 53/2009	Granulometria NBR NM 248/2003	Massa unitária sol. E compacto. NBR NM 45/2006	Teor de material pulv. NBR NM 46/2003	Teor de argila NBR 7218/2010	Teor de umidade NBR NM 9939/1987	Índice de forma NBR 7809/2008	Adesividade NBR 12583/2017	sanidade DNER ME 089/1994	UMIDADE INDUZIDA (Lottman) ASTHO 283	CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO	
ITEM/UNID		g/cm <sup>3</sup>	≤3%	CL	Solta Kg/dm <sup>3</sup>	Comp. Kg/dm <sup>3</sup>	≤ 1%	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3,0	CL	≤12 %	≥75%	CL
BBAR	Brita 0	2,628	0,37	B0	1,456	1,561	1,13	0,23	0,11	2,42	SF	7,90	81,3	AP*
	Brita 1	2,608	0,40	B1	1,470	1,590	1,26	0,21	0,11	2,51	SF			AP*
	Brita 2	2,639	0,34	B2	1,434	1,537	1,14	0,18	0,13	1,99	SF			AP*
BPF-1	Brita 0	2,627	0,49	B0	1,448	1,511	0,21	0,41	0,20	3,15	SF	9,37	75,5	AP*
	Brita 1	2,665	0,48	B1	1,488	1,581	0,26	0,36	0,22	2,65	SF			AP*
	Brita 2	2,591	0,52	B2	1,388	1,460	0,50	0,30	0,17	3,02	SF			AP*
BPF-2	Brita 0	2,610	0,24	B0	1,373	1,469	0,47	0,21	0,10	3,01	SF	4,70	79,8	AP*
	Brita 1	2,613	0,29	B1	1,367	1,469	0,38	0,17	0,18	2,78	SF			AP
	Brita 2	2,606	0,20	B2	1,386	1,509	0,97	0,13	0,09	2,45	SF			AP
BPF-3	Brita 0	2,581	0,52	B0	1,705	1,805	0,50	0,29	0,17	2,47	SF	5,50	89,3	AP
	Brita 1	2,586	0,49	B1	1,722	1,840	0,37	0,19	0,13	2,45	SF			AP
SXRJ	seixo	2,42	1,08	B1	1,970	2,010	0,23	0,25	0,15	1,41	INSF	10,3	52,3	AP*
SXRA	Seixo	2,572	0,49	B0	1,778	1,855	0,23	0,17	0,27	1,36	INSF	6,25	70,1	AP*

AP= aplicável em concreto asfáltico; AP\*= aplicável com readaptação conforme sua característica em concreto asfáltico; RDN= redondo; SRD= Subarredondado; CL= Classificação; INSF= Insatisfatório; SF= Satisfatório; B0= brita n°0; B1= brita n°1; B2= brita n°2; g/cm<sup>3</sup>= gramas por centímetro cúbico; kg/dm<sup>3</sup>= quilogramas por centímetro cúbico; %= porcentagem; c/e= razão entre comprimento e espessura; x= sem análise; BBAR= Britamazon; BPF-1=Brita Mercês; BPF-2= Brita Samaúma; BPF-2=Brita Santa Fé; SXRJ=Seixo Japurá e SXRA= Seixo Apuí.

Tabela 11. Resultados obtidos com ensaios físico-mecânicos das amostras de brita e grão sedimentar (seixo) rolado respectivamente

Ensaio de caracterização mecânica dos agregados graúdos					
Nomenclatura dos ensaios físico-mecânicos (média de 3 séries)					
Nomenclatura	Granulometria	Abrasão Los Angeles ≤ 50%	10% Finos (7,5%) ≥ 60 KN	Esmagamento dos grãos ≤ 60%	Aparelho Treton ≤ 50%
BBAR	B0	25,34	170	26	21,91
	B1	27,03			
	B2	26,08			
BPF-1	B0	14,02	221	17	12,26
	B1	13,11			
	B2	15,94			
BPF-2	B0	15,05	253	16	11,20
	B1	13,76			
	B2	14,21			
BPF-3	B0	23,50	221	26	20,89
	B1	20,53			
SXRA	GS	27,65	416	25	30,71
SXRJ	GS	26,33	234	18	16,32

GS=Grão sedimentar; B0= brita n°0; B1= brita n°1; B2= brita n°2; %= porcentagem; BBAR= Britamazon; BPF-1=Brita Mercês; BSU= Brita Samaúma; BPF-3=Brita Santa Fé; SXRA= Seixo Apuí; SXRJ=Seixo Japurá E kN= Quilo newton.

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 12. Resultados do ensaio de durabilidade por sulfato de sódio.

Amostras	Análise quantitativa	Análise qualitativa
	Degradação (%)	Macroscópica (visual)
<b>BBAR</b>	7,90	desintegração por quebra dos grãos e de seus minerais constituintes sem fendilhamento
<b>BPF-1</b>	9,37	
<b>BPF-2</b>	4,75	
<b>BPF-3</b>	5,41	
<b>SXRA</b>	6,25	Houve fendilhamento e quebra dos grãos por lascamento e esfarelamento
<b>SXRJ</b>	10,39	

Fonte: Próprio autor (2019)