

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

HUGO LEONARDO BARROS CUNHA

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DO AGREGADO SEIXO BRITADO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAUQ NO MARANHÃO**

São Luís
2016

HUGO LEONARDO BARROS CUNHA

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DO AGREGADO SEIXO BRITADO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAUQ NO MARANHÃO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

São Luís
2016

Cunha, Hugo Leonardo Barros.

Estudo sobre a utilização do agregado seixo britado em misturas asfálticas do tipo CAUQ no Maranhão / Hugo Leonardo Barros Cunha. – São Luís, 2016.

112 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

1. Pavimentação. 2. Mistura asfáltica. 3. Seixo. 4. Agregado.
5. Dosagem Marshall. I. Título.

CDU 625.85(812.1)

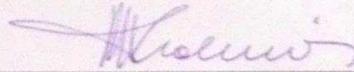
HUGO LEONARDO BARROS CUNHA

ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DO AGREGADO SEIXO BRITADO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAUQ NO MARANHÃO

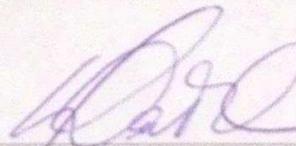
Monografia apresentada ao
curso de Engenharia Civil da Universidade
Estadual do Maranhão, para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 12 / 12 / 16

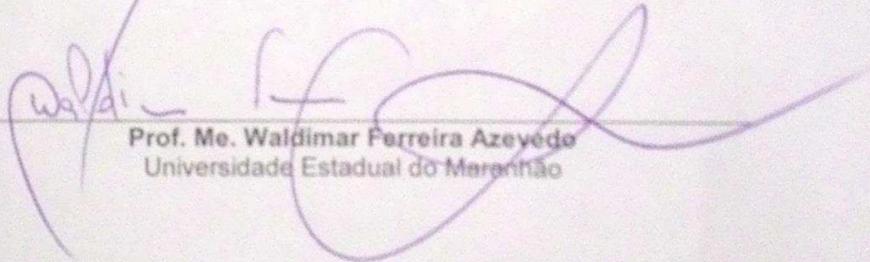
BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dr.ª Maria Teresinha de Medeiros Coelho (Orientadora)
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Me. Waldimar Ferreira Azevedo
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder saúde e forças para transpôr todas as dificuldades e alcançar meus objetivos.

Aos meus pais Francisco Carlos e Iraneide pelo amor, suporte e ensinamentos que foram fundamentais para que pudesse chegar até esse momento.

Aos meus irmãos Bruno e Elisa Gabriela pela amizade e apoio, bem como a minha namorada Jéssica que sempre esteve ao meu lado durante o curso me ajudando em tudo que esteve ao seu alcance.

Aos meus amigos da UEMA, especialmente a Anderson pela ajuda com os ensaios laboratoriais e a Márcia por ceder a cal utilizada no estudo.

A minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maria Teresinha pelo auxílio e disponibilidade para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos demais amigos e familiares que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação, o meu agradecimento.

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo fazer o estudo das propriedades físicas e mecânicas do seixo britado visando a aplicabilidade desse material em misturas asfálticas do tipo CAUQ, que poderão servir como camada de rolamento em estradas do estado do Maranhão. Inicialmente buscou-se embasar o estudo através de um levantamento bibliográfico referente aos diversos aspectos sobre a pavimentação, tipos e classificação dos pavimentos, asfalto e agregados. Num segundo momento foram realizados ensaios laboratoriais para fazer a caracterização do seixo britado e demais materiais, utilizando normas e métodos de ensaios amplamente reconhecidos, além de estudar os parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas asfálticas que utilizaram o seixo como agregado. Os resultados apresentados mostram que o agregado de seixo britado foram satisfatórios para uso em pavimentação, com exceção da adesividade e da absorção. Foram confeccionados corpos de prova com diferentes teores de ligante a fim de se fazer o estudo de parâmetros volumétricos e mecânicos, após a análise desses parâmetros foram feitas novas misturas utilizando o teor ótimo de ligante e em seguida submeteu-se tais misturas a ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Todos os resultados foram comparados as exigências das normas citadas, e finalmente fez-se a comparação das misturas asfálticas com seixo a misturas asfálticas analisadas no estudo de Nascimento (2015), que usou agregados de origem basáltica e granítica. Dessa forma concluiu-se que as misturas asfálticas com seixo britado apesar de não satisfazerem as exigências das normas citadas podem ser utilizadas desde que usando teores de ligante entre 6,5% e 7% . As misturas asfálticas com seixo britado quando comparadas às misturas com agregados basálticos e graníticos mostraram menor estabilidade e menor resistência à tração por compressão diametral.

Palavras-chave: Pavimentação. Mistura asfáltica. Seixo. Agregado. Asfalto. Revestimento. Dosagem Marshall.

ABSTRACT

The following work has as main objective to study the physical and mechanical properties of the crushed pebbles for the applicability of this material in asphalt mixtures of type CAUQ, which can serve as a rolling layer on roads in the state of Maranhão. Initially, the study was based on a bibliographical survey on the different aspects about paving, types and classification of pavement, asphalt and aggregates. Laboratory tests were then carried out to characterize the crushed pebble and other materials using widely recognized standards and test methods, besides studying the volumetric and mechanical parameters of the asphalt mixtures that used the pebble as aggregate. The results show that aggregate of crushed pebble were satisfactory for use in paving, with the exception of adhesiveness and absorption. Test specimens with different binder contents were made in order to study the volumetric and mechanical parameters, after the analysis, new asphalt mixtures were made using ideal binder content, and then subjected to a diametral compression tensile strength test. All the results were compared to the requirements of the cited standards, and finally the asphalt mixtures with pebbles were compared to the asphalt mixtures analyzed in Nascimento's study (2015) which used basaltic and granitic aggregates. Thus, it was concluded that asphalt mixtures with crushed pebbles, although not complying with the requirements of the cited standards, can be used provided that using binder contents between 6.5% and 7%. Asphalt mixtures with crushed pebbles compared to mixtures with basaltic and granitic aggregates showed lower stability and lower diametral compression tensile strength.

Keywords: Paving. Asphalt Mixture. Pebbles. Aggregate. Asphalt. Coating. Marshall Method

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Agência Nacional da Indústria de Pneumáticos
ANP	Agência Nacional de Petróleo, gás e Energia
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
cm	centímetro
cm ³	centímetro cúbico
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CP	Corpo de Prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
Eq	Equação
ES	Especificação de Serviço
g	gramas
g/cm ³	gramas/centímetros cúbico
Gmb	Massa específica aparente da mistura
h	horas
kgf	Quilograma-força
km	Quilômetros
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
LUBNOR	Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste
ME	Método de Ensaio
mm	milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
PPG	Programa de Pós Graduação
RBV	Relação betume/vazios

SSF	Segundo Saybolt-Furol
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios Com Betume
Vv	Volume de vazios

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrada típica do Império Romano	17
Figura 2 – Aspecto visual do seixo rolado	22
Figura 3 – Processo de formação de rochas sedimentares	23
Figura 4 – Camadas genéricas de um pavimento.....	25
Figura 5 – Camadas em um pavimento flexível	25
Figura 6 – Camadas em um pavimento rígido	26
Figura 7 – Camadas em um pavimento semi-rígido	26
Figura 8 – Classificação dos agregados	27
Figura 9 – Processo de britagem	32
Figura 10 – Britadores de mandíbula de 1 eixo (esquerda) e britador de mandíbula de 2 eixos (direita)	33
Figura 11 – Britador giratório	34
Figura 12 – Britador de impacto	35
Figura 13 – Britador de rolos	36
Figura 14 – Britador de cônico	36
Figura 15 – Agregados usados no estudo	43
Figura 16 – Sequência de peneiras utilizadas	44
Figura 17 – Resfriamento da amostra no ensaio de adesividade	46
Figura 18 – Material usado para ensaio de degradação Marshall	47
Figura 19 - Equipamento Rotarex utilizado na retirada do ligante asfáltico (a) amostra dentro do mesmo equipamento (b)	48
Figura 20 – Máquina “Los Angeles” (a) e amostra logo após o processo abrasivo (b)	50
Figura 21 – Amostra sobre pano absorvente após 24h de imersão em água	51
Figura 22 – Pesagem da amostra dentro do cesto metálico imersos em água	52
Figura 23 – Material retido nas peneiras de aberturas 19mm e 9,5mm	54
Figura 24 – Medição das amostras usando paquímetro digital	55
Figura 25 – Escoamento do material no ensaio de angularidade	57
Figura 26 – Provetas preenchidas com as amostras e a solução	58
Figura 27 – Pistão assentado sobre a amostra	59

Figura 28 – Picnômetro sendo aquecido (a) e controle da temperatura das amostras para pesagem de “C” (b)	60
Figura 29 – Figura 29 – Amostra seca (a), frasco Le Chatelier com querosene (b) e frasco preenchido com querosene e cal (c)	62
Figura 30 – Amostras de CAP logo após atingirem o fundo do suporte metálico	63
Figura 31 – Penetrômetro e amostra de CAP	64
Figura 32 – Viscosímetro Saybolt-Furol (a) e escoamento do CAP (b)	65
Figura 33 – Agregados pesados e secos	67
Figura 34 – Controle da temperatura de compactação (a), compactação do corpo de prova (b) e controlador de golpes (c)	68
Figura 35 – Medição das dimensões dos CP’s (a), pesagem hidrostática (b) e CP’s imerso em água a 60°C (c)	68
Figura 36 – Controle da temperatura dos CP’s (a), molde com frisos (b) e CP no momento do ensaio (c)	71
Figura 37 – Amostra do ensaio de adesividade após 72h submetida a uma temperatura de 40°C	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Classificação da qualidade do pavimento no Brasil	39
Gráfico 2 – Condições gerais das estradas do Maranhão	40
Gráfico 3 – Curva granulométrica seixo 1	73
Gráfico 4 – Curva granulométrica seixo 0	73
Gráfico 5 – Curva granulométrica pó de brita	74
Gráfico 6 – Curva granulométrica areia	74
Gráfico 7 – Curva granulométrica cal	74
Gráfico 8 – Determinação das temperaturas do CAP, agregados e de compactação	83
Gráfico 9 – Resultado do enquadramento na Faixa B	84
Gráfico 10 – Resultado para densidade máxima teórica (DMT)	85
Gráfico 11 – Resultado para densidade aparente (Gmb)	85
Gráfico 12 – Resultado para volume de vazios (V_v)	86
Gráfico 13 – Resultado para volume de vazio dos agregados minerais (VAM)	86
Gráfico 14 – Resultado para relação betume/vazio (RBV)	86
Gráfico 15 – Densidade máxima teórica (DMT) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito	87
Gráfico 16 – Densidade aparente (D_{ap}) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito	87
Gráfico 17 – Volume de vazios (V_v) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito	88
Gráfico 18 – Vazios dos agregados minerais (VAM) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito	88
Gráfico 19 – Relação betume/vazio (RBV) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito	89
Gráfico 20 – Resultado para estabilidade Marshall	90
Gráfico 21 – Estabilidade Marshall para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito	91
Gráfico 22 – Teor de ligante para estabilidade máxima	91
Gráfico 23 – Teor de ligante para máxima massa específica aparente	92
Gráfico 24 – Teor de ligante para volume de vazios de 4%	92

Gráfico 25 – Resistência à tração por compressão diametral para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito	93
Gráfico 26 – Resultados para viscosidade Saybolt Furol	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos estágios de britagem	56
Quadro 2 – Resultados para angularidade da areia	79
Quadro 3 – Resultados para angularidade do pó de brita	79
Quadro 4 – Resultados para ensaio IDML de agregados basálticos e graníticos	81
Quadro 5 – Resultados para ensaio IDM de agregados basálticos e graníticos	81
Quadro 6 – Resultados para o CAP	82
Quadro 7 – Enquadramento na Faixa B	84
Quadro 8 – Parâmetros volumétricos	85
Quadro 9 – Resultados para estabilidade e fluência	90
Quadro 10 – Resultados para resistência à tração	93
Quadro 11 – Granulometria do seixo 1	101
Quadro 12 – Granulometria do seixo 0	101
Quadro 13 – Granulometria do pó de brita	102
Quadro 14 – Granulometria da areia	102
Quadro 15 – Granulometria da cal	103
Quadro 16 – Massa específica real do pó de brita	105
Quadro 17 – Massa específica real da areia	105
Quadro 18 – Massa específica real da cal	105
Quadro 19 – Dimensão dos grãos do seixo 1	106
Quadro 20 – Granulometria do seixo 1	107
Quadro 21 – Resultados para ensaio de penetração	108
Quadro 22 – Resultados para ensaio de ponto de amolecimento	108
Quadro 23 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 5,0% de CAP	110
Quadro 24 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 5,5% de CAP	110
Quadro 25 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 6,0% de CAP	111
Quadro 26 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 6,5% de CAP	111
Quadro 27 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 7,0% de CAP	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições do pavimento das rodovias do Maranhão	40
Tabela 2 – Granulometria padrão para amostras do ensaio de degradação Marshall	46
Tabela 3 – Graduação das amostras para ensaio de abrasão “Los Angeles”	49
Tabela 4 – Resumo das massas específicas e absorção	75
Tabela 5 – Massas específicas e absorção de agregados de origem basáltica e granítica	75
Tabela 6 – Resultados para equivalente de areia	76
Tabela 7 – Resultados abrasão “Los Angeles”	78
Tabela 8 – Resultados abrasão “Los Angeles” para agregados de origem basáltica e granítica	78
Tabela 9 – Resultados para angularidade para agregados miúdos de origem granítica e basáltica	79
Tabela 10 – Resultados para ensaio IDML e IDM	80
Tabela 11 – Massa específica real, massa específica aparente e absorção do seixo 1	104
Tabela 12 – Massa específica real, massa específica aparente e absorção do seixo 0	104

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Título	18
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivos gerais	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 Justificativas	19
2. METODOLOGIA	20
2.1 Tipo de pesquisa	20
2.2 Organização do trabalho	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1 Rochas sedimentares	22
3.2 Pavimento	24
3.2.1 Tipos de pavimento	25
3.3 Agregados	27
3.3.1 Classificação dos agregados	27
3.3.1.1 Quanto à natureza	28
3.3.1.2 Quanto ao tamanho	28
3.3.1.3 Quanto à graduação	28
3.4 Asfalto	29
3.4.1 Histórico	29
3.4.2 Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP)	30
3.5 Britagem	31
3.5.1 Tipos de britadores	32
3.5.1.1 Britadores de mandíbula	32
3.5.1.2 Britadores giratórios	34
3.5.1.3 Britadores de impacto	34
3.5.1.4 Britadores de rolos	35
3.5.1.5 Britadores cônicos	35
3.6 Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)	37
3.7 Dosagem Marshall	37
3.8 Levantamento das rodovias do Brasil e do Maranhão	39
3.8.1 Rodovias do Brasil	39

3.8.2	Rodovias do Maranhão	40
4.	MATERIAIS, MÉTODOS E ATIVIDADES LABORATORIAIS	41
4.1	Considerações iniciais	41
4.2	Materiais e métodos	41
4.2.1	Concreto Asfáltico de Petróleo	41
4.2.2	Agregados graúdos	41
4.2.3	Agregados miúdos	42
4.2.4	Fíler	42
4.3	Atividades Laboratoriais	43
4.3.1	Ensaio com agregados	43
4.3.1.1	<i>Granulometria</i>	<i>43</i>
4.3.1.2	<i>Adesividade</i>	<i>45</i>
4.3.1.3	<i>Índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante ID_{ML} e sem ligante - ID_M</i>	<i>46</i>
4.3.1.4	<i>Abrasão “Los Angeles”</i>	<i>48</i>
4.3.1.5	<i>Absorção do agregado graúdo</i>	<i>50</i>
4.3.1.6	<i>Determinação da densidade real e aparente do agregado graúdo</i>	<i>52</i>
4.3.1.7	<i>Índice de forma</i>	<i>53</i>
4.3.1.8	<i>Angularidade</i>	<i>55</i>
4.3.1.9	<i>Equivalente de areia</i>	<i>57</i>
4.3.1.10	<i>Densidade real do agregado miúdo</i>	<i>59</i>
4.3.1.11	<i>Massa específica real do fíler</i>	<i>61</i>
4.3.2	Ensaio com CAP	62
4.3.2.1	<i>Ponto de amolecimento</i>	<i>62</i>
4.3.2.2	<i>Penetração</i>	<i>63</i>
4.3.2.3	<i>Viscosidade Saybolt-Furol</i>	<i>64</i>
4.3.3	Ensaio com as misturas asfálticas	65
4.3.3.1	<i>Dosagem Marshall</i>	<i>65</i>
4.3.3.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	<i>71</i>
5.	RESULTADOS E ANÁLISES	73
5.1	Considerações Iniciais	73
5.2	Análise granulométrica	73
5.3	Massas específicas e absorção dos agregados	75
5.4	Equivalente de areia	76

5.5	Adesividade	76
5.6	Índice de forma	76
5.7	Abrasão “Los Angeles”	77
5.8	Angularidade	78
5.9	Índice de degradação Marshall	80
5.10	Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP)	82
5.10.1	Escolha das temperaturas do CAP, agregados e de compactação	82
5.11	Dosagem Marshall	83
5.11.1	Enquadramento granulométrico dos agregados	84
5.11.2	Propriedades volumétricas	85
5.11.3	Propriedades mecânicas	89
5.11.4	Teor de ligante ótimo	91
5.12	Resistência à tração por compressão diametral	93
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A	101
	APÊNDICE B	104
	APÊNDICE C	106
	APÊNDICE D	108
	APÊNDICE E	110

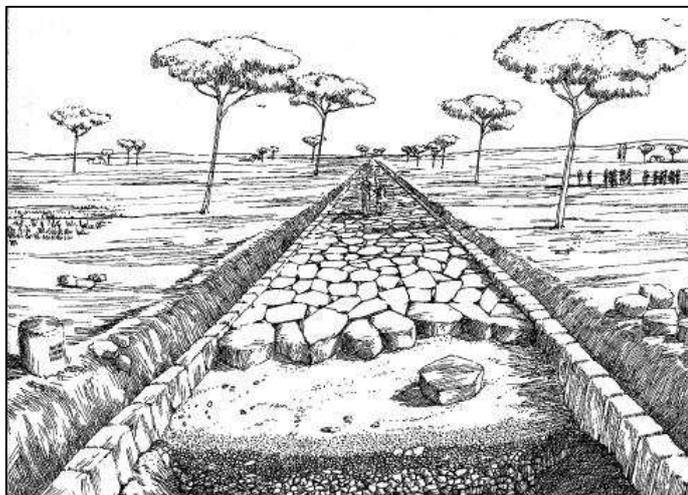
1. INTRODUÇÃO

O uso de maciços rochosos remete ao período conhecido como Idade da Pedra Lascada. Nesse período o homem utilizou esse material para a realização de atividades básicas tais como caça, defesa pessoal e obtenção de fogo. Além de usado para essas atividades básicas a rocha teve um importante papel no desenvolvimento da comunicação do homem pré-histórico por meio das pinturas rupestres onde figuras do cotidiano eram ilustradas nas paredes de cavernas ou outras rochas.

Muitas foram as civilizações que utilizaram a rocha como um dos principais, se não o principal material de construção, pode-se citar nesse aspecto construções monumentais como a Muralha da China na China e a cidade de Machu Pichu no Peru. Os romanos também tiveram grande importância na utilização desse material na construção civil, sobretudo da construção de vias.

Segundo Balbo (2007) a Via Appia foi uma das vias pioneiras a merecer atenções técnicas específicas no que tange a pavimentação. Teve sua construção iniciada no ano de 312 a.C, por iniciativa do censor Cláudio Appio Ciego, responsável por seu projeto e construção. Ligava Roma a Taranto, com o objetivo principal de estabelecer a comunicação entre a sede romana e as províncias orientais. De acordo com Prego (2001) as estradas romanas (Figura 1) eram, quase sempre, construídas em aterros, com 2,00m de altura, em média, e daí resultou o termo inglês *highways* para rodovias.

Figura 1 – Estrada típica do Império Romano



Fonte: Macaulay (1974)

O desenvolvimento do processo construtivo em pavimentação levou a criação de novas formas de processar a rocha. Podem-se encontrar rochas em diversas formas tais como, na forma bruta, britada, polida, entre outras. Essa evolução criou o que hoje é genericamente chamado de agregado.

Woods, 1960 apud Bernucci et al, 2006 define “agregado como sendo uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usada em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa etc.”

É importante salientar que o agregado representa um dos principais componentes na pavimentação e o principal responsável pela resistência às cargas impostas pelo tráfego por isso deve apresentar propriedades físicas e mecânicas adequadas ao uso na pavimentação, como por exemplo dureza, tenacidade, resistência à abrasão, afinidade ao ligante, sanidade, porosidade, etc.

No estado do Maranhão um importante agregado graúdo utilizado na pavimentação é o seixo, que é encontrado em algumas regiões do estado. Esse material tem origem sedimentar e pode ser encontrado em diversos tipos de graduações.

1.1 Título

Estudo sobre a utilização do agregado seixo britado em misturas asfálticas do tipo CAUQ no Maranhão.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Realizar um estudo das características físico mecânicas do agregado seixo britado em misturas do tipo CAUQ empregadas como revestimento para rodovias do Maranhão.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar as propriedades dos materiais utilizados no estudo.
- b) Caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da mistura asfáltica do tipo CAUQ obtida com o agregado abordado no estudo.

- c) Apresentar o estudo como contribuição as obras rodoviárias da região que usam o seixo britado como agregado de misturas asfálticas.

1.3 Justificativas

Segundo a Confederação Nacional de Transporte (BRASIL, 2016) até julho de 2016 havia no Brasil uma malha rodoviária de 1.720.924,1 quilômetros, contudo, apenas 211.902,6 quilômetros (12,31%) eram pavimentadas. A maior parte dessas rodovias não pavimentadas são estaduais e sobretudo municipais. Existe portanto um déficit a ser atendido no que diz respeito a pavimentação das rodovias brasileiras.

Logo, em meio a uma necessidade de pavimentar as estradas brasileiras e ao grande número de materiais empregados como agregados de misturas asfálticas no Brasil, sobretudo no Maranhão, entende-se que é relevante o estudo das características físico-mecânicas do seixo britado, uma vez que esse material é comumente encontrado na região.

A caracterização dos materiais utilizados como agregado é imprescindível quando deseja-se utilizá-los para a pavimentação de estradas e rodovias. Esses materiais devem apresentar características relacionadas ao desempenho, durabilidade, resistência, adesevidade ao ligante etc.

É importante salientar que no Maranhão há uma grande malha rodoviária pavimentada tanto de rodovias estaduais como federais, contudo ainda existem grandes dificuldades tanto para governantes quanto para engenheiros e corpo técnico no que diz respeito ao controle tecnológico de agregados a fim de utilizar materias de alta qualidade nas misturas asfálticas.

Apesar de o seixo britado já ser utilizado no estado ainda existe uma carência de estudos que comprovem a real qualidade desse material como agregado de misturas asfálticas.

Diante disso, o presente estudo busca expor as qualidades do seixo britado mostrando através de ensaios laboratoriais dados que comprovem as características adequadas para a utilização desse material como agregado de misturas asfálticas do tipo CAUQ.

2. METODOLOGIA

Com a finalidade de alcançar o objetivo proposto, nesse capítulo será apresentado o tipo de pesquisa utilizado e a forma como foi organizado o trabalho.

2.1 Tipo de pesquisa

O tipo de pesquisa quanto aos objetivos foi inicialmente explicativa e exploratória pois buscou-se realizar pesquisas bibliográficas notadamente importantes para fundamentar a utilização do seixo britado como agregado de misturas asfálticas do tipo CAUQ, uma vez que o material é comum no estado do Maranhão.

A pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. Embora em quase todos os estudos seja exigido algum tipo de trabalho dessa natureza, há pesquisas desenvolvidas exclusivamente a partir de fontes bibliográficas. Boa parte dos estudos exploratórios pode ser definida como pesquisas bibliográficas. As pesquisas sobre ideologias, bem como aquelas que se propõem à análise das diversas posições acerca de um problema, também costumam ser desenvolvidas quase exclusivamente mediante fontes bibliográficas. (GIL, 2002, p.44)

2.2 Organização do trabalho

Terminado o levantamento bibliográfico foram realizadas atividades laboratoriais com todos os materiais utilizados no estudo. Essas atividades tiveram o objetivo de determinar características físicas importantes desses materiais. Tais informações foram interpretadas e utilizadas para a confecção de corpos de prova afim de caracterizar a mistura asfáltica no que diz respeito a parâmetros volumétricos e mecânicos. De posse de todos esses dados foi determinado o teor ótimo de ligante para a mistura asfáltica

Após a realização de todos as atividades de laboratório foi feita a apresentação dos dados obtidos nos ensaios. Essas informações foram apresentadas por meio de gráficos e tabelas, com a finalidade de facilitar a visualização e entendimento dos dados.

Em seguida foi feita a análise de todos os dados e comparou-se os valores obtidos com os valores preconizados por normas nacionais para o controle de qualidade desses materiais. Além de comparar os valores com as normas, também comparou-se esse dados com um estudo semelhante feito por Nascimento (2015) que realizou um estudo utilizando agregados de origem basáltica e granítica.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Rochas sedimentares

São todos aqueles maciços rochosos formados pelo acúmulo de sedimentos, que tem origem na superfície terrestre, tais como partículas soltas de areia e silte por exemplo. Os seixos (Figura 2) são partículas de rochas sedimentares clásticas e segundo a ABNT NBR 6502/1995 são classificados como pedregulhos, pois tem diâmetro compreendido entre 2,00mm e 60mm além de possuírem sua superfície arredondada ou semi-arredondada.

Figura 2 – Aspecto visual do seixo rolado



Fonte: Portal do Professor

Existem dois processos que são muito importantes para que ocorra a formação desse tipo de rocha que são o intemperismo e a erosão. De acordo com Press (2006) intemperismo são todos os processos químicos e físicos que desintegram e decompõem as rochas em fragmentos de vários tamanhos. Enquanto erosão é o conjunto de processos que desprendem o solo e as rochas, transportando-os para os locais onde são depositados em camadas de sedimentos.

Os processos de intemperismo e erosão acabam formando dois tipos de sedimentos, os clásticos e os químicos ou bioquímicos.

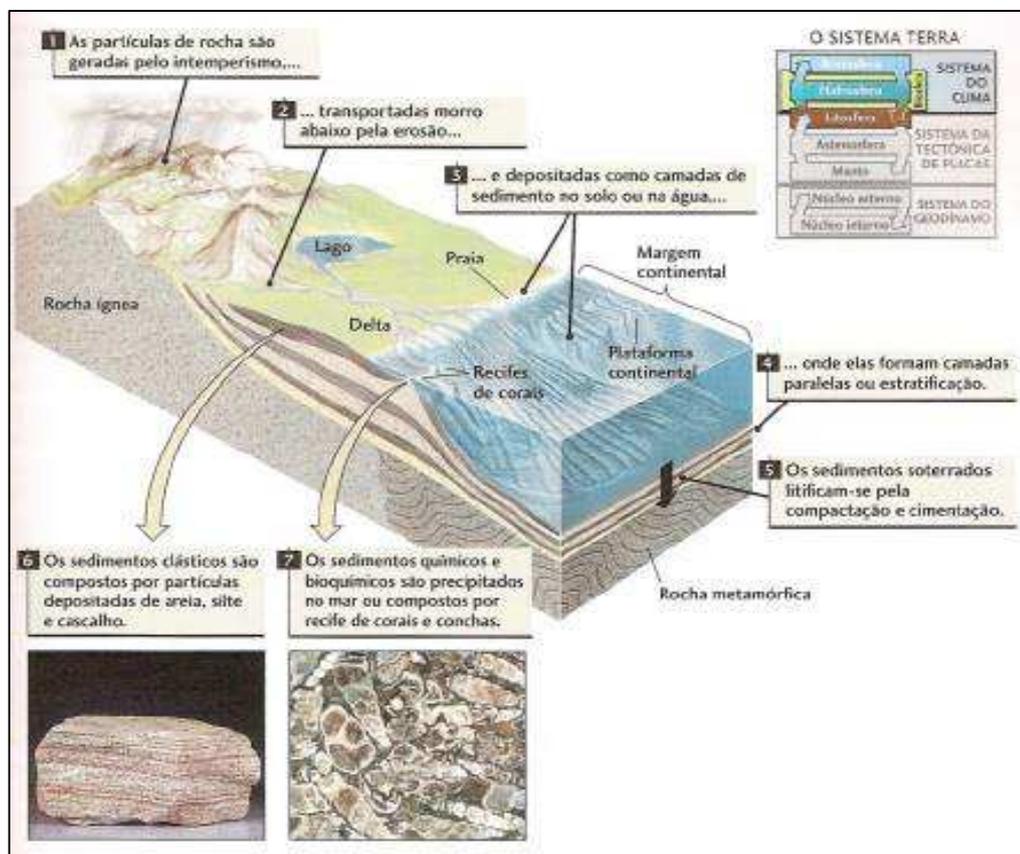
Segundo Press (2006), sedimentos clásticos são partículas depositadas fisicamente, como os grãos de quartzo e feldspato derivados de um granito alterado. Tais sedimentos são assentados por meio da ação da água, do vento e do gelo, formando camadas de silte, areia e cascalho.

Os sedimentos químicos ou bioquímicos são formados por substâncias químicas novas que se formam por precipitação quando alguns dos componentes das rochas dissolvem-se durante o intemperismo (PRESS, 2006, p.106). Tais componentes são carregados pelas águas dos rios até o mar e são compostos principalmente por halita (cloreto de sódio) e calcita (carbonato de cálcio).

Depois de transportadas essas partículas entram em processo de litificação, que é a transformação dessas partículas em rocha sólida. A litificação ocorre de duas formas, por compactação, quando há a compactação dos grãos pelas partículas trazidas pela erosão e por cimentação quando há a precipitação de minerais ao redor das partículas depositadas. Logo pode-se observar que as rochas sedimentares apresentam estratificações, ou seja, camadas paralelas distintas.

Os sedimentos e as rochas sedimentares são caracterizados pela estratificação, a formação continuada de camadas paralelas de sedimentos à medida que as partículas depositam-se no fundo do mar, de um rio ou da superfície do terreno. Pelo fato de as rochas sedimentares serem formadas por processos superficiais elas cobrem grande parte dos continentes e dos fundos dos oceanos. (PRESS, 2006, p. 107).

Figura 3 – Processo de formação de rochas sedimentares



3.2 Pavimento

Segundo Senço (2007) pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente, a:

- a) Resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;
- b) Melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;
- c) Resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

Ainda seguindo pela definição de pavimento para Balbo (2007) o pavimento é uma estrutura formada por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir da camada denominada como subleito . Deve ser adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao menor custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.

De uma forma geral as camadas de um pavimento (Figura 4) podem ser chamadas de revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito. Cada uma dessas camadas tem uma função específica dentro do pavimento.

O revestimento ou capa é a camada mais externa do pavimento e é aquela que recebe diretamente a ação do tráfego. Segundo Balbo (2007) deverá, entre outras funções, receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componente ou ainda, perda de compactação.

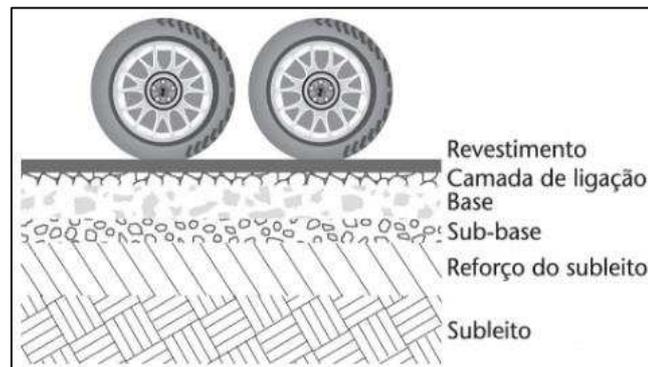
A base é a camada do pavimento que deve resistir aos esforços verticais exercidos pelo tráfego, de modo a diminuir a pressão sob as camadas inferiores. Quando a base é muito espessa ela geralmente é subdivida em base e sub-base para diminuir os custos da obra, uma vez que a sub-base é composta de um material de menor qualidade e menor custo que a base.

Após a base pode-se ter ou não uma outra camada chamada de reforço de subleito, que é a camada logo acima do subleito, e assim como as outras camadas tem a função de absorver os esforços verticais do tráfego. Para Senço (2007) o reforço de subleito tem funções de complemento da sub-base, que por sua vez, tem funções de complemento da base. Assim o reforço de subleito também resiste e distribui

esforços verticais, não tendo as características de absorver definitivamente esses esforços.

Subleito é a camada que serve de fundação para o pavimento, é composto geralmente de um material natural e compactado, com características menos nobres do que as camadas superiores.

Figura 4 – Camadas genéricas de um pavimento



Fonte: Balbo (2007, p. 49)

3.2.1 Tipos de pavimento

De uma forma geral os pavimentos são classificados em pavimentos flexíveis, semi-rígidos e rígidos.

Pavimento flexível (Figura 5) segundo o DNIT (2006) é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

Figura 5 – Camadas em um pavimento flexível



Fonte: Adada (2008, p. 15)

Pavimento rígido (Figura 6) seguindo ainda pela definição do DNIT (2006) é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, e portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Segundo Senço (2007) esse tipo de pavimento rompe por tração na flexão, quando sujeito a deformações.

Figura 6 – Camadas em um pavimento rígido



Fonte: Adada (2008, p. 22)

Ainda seguindo pela classificação dos tipos de pavimentos há um terceiro tipo que é o pavimento semi-rígido (Figura 7). O DNIT (2006) caracteriza esse tipo de pavimento como uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias.

Figura 7 – Camadas em um pavimento semi-rígido



Fonte: Adada (2008, p. 24)

3.3 Agregados

Segundo a ABNT NBR 9935:2011 agregado é um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto.

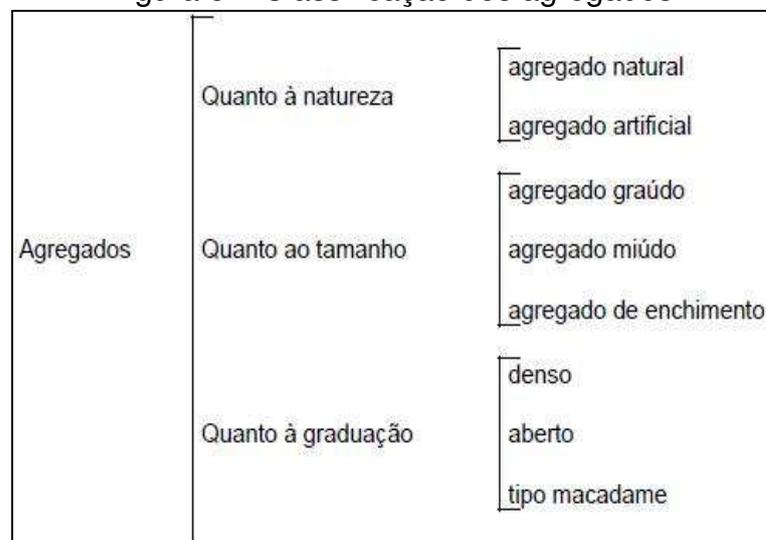
Tendo em vista o seu uso dentro da área de pavimentação Senço (2007) fala que o emprego desse material destina-se a misturas betuminosas, concreto de cimento, bases de calçamentos, lastros de obras e outros. Podem se apresentar, para esses fins, resultantes de rochas fragmentadas em britadores, seixos rolados encontrados nos leitos dos rios e em antigos leitos, em jazidas resultantes de alterações de rocha, de escórias de alto-forno.

O agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também no seu interior. O desempenho das partículas de agregado é dependente da maneira como são produzidas, mantidas unidas e das condições sob as quais vão atuar. (BERNUCCI et al., 2006, p.115).

3.3.1 Classificação dos agregados

De acordo com o DNIT (2006) a classificação dos agregados (Figura 8) é feita segundo a natureza, tamanho e distribuição dos grãos.

Figura 8 – Classificação dos agregados



Fonte: DNIT (2006, p.78)

3.3.1.1 Quanto à natureza

Os agregados naturais para o DNIT (2006) são todos aqueles grãos que tem origem na alteração de rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por processos de britagem. Exemplos desse tipo de material são os pedregulhos, as areias, as britas, os seixos entre outros.

Os agregados artificiais utilizados em pavimentação, segundo Senço (2007), são submetidos a diversas operações, como britagem e classificação. Exemplos desse tipo de material são as pedras britadas, pó de pedra, argila expandida entre outros.

3.3.1.2 Quanto ao tamanho

A classificação dos agregados quanto ao tamanho é feita em: graúdo, miúdo e de enchimento ou fíler.

O agregado graúdo de acordo com a norma ABNT NBR 9935:2011 é classificado como “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de 4,75mm, atendidos os requisitos da ABNT NBR 7211”.

O agregado miúdo de acordo com a norma ABNT NBR 9935:2011 é classificado como “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira com abertura de 150 μ m, atendidos os requisitos da ABNT NBR 7211”.

O agregado de enchimento (fíler) segundo Bernucci et al. (2006, p.120) “é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente a peneira de nº 200”.

3.3.1.3 Quanto à graduação

Os agregados quanto a graduação classificam-se em: densa, aberta e tipo macadame.

Agregado com graduação densa de acordo com Bernucci et al. (2006, p.122) “é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima a de densidade máxima”.

Agregado com graduação aberta de acordo com Bernucci et al. (2006, p.122) “é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 75mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios”.

Agregado do tipo macadame é definido segundo o DNIT (2006) como “aquele que possui partículas de um único tamanho, o chamado “one size aggregate”. Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo”.

Vale resaltar que diâmetro máximo é a abertura da menor peneira cujo pelos 95% dos grãos passam. Enquanto diâmetro mínimo é a abertura da maior malha cujo passam até 5% dos grãos.

3.4 Asfalto

3.4.1 Histórico

Os dados reunidos por Bart e Edwin, 1962 apud Prego, 2001 fornecem algumas informações sobre a história do asfalto:

Foi o primeiro produto do petróleo utilizado pelo homem. A palavra “asfalto” vem do grego - asfaltos - tendo significado de firme, invariável, estável e pegajoso. É portanto um dos mais antigos materiais da engenharia. [...]. Os arqueólogos informam que os materiais betuminosos principalmente o asfalto, foram usados por mais de 5000 anos como agentes aglomerantes para colar objetos os mais diversos ou impermeabilizantes, na construção de banheiros sagrados e depósitos d’água. Na Bíblia existem referências, embora a terminologia usada seja alegórica, sobre o uso do asfalto na impermeabilização da Arca de Noé. Como também, de forma pouco explícita, encontramos descrições a respeito da construção da Torre de Babel. (BART e EDWIN, 1962 apud PREGO, 2001, p.45).

Para Prego (2001) os povos às margens do Rio Eufrates há aproximadamente 3800 anos A.C. e no Egito desde o ano de 2500 A.C. o conheciam bem, tanto que, os antigos persas, babilônicos e egípcios o misturavam com cimento, na ligação de pedras, como argamassa de pedreiro.

Em 1802 os franceses começam a utilizar asfalto natural para pavimentar grandes áreas da Palais Royal, e posteriormente as estradas da França, tendo grande importância econômica e militar para o império de Napoleão.

Senço (2007) fala que a utilização do asfalto processado do petróleo iniciou-se, nos Estados Unidos, por volta de 1902, mas só passou a ser usado de forma intensa na pavimentação a partir de 1909. Sendo a dosagem feitas de acordo com a utilização em campo desse material.

Ainda no século XX, mais precisamente em 1944 o Brasil inicia a produção de asfalto “na refinaria Ipiranga, com petróleo importado geralmente da Venezuela. Até então utilizava-se, nos serviços de pavimentação, o asfalto importado de Trinidad, acondicionado em tambores de cerca de 200 litros” (SENÇO, 2007, p.319).

3.4.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Uma definição moderna sobre asfalto utilizado em pavimentação é feita por Bernucci, et al. (2006):

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém de destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoplástico, impermeável à água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água”. (BERNUCCI, et al., 2006 p.26).

No Brasil esse material é conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP) e “deve ser homogêneo e estar livre de água, e para que sua utilização seja adequada, recomenda-se o conhecimento prévio da curva de viscosidade/temperatura”. (PETROBRAS, 2016).

A composição química desses materiais, é citada por Leite (1999) como sendo constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre.

A classificação dos CAP's é feita de acordo com o ensaio de penetração conforme indica a norma ABNT NBR 6576/2007. Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP) os CAP's utilizados no Brasil são o CAP 30-45; CAP 50-70; CAP 85-100; CAP 150-200.

3.5 Britagem

Segundo Luz (2010) britagem é o conjunto de operações que tem a finalidade de fazer a redução de blocos de minérios vindos de uma mina. Nesse processo os blocos são levados a uma granulometria adequada para uso direto ou para um futuro processamento. De uma forma geral a britagem divide-se em 4 etapas (Quadro 1) que são as britagem primária, secundária, terciária e quaternária de acordo com o tamanho final que sai do alimentador.

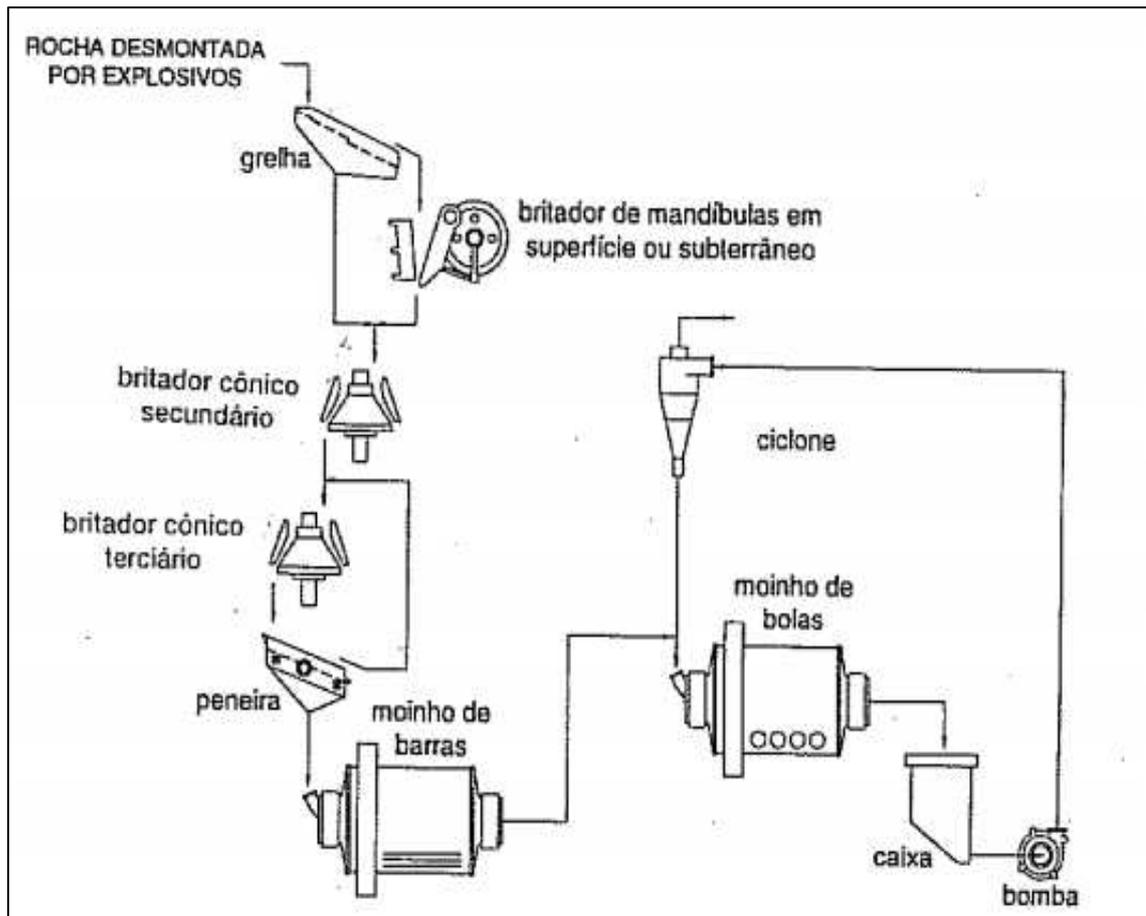
Quadro 1 – Classificação dos estágios de britagem

Estágio de Britagem	Tamanho Máximo de Alimentação (mm)	Tamanho Máximo de Produção (mm)
Britagem Primária	1000	100,0
Britagem Secundária	100	10,0
Britagem Terciária	10	1,0
Britagem Quaternária	5	0,8

Fonte: Luz (2010, p.161)

Todo esse processo é iniciado com a retirada da rocha do solo que cobre a rocha, depois é feita a perfuração da rocha, em rochas em furos de 75mm e profundida de 12m onde serão colocados explosivos que em seguidas são detonados conforme o plano de fogo determinado. Após o desmonte é feita a utilizado de um fragmentador hidráulico para fazer o desmonte da rocha explodida. Em seguida o material é transportado em caminhões basculante até os alimentadores.

Figura 9 – Processo de britagem



Fonte: Chaves (2003, p.427)

3.5.1 Tipos de britadores

O mercado de britadores é muito grande e oferece muitas variedades desse equipamento. Contudo os principais são os britadores de mandíbula, giratórios, de impacto, de rolo e cônicos. Nos britadores de mandíbula a britagem é feita por compressão das mandíbulas nas partículas, enquanto nos britadores giratórios essa pressão é feita entre o manto e o cone. Já nos britadores de impacto a britagem ocorre quando a energia cinética do impactador atinge as partículas e as fratura.

3.5.1.1 Britadores de mandíbula

Segundo Luz (2010), os britadores de mandíbula, são usados principalmente para a britagem primária, reduzindo blocos com grandes dimensões, dureza e variação de tamanho na alimentação. Esse tipo de britador faz a

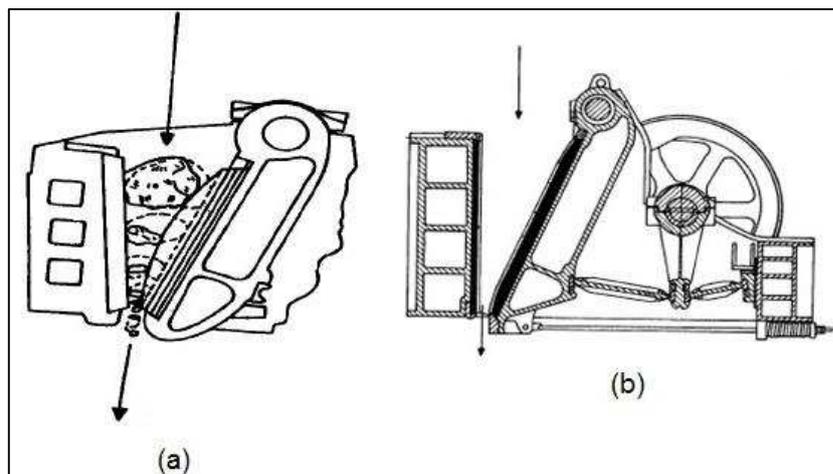
fragmentação basicamente por compressão onde os blocos colocados na alimentação vai descendo pela mandíbulas, enquanto recebe o impacto que fará a redução dos blocos.

São classificados em dois tipos de acordo com o tipo de acionamento da mandíbula móvel (Figura 10), os britadores de 1 eixo (Dodge) e os britadores de 2 eixos (Blake):

Os britadores de mandíbulas são classificados em dois tipos, baseando-se no mecanismo de acionamento da mandíbula móvel. Assim, tem-se britadores de um eixo e dois eixos - tipo Blake. Nos britadores de dois eixos, a mandíbula móvel tem movimento pendular, enquanto que os de um eixo, tem movimento elíptico. Em termos de custos de capital, britadores de dois eixos são cerca de 50% mais elevados que os de um eixo, sendo indicados para materiais mais abrasivos e de difícil fragmentação. A especificação dos britadores de mandíbulas é dada pelas dimensões de abertura da alimentação. Por exemplo um britador com 1000 x 1200 mm, apresenta boca retangular com dimensões de 1.000 x 1.200 mm.

A granulometria do produto é estabelecida pelo ajuste da descarga, sendo então definida pela razão de redução que deve ser em torno de 5:1. (LUZ, 2010, p. 163)

Figura 10 – Britadores de mandíbula de 1 eixo (a) e britador de mandíbula de 2 eixos (b)



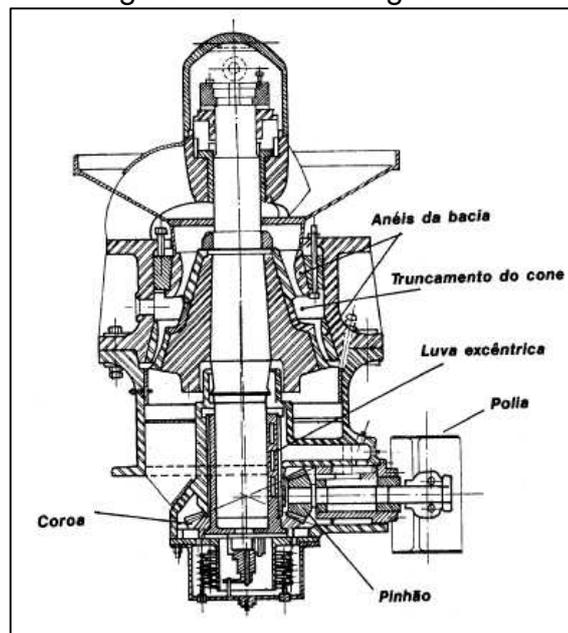
Fonte: Luz (2010, p.163 e 164)

3.5.1.2 Britadores giratórios

Os britadores giratórios (Figura 11) também são utilizados na britagem primária, são mais utilizados quando existe um grande volume de bloco a serem britados, pois podem ser alimentados por qualquer um dos lados além de terem uma pequena capacidade de armazenamento. O funcionamento desses tipos de britadores são descritos por Luz (2010):

O princípio de funcionamento do britador giratório consta do movimento de aproximação e distanciamento do cone central em relação à carcaça invertida. Este movimento circular (85 a 150 rpm) faz com que toda a área da carcaça seja utilizada na britagem, o que fornece ao britador uma grande capacidade de operação. Esse britador tem baixo custo operacional e grande seção de alimentação. (LUZ, 2010, p.164).

Figura 11 – Britador giratório



Fonte: Luz (2010, p.165)

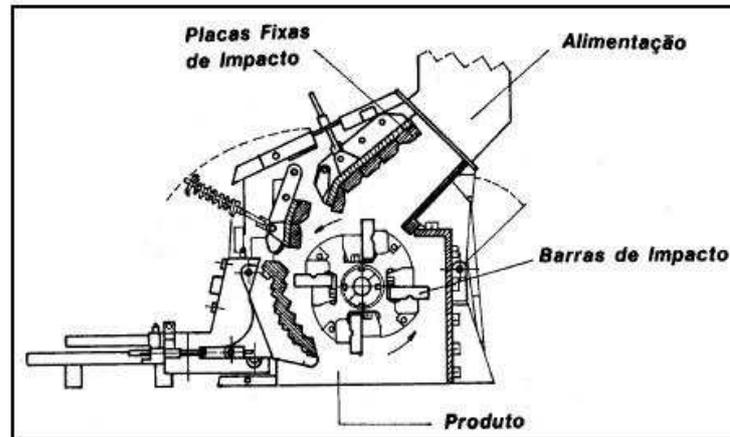
3.5.1.3 Britadores de impacto

Os britadores de impacto (Figura 12) são também utilizados na britagem primária e, como o nome sugere, usam o impacto ao invés de compressão. Por meio de movimentos de barras (500 até 3000 rpm), parte da energia cinética é transferida

para o material, projetando-se sobre as placas fixas de impacto onde ocorre a fragmentação. (LUZ, 2010, p.165).

Esse tipo de britador tem custo de manutenção alto além de grande desgaste, logo seu uso é recomendado para a fragmentação de rochas pouco abrasivas.

Figura 12 – Britador de impacto



Fonte: Luz (2010, p.166)

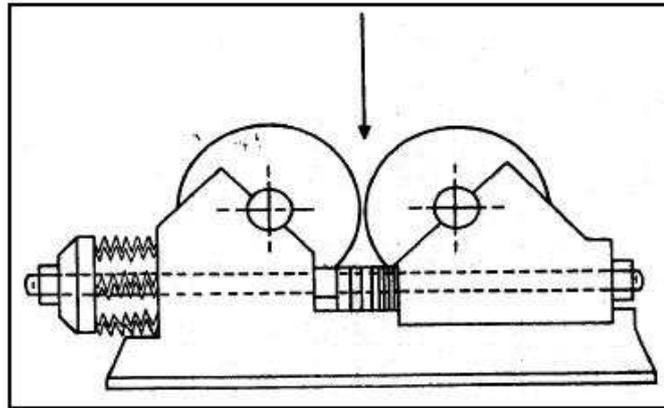
3.5.1.4 Britadores de rolos

Os britadores de rolos (Figura 13) podem ser usados na britagem primária ou na secundária. São constituídos basicamente por dois rolos lisos que giram em velocidade constante mas em sentidos contrários. Também existem outros modelos que são compostos de um rolo dentado móvel e uma carcaça fixa.

A alimentação é feita, lançando-se os blocos de minério entre os rolos cujo movimento faz com que os mesmos sejam forçados a passar pela distância fixada, previamente, por parafusos de ajuste. Esta ação promove a fragmentação dos blocos. (LUZ, 2010, p. 167)

O ponto negativo desse tipo de britador é a distância pré-fixada entre os rolos, que limita o tamanho dos blocos que entrarão na alimentação.

Figura 13 – Britador de rolos

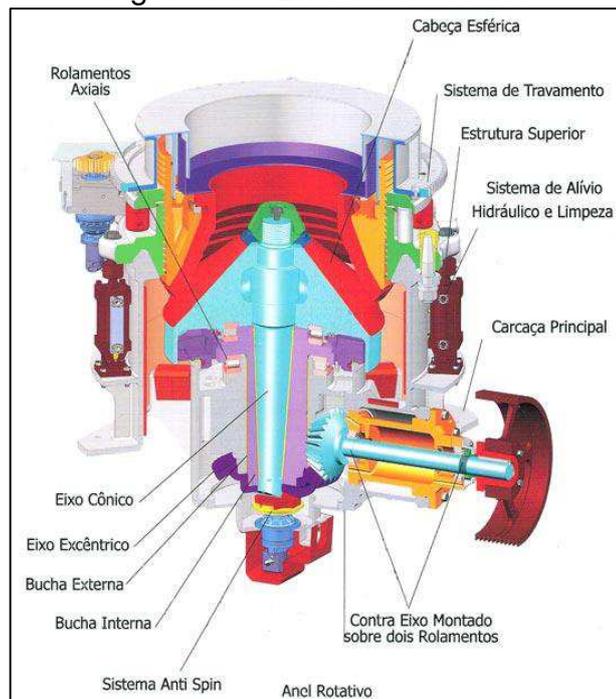


Fonte: Luz (2010, p.169)

3.5.1.5 Britadores cônicos

Os britadores cônicos (Figura 14) utilizam o mesmo princípio dos britadores giratórios. Segundo Luz (2010), contrariamente com o que ocorre no britador giratório, no cônico o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, para garantir um tempo longo de retenção das partículas nessa região. A descarga no britador cônico é feita de acordo com o movimento do cone, que se movimenta para cima e para baixo, controla a abertura de saída, para tal, utiliza-se de dispositivos hidráulicos.

Figura 14 – Britador de cônico



Fonte: SCOTTIMAQ (2016)

3.6 Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)

O CAUQ é um tipo de mistura asfáltica usinada à quente, sendo um tipo de revestimento bastante utilizado no Brasil. É composto por agregados graúdos, miúdos e ligantes asfálticos. Para Bernucci (2006) esse tipo de mistura tem graduação densa, uma vez que sua curva granulométrica é contínua e bem graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios maiores.

As características mecânicas desse tipo de mistura são dependentes dos agregados e do ligante, conforme é dito por Specht (2004):

Hunter (1994) separa de forma bem clara, dentro de certos limites, o comportamento das misturas betuminosas como dependentes das características dos agregados, (características de deformabilidade plástica) e do ligante (características de fadiga). Torna-se evidente a importância da seleção desses materiais, bem como sua interação, para o bom desempenho da mistura final. (HUNTER apud SPECHT, 2004, p.71 e 72).

Ainda em relação a sensibilidade das misturas quanto à seus componentes Bernucci et al (2006) fala que:

Concretos asfálticos densos são misturas asfálticas usinadas a quente mais utilizadas como revestimentos asfálticos de pavimentos no Brasil. Suas propriedades, no entanto, são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico. Uma variação positiva, às vezes dentro do admissível em usinas, pode gerar problemas de deformação permanente por fluência e/ou exsudação, com fechamento da macrotextura superficial. De outro lado, a falta de ligante gera um enfraquecimento da mistura e de sua resistência à formação de trincas, uma vez que a resistência à tração é bastante afetada e sua vida de fadiga fica muito reduzida. (BERNUCCI et al, 2006, p.164 e 165)

3.7 Dosagem Marshall

Esse método foi desenvolvido pelo engenheiro Bruce G. Marshall, do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi nos Estados Unidos no decorrer da 2ª Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e

ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares. (BERNUCCI et al, 2006)

Devido sua sistemática simples, sua rapidez de execução e relativa eficiência esse método se tornou bastante comum mundialmente. No Brasil esse método é o mais utilizado para dosagem e é regido pela DNER-ME 043/95. O procedimento consiste em fazer a compactação de corpos-de-prova dentro do laboratório com o objetivo de reproduzir a densidade da mistura asfáltica em campo depois de alguns anos de uso.

Segundo Specht (2004) o procedimento é realizado da seguinte maneira:

Molda-se por compactação à quente uma série de corpos-de-prova com diferentes porcentagens de ligante asfáltico, dentro de moldes cilíndricos metálicos que depois são armazenados, ao ar livre, durante 24 horas; em seguida, esses corpos-de-prova são imersos num banho de 60°C de temperatura, sendo a seguir retirados do banho e, imediatamente, submetidos a uma compressão diametral, aplicada por uma prensa, através de um molde de compressão cilíndrico, idealizado por Marshall. (SPECHT, 2004, p.120).

Após esse procedimento são determinados os seguintes parâmetros volumétricos da mistura:

- a) Densidade aparente (G_{mb} , em g/cm^3),
- b) Densidade máxima teórica (DMT, em g/cm^3),
- c) Vazios no agregado mineral (VAM, em %),
- d) Volume de vazios (V_v , em %)
- e) Relação betume/vazios (RBV, %)
- f) Vazios com betume (VCB, em %)

Além de também analisar algumas propriedades mecânicas tais como estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral. (Specht, 2004).

3.8 Levantamento das rodovias do Brasil e do Maranhão

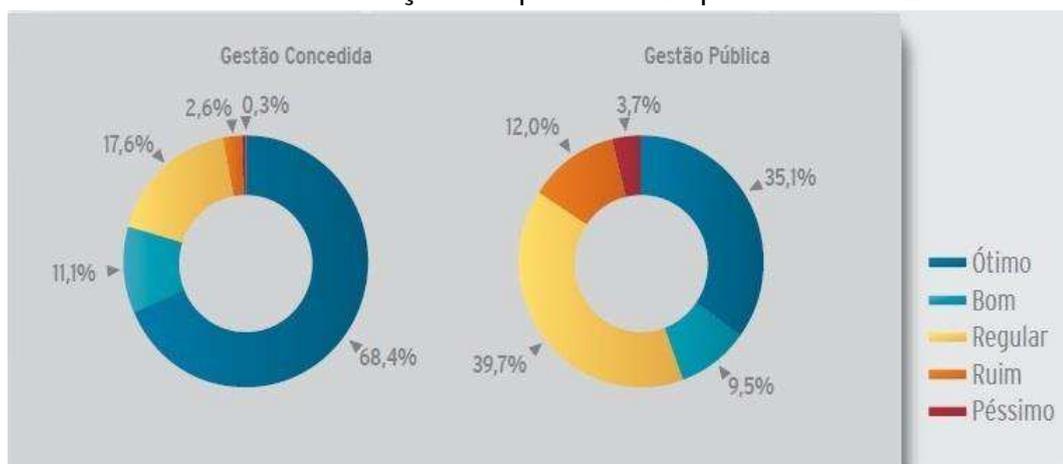
O Brasil possui uma das maiores malhas rodoviárias do mundo, logo mostra-se necessário um levantamento de alguns dados sobre a quantidade de rodovias pavimentadas e a qualidade do pavimento. Segundo a CNT (BRASIL, 2015), 61% da matriz do transporte de cargas utiliza o modal rodoviário, o segundo modal mais utilizado é o ferroviário responsável por 20,7%. Levando em conta o transporte de passageiros a participação das rodovias é de 95%. Pode-se observar que sua grande importância para a integração de todo o sistema de transporte e desenvolvimento socioeconômico nacional.

3.8.1 Rodovias do Brasil

Com base nos levantamentos do Boletim Estatístico da CNT, até julho de 2016 haviam no Brasil cerca de 1.720.914,1 Km de rodovias, porém pouco mais de 12% dessas rodovias eram pavimentadas.

Em 2015 a CNT fez um estudo para analisar a qualidade do pavimento rodoviário (Gráfico 1). Foram analisados 100.763 Km de rodovias, onde 19.804 Km eram de rodovias concedidas e 80.959 Km eram administradas por órgãos públicos.

Gráfico 1 – Classificação da qualidade do pavimento no Brasil



Fonte: CNT (BRASIL, 2015, p.83)

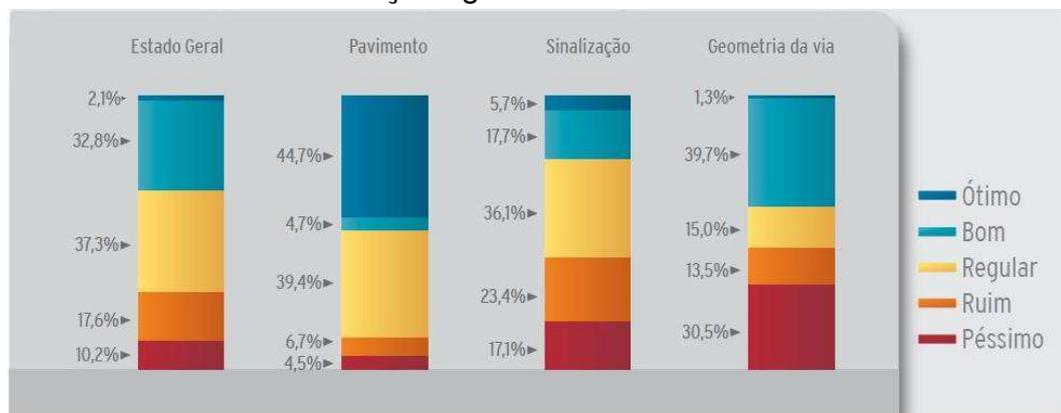
Pode-se observar que as rodovias concedidas apresentam melhor qualidade de pavimento do que as rodovias geridas por órgãos públicos. Onde 68,4%

das rodovias concedidas possuíam pavimentos considerados ótimos quanto apenas 35,1% das rodovias de gestão pública.

3.8.2 Rodovias do Maranhão

As rodovias maranhenses também foram analisadas pela Confederação Nacional de Transporte, que fez a avaliação de cerca de 6830 Km de estradas pavimentadas. O levantamento analisa as condições gerais, sinalização e a geometria além, é claro, a qualidade do pavimento (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Condições gerais das estradas do Maranhão



Fonte: CNT (BRASIL, 2015, p.187)

Pode-se observar que apenas 32,8% das estradas tem seu aspecto geral classificado como ótimo e menos da metade das rodovias analisadas possuem uma classificação ótimo ou bom do pavimento.

Outra parte do estudo da CNT aborda mais aspectos sobre a qualidade dos pavimentos, como se observa na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições do pavimento das rodovias do Maranhão

Condição da superfície do pavimento	Extensão Avaliada	
	km	%
Perfeito	598	13,1
Desgastado	3.165	69,1
Trinca em malha/remendos	468	10,2
Afundamentos/ondulações/buracos	246	5,4
Destruído	100	2,2
TOTAL	4.477	100,0

Fonte: CNT (BRASIL, 2015, p.188)

4. MATERIAIS, MÉTODOS E ATIVIDADES LABORATORIAIS

4.1 Considerações iniciais

Nesse capítulo serão apresentados os materiais utilizados no estudo, bem como a procedência dos mesmos. Além disso serão mostrados também a preparação das amostras usadas e os procedimentos adotados em cada em ensaio realizado.

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo

O ligante betuminoso utilizado nesse estudo foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP), denominado CAP 50/70, usado na pavimentação do Maranhão. O material foi cedido ao Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) pela usina de asfalto da prefeitura de São Luís, procedente da refinaria LUBNOR localizada em Fortaleza, Ceará. Os ensaios realizados com o CAP foram os seguintes:

- a) Determinação de penetração (de acordo com a norma ABNT NBR 6576)
- b) Determinação do ponto de amolecimento (de acordo com a norma ABNT NBR 6560)
- c) Determinação da viscosidade Saybolt Furol (de acordo com a norma NBR 14950)

4.2.2 Agregados graúdos

Os agregados graúdo utilizados no estudo foram os seixos 1 e seixo 0, materiais comumente encontrados no estado. Os materiais foram cedidos pela empresa Brita Sul localizada na cidade de Balsas a cerca de 815 Km de São Luís.

Para esse material foram realizados os seguintes ensaios:

- a) Adesividade a ligante betuminoso (de acordo com a norma DNER 078/94)
- b) Granulometria (de acordo com a ABNT NBR 7181/84)

- c) Determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante ID_{ML} e sem ligante ID_M . (de acordo com a norma DNER-ME 401/99)
- d) Determinação da abrasão “Los Angeles” (de acordo com a norma DNER-ME 035/98)
- e) Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo (de acordo com a norma DNER-ME 081/98)
- f) Determinação do índice de forma (de acordo com a norma ABNT NBR 7809/06)

4.2.3 Agregados miúdos

Os agregados miúdos utilizados no estudo foram o pó de brita de origem granítica e areia, ambos os materiais foram cedidos pela usina de asfalto da prefeitura de São Luís. Esses materiais tem o objetivo de preencher a fração fina da mistura asfáltica. Foram realizados os seguintes ensaios com esses materiais:

- a) Angularidade (de acordo com a norma ASTM C 152 - 03)
- b) Equivalente de areia (de acordo com a norma DNER-ME 054/97)
- c) Determinação da densidade real (de acordo com a norma DNER-ME 084/95)
- d) Granulometria (de acordo com a ABNT NBR 7181/84)

4.2.4 Fíler

O fíler bem como o agregado miúdo faz o preenchimento da fração fina dos agregados. O material utilizado no nesse estudo foi a cal hidratada do tipo CH - I, adquirida em uma loja de materiais de construção local. Para a cal hidratada foram realizados os ensaios de:

- a) Granulometria (de acordo com a ABNT NBR 7181/84)
- b) Determinação da massa específica real (de acordo com a DNER-ME 085/94)

A mistura escolhida para o estudo foi o CAUQ, um tipo de mistura asfáltica bastante comum na pavimentação do estado do Maranhão. Os ensaios realizados para a mistura foram:

- a) Ensaio Marshall (de acordo com a norma DNER-ME 043/95)

- b) Resistência à tração por compressão diametral (de acordo com a norma DNIT 136/2010)

A Figura 15 mostra imagens dos agregados utilizados nesse estudo.

Figura 15 - Agregados usados no estudo



Fonte: Própria do autor

4.3 Atividades Laboratoriais

A parte experimental do estudo foi realizada no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) da UEMA onde foram utilizados os materiais já citados.

Essas atividades foram realizadas pelo próprio autor do trabalho com o auxílio do técnico de laboratório.

4.3.1 Ensaio com agregados

4.3.1.1 Granulometria

A análise da granulometria dos agregados é de grande relevância para as misturas asfálticas. Segundo Bernucci et al (2006) a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes das misturas asfálticas

como, por exemplo a rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc.

Utilizando a norma DNER-ME 083/98, fez-se a análise da granulometria dos agregado grãos e miúdos utilizando a sequência de peneiras mostrada na Figura 16.

Figura 16 – Sequência de peneiras utilizadas

#	Abertura (mm)
-	75
-	50
-	37,5
-	25
-	19
-	9,5
4	4,75
8	2,36
10	2
16	1,18
30	0,6
40	0,425
50	0,3
100	0,15
200	0,075



Fonte: Própria do autor

As amostras utilizadas foram devidamente quarteadas, secas em estufa à aproximadamente 110°C para a eliminação da umidade depois foram separadas em quantidades adequadas para o ensaio. Depois dessa preparação as amostras foram colocadas na série de peneiras e agitadas de forma vigorosa e uniforme por aproximadamente 15min. Após o agitação foram pesadas as quantidades de material retidas em cada peneira afim de se obter a porcentagem que passa em cada uma das peneiras e traçar a curva granulométrica do agregado.

Todos os agregados utilizados no estudo foram submetidos ao mesmo procedimento.

4.3.1.2 Adesividade

Mesmo em presença de água alguns agregados tem a capacidade de manter uma película de ligante asfáltico sobre sua superfície. Se o agregado apresenta esse qualidade diz-se que é hidrofóbico, já quando observa-se o desprendimento da película da superfície esse agregado é chamada de hidrófilo e seu uso não é interessante em misturas asfálticas.

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 é denominado de hidrófilo. Agregados silicosos, como o quartzito e alguns granitos, são exemplos de agregados que requerem atenção quanto à sua adesividade ao ligante asfáltico. Agregados com alta adesividade em presença de água são denominados de hidrofóbicos e são aceitáveis para utilização em misturas asfálticas. (BERNUCCI et al, 2006, p.143).

A determinação da adesividade do agregado ao ligante feita nesse estudo utilizou a norma DNER-ME 078/94 como base.

O procedimento iniciou-se com a preparação de uma amostra de 500 gramas passante na peneira 19mm e retida na de 12,7mm, que foi lavada e colocada em água destilada por cerca de 1 minuto. Depois a amostra foi colocada em estufa a 120°C por cerca de 2 horas.

Passado esse período aqueceu-se o ligante em estufa até 120°C e o agregado a 100°C e em seguida misturou-se 17,5 gramas do ligante a amostra fazendo todo o cobrimento da amostra com uma espátula metálica. Após a mistura colocou-se o material sobre uma superfície lisa (Figura 17) a fim de resfriá-lo então colocou-se dentro de um frasco e adicionou-se água destilada até o cobrimento total da amostra.

O frasco com material foi deixada em repouso dentro da estufa a 40°C pelo período de 72 horas e passado esse tempo verificou-se se ocorreu ou não o desprendimento da película de ligante.

Figura 17 – Resfriamento da amostra no ensaio de adesividade



Fonte: Própria do autor

4.3.1.3 Índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante ID_{ML} e sem ligante - ID_M

O ensaio de índice de degradação Marshall tem o objetivo de determinar a porcentagem de material que é deteriorado durante o processo de compactação de corpos de provas, obedecendo a sequência de peneiras estabelecidas na norma DNER-ME 401/99. Conforme é visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Granulometria padrão para amostras do ensaio de degradação Marshall

Peneiras	Porcentagem do material retido	Quantidade (g)
25,4mm - 19mm	15	180
19mm - 9,5mm	20	240
9,5mm - nº 4	15	180
nº 4 - nº 10	15	180
nº 10 - nº 40	15	180
nº 40 - nº 200	15	180
< nº 200	5	60
Total	100	1200

Fonte: DNER-ME 401/99 (p.7)

Inicialmente os materiais foram secos em estufa a 105°C até constância de massa em seguida foram misturados quantidades equivalentes de seixo 0, seixo 1 e pó de brita granítica, até que se tivesse uma mistura homogênea desses materiais.

Então fez-se o peneiramento desse material seguindo a sequência de peneiras já mencionada e colocou-se os materiais retidos por peneira em vasilhames separados conforme mostrado na figura 18.

Figura 18 – Material usado para ensaio de degradação Marshall



Fonte: Própria do autor

Após a separação do material, foram pesadas quantidades necessárias para a confecção dos corpos de prova. Os corpos foram então aquecidos até a temperatura de 175°C e o ligante à 147°C conforme previsto em norma. Em seguida misturou-se 60 gramas do ligante aos agregados aquecidos e em seguida foram colocados no molde de compactação Marshall até que atingissem a temperatura de 135°C para a compactação. O corpos de provas foram golpeados 50 vezes em cada face e ficaram em repouso por 24 horas para o desmolde.

Depois de desmoldados os corpos de provas foram levados ao equipamento "Rotarex" (Figura 19) para a retirada do ligante, utilizando gasolina. Depois da retirada do ligante os agregados foram novamente peneirados e anotou-se o valores passantes para a verificação da degradação dos agregados em cada peneira.

O ensaio de índice de degradação Marshall sem ligante (ID_M), seguiu os mesmos procedimentos exceto pela adição e retirada de CAP das amostras.

Figura 19 - Equipamento “Rotarex” utilizado na retirada do ligante asfáltico (a) e amostra dentro do mesmo equipamento (b)



Fonte: Própria do autor

4.3.1.4 Abrasão “Los Angeles”

O manuseio dos agregados durante o processo de transporte e execução de revestimentos acaba desgastando e quebrando o material gerando mudanças em sua granulometria. Essas mudanças não são desejáveis uma vez que podem modificar as características esperadas para a mistura asfáltica.

Agregados usados em revestimentos asfálticos devem apresentar uma maior capacidade para resistir aos esforços do tráfego do que aqueles usados em camadas inferiores do pavimento.

Durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão. A abrasão ocorre também durante a ação do tráfego. Eles devem apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração. Agregados localizados próximos ou na superfície do pavimento devem apresentar resistência à abrasão maior do que os localizados nas camadas inferiores. (BERNUCCI et al, 2006, p.133 e 134).

O ensaio para determinar a resistência abrasiva foi realizado para os seixos 0 e 1.

Primeiramente deve-se ressaltar que tentou-se enquadrar ambos os materiais nas faixas determinadas na norma DNER-ME 035/98. Porém o seixo 1, apesar de apresentar uma tendência a ser enquadrado na faixa de graduação “B”, acabou não sendo enquadrado perfeitamente nessa graduação, pois não foi possível obter-se material retido na peneira 12,5 milímetros o suficiente a fim de completar os 2500 gramas recomendados pela norma, então para continuar com o ensaio completou-se o peso total de 5 quilogramas com material retido na peneira de 9,5 milímetros. Já o seixo 0 ficou dentro da graduação “C”.

Tabela 3 – Graduação das amostras para ensaio de abrasão “Los Angeles”

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

Fonte: DNER-ME 035/98 (p.5)

Após esses ajustes as amostras foram lavadas e secas a 105°C até constância de massa e em seguidas resfriadas a temperatura ambiente por 1 hora, e então foram pesadas. Em seguida o material é colocado em dentro da máquina “Los Angeles” (Figura 20 a) juntamente com esferas metálicas. Para o seixo 0 foram utilizadas oito esferas enquanto para o seixo 1 onze.

O tambor foi então fechado e a máquina ligada realizando as 500 rotações a uma velocidade de aproximadamente 33 rpm, como exigido em norma. Feito isso, retirou-se cuidadosamente todo o material de dentro do tambor (Figura 20 b), em seguida lavou-se o material dentro da peneira de abertura 1,7mm, tendo o cuidado com a perda de material. Depois da lavagem foi feita a secagem do material em estufa a 105°C e no dia seguinte fez-se a pesagem do material.

Figura 20 – Máquina “Los Angeles” (a) e amostra logo após o processo abrasivo (b)



Fonte: Própria do autor

A abrasão “Los Angeles é determinada pela fórmula:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

- a) A_n = abrasão “Los Angeles” da graduação n , com aproximação de 1%;
- b) n = graduação (A,B,C,D,E,F ou G) escolhido no ensaio;
- c) m_n = massa total seca, colocada na máquina;
- d) m'_n = massa da amostra lavada e seca, após ensaio.

4.3.1.5 Absorção do agregado graúdo

A porosidade é uma característica dos agregados que pode influenciar significativamente na coesão das misturas asfálticas. A sua determinação é realizada através do ensaio de absorção conforme a norma DNER-ME 081/98.

Um agregado poroso irá também absorver ligante asfáltico consumindo parte do ligante necessário para dar coesão a uma mistura asfáltica. Para compensar esse fato, deve-se incorporar à mistura asfáltica uma quantidade adicional de ligante. (BERNUCCI et al, 2006, p. 142).

Para a realização desse ensaio utilizou-se amostras de 3 quilogramas para seixos 0 e 1. As amostras usadas foram as porções retidas na peneira de 4,8mm sendo previamente lavadas e secas em estufa a 105°C pelo período de 24h. Após esse período as amostras foram resfriadas ao ar por 1 hora e então pesadas, obtendo-se o peso da sua massa seca, “M_s”. Em seguida foram imersas em água a temperatura ambiente por um período de 24 horas, tendo o cuidado agitá-las algumas vezes por dia para a retirada de ar.

Passado o período de imersão as amostras foram retiradas da água e colocadas sobre um pano com boa absorção para que fosse feito o enxugamento do material. Esse processo é necessário para retirar qualquer película visível de água da amostra.

Figura 21 – Amostra sobre pano absorvente após 24h de imersão em água



Fonte: Própria do autor

Logo após pesou-se o material saturado, “M_h”. A absorção foi então obtida pela fórmula:

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad [\text{Eq. 2}]$$

Onde:

- a) a = absorção do agregado, em porcentagem;
- b) M_h = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em g;
- c) M_s = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g.

4.3.1.6 Determinação da densidade real e aparente do agregado graúdo

A densidade real ou massa específica real segundo Senço (1997) é a massa por unidade de volume apenas da parte sólida, excluindo-se todos os vazios. Enquanto a densidade aparente é a relação entre a massa de uma certa porção de agregados e os volumes que essa massa ocupa nas condições de compactação que estiver. Sua determinação é feita de forma simples e feita logo em sequência ao ensaio de absorção, utilizando, inclusive a mesma amostra.

Após ter-se anotado o peso saturado da amostra, " M_h ", durante o ensaio de absorção, a amostra é colocada dentro de um cesto metálico, capaz de reter todas as partículas, conforme pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Pesagem da amostra dentro do cesto metálico imersos em água



Fonte: Própria do autor

Como pode ser visto o cesto é preso a haste metálica através de um barbante afim de se evitar que sua superfície não encoste nas laterais nem no fundo do recipiente com água. Todo o conjunto de recipiente com água e cesto são tarados para que a balança mostre apenas o peso da amostra submersa, " L ". Com esse

valores é possível calcular o valor da densidade real e a densidade aparente do material:

a) Densidade real

$$D_r = \frac{M_s}{M_s - L} \quad [\text{Eq. 3}]$$

b) Densidade Aparente

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad [\text{Eq. 4}]$$

Onde:

- D_r = densidade ou massa específica real, em g/cm³;
- D_{ap} = densidade ou massa específica aparente, g/cm³;
- M_s = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g;
- M_h = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em g;
- L = leitura na balança correspondente ao agregado submerso, em g.

4.3.1.7 Índice de forma

A análise da forma dos grãos é importante para conhecer quanto o agregado irá modificar as características das misturas asfálticas como trabalhabilidade e resistênica ao cisalhamento.

A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistênica ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade. Partículas irregulares ou de forma angular tais como pedra britada, cascalhos e algumas areias de brita tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados, tanto maior quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiladas forem suas arestas. (BERNUCCI et al, 2006, p. 139).

A determinação do índice de forma foi feita apenas para o seixo 1, uma vez que era o único agregado que se enquadrava dentro dos critérios da norma ABNT NBR 7809/06.

O procedimento consistiu em separar 2,5 kg de amostra, secá-lo em estufa até constância de massa e fazer o seu peneiramento de acordo com a norma. Após o peneiramento excluiu-se o material retido das peneiras que foram menor que 5% da massa total da amostra, além de exclui também todo o material passante na peneira de 9,5 mm.

Figura 23 – Material retido nas peneiras de aberturas 19mm e 9,5mm



Fonte: Própria do autor

Após essa etapa, as massas retidas foram separadas e então escolhidos 200 grãos com o auxílio da seguinte fórmula:

$$N_i = \frac{200}{F_1 + F_2 + \dots + F_i + \dots + F_n} \times F_i \quad [\text{Eq. 5}]$$

Onde:

- a) N_i = número de grãos para a medição, da fração i
- b) F_i = porcentagem em massa retida individual correspondente a fração i
- c) $F_1 + F_2 + \dots + F_i + \dots + F_n$ = somas da porcentagens em peso retido individuais das frações obtidas

Obs: O valor obtido na fórmula N_i , deve ser arredondado ao inteiro mais próximo

Após a separação dos grãos foi feita a medição de duas dimensões de cada um deles, sendo “c” o comprimento e “e” a espessura (Figura 24). Em seguida foi calculado o índice $\frac{c}{e}$ de cada um dos grãos e ao final disso calculou-se a média de todos esses valores para finalmente encontrar-se o valor do índice de forma da amostra.

Figura 24 – Medição das amostras usando paquímetro digital



Fonte: Própria do autor

4.3.1.8 Angularidade

O estudo da angularidade do agregado tem o objetivo de saber a porcentagem de vazios de ar em uma determinada faixa granulométrica do agregado miúdo, uma vez que essa característica irá garantir a resistência a deformação permanente das misturas asfálticas.

A angularidade do agregado miúdo garante o atrito entre as partículas que propicia a resistência à deformação permanente. É definida como a porcentagem de vazios de ar presentes em agregados com tamanhos de partículas menores que 2,36mm, em uma condição de estado solto. (BERNUCCI et al, 2006, p.151).

O ensaio foi iniciado determinando-se o volume do cilindro metálico que foi usado na atividade. Passou-se uma leve camada de vaselina nas bordas do cilindro e em seguida este foi pesado juntamente com uma placa de vidro, denominando esse valor de “P₁”. Depois encheu-se completamente o cilindro com água destilada a 23°C e colocou-se a placa de vidro sobre o mesmo. Então pesou-se o cilindro com água destilada e a placa de vidro, chamou-se esse peso de “P₂”. Seu volume foi calculado utilizando a fórmula:

$$V = \frac{1000 \times (P_2 - P_1)}{D} \quad [\text{Eq. 6}]$$

Onde:

- a) V = Volume do cilindro, em cm³
- b) (P₂ - P₁) = Massa líquida de água, em gramas
- c) D = Densidade da água em g/cm³

Passada essa etapa foram separadas amostras de areia e pó de brita, utilizando frações de cada material conforme indicado no Quadro 1.

Quadro 1 – Materiais retidos em cada peneira para ensaio de angularidade

Material	Massa (g)
Passante na 2,36mm / Retido na 1,18mm	44
Passante na 1,18mm / Retido na 600 µm	57
Passante na 600 µm / Retido na 300 µm	72
Passante na 300 µm / Retido na 150 µm	17
Total	190

Fonte: Elaborada pelo autor, com base na ASTM C 1252 - 03

As amostras de 190 gramas foram então despejadas dentro de um cone metálico e retidas no cilindro localizado logo abaixo (Figura 25). Após todo o material escoar pelo cone fez-se o alisamento da amostra, passando uma fina placa metálica sobre o topo do cilindro, tendo o cuidado para não assentar a amostra. Em seguida limpou-se a superfície externa do cilindro e mediu-se seu peso, chamou-se esse peso de “P₃”. Finalmente pesou-se o cilindro totalmente limpo seco, denominando-o de “P₄”.

Figura 25 – Escoamento do material no ensaio de angularidade



Fonte: Própria do autor

A angularidade do agregado miúdo foi calculada pela fórmula:

$$U = \frac{V - \frac{(P_3 - P_4)}{D_r}}{V} \times 100 \quad [\text{Eq. 7}]$$

Onde:

- a) Fator de angularidade, em porcentagem;
- b) V = volume do cilindro, em cm^3 ;
- c) $(P_3 - P_4)$ = massa da amostra retida no cilindro, em g;
- d) D_r = densidade real do agregado, em g/cm^3 .

4.3.1.9 Equivalente de areia

O uso de alguns agregados requer um parâmetro que verifique a porcentagem de argila ou outros materiais deletérios que podem estar misturados ao agregado. Dessa forma o ensaio de equivalente de areia serve para determinar a proporção aceitável desses materiais indejáveis nas misturas asfálticas.

O ensaio de equivalente de areia foi realizado, com o pó de brita e a areia, conforme indicado na norma DNER-ME 054/97. Para o ensaio foram separadas 3 cápsulas padrão contendo material passante na peneira 4,8mm que foi seco em estufa a 60° por 2 horas. Depois preencheu-se 3 provetas graduadas com uma solução de

cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído até a marca de 10cm a partir da base e em seguida colocou-se uma amostra em cada proveta, tendo a preocupação de bater levemente no fundo para retirar qualquer ar que pudesse alterar os valores do ensaio e então deixou-se as provetas em repouso por 10 minutos.

Passado os 10 minutos em repouso fechou-se os frascos com uma rolha e agitou-se cada um por 30 segundos. Os movimentos foram feitos colocando a proveta na posição horizontal de modo que se realizassem um total de 90 ciclos. Em seguida as provetas foram preenchidas com a solução até que se atingisse a marca de aferição superior e então foram novamente deixadas em repouso, mas dessa vez por um período de 20 minutos, como pode ser visto na figura 26.

Figura 26 – Provetas preenchidas com as amostras e a solução



Fonte: Própria do autor

Ao término desse tempo foi medida a altura da suspensão partindo da base da proveta, e chamou-se esse valor de " h_1 " em seguida introduziu-se cuidadosamente um pistão dentro do frasco até assentá-lo na amostra (Figura 27). A partir desse momento girou-se levemente o pistão afim de enxergar um dos parafusos laterais, e então mediu-se a altura " h_2 ". Essa altura vai do centro do parafuso até a base da amostra assentada.

Figura 27 – Pistão assentado sobre a amostra



Fonte: Própria do autor

O cálculo de equivalente de areia é feito pela fórmula:

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad [\text{Eq. 8}]$$

Onde:

- a) EA = equivalente de areia, em porcentagem;
- b) h_1 = altura da suspensão argilosa;
- c) h_2 = altura da amostra assentada.

4.3.1.10 Densidade real do agregado miúdo

Para Senço (2007) densidade real é a relação entre o peso ao ar de um volume de material a uma determinada temperatura e o peso ao ar de igual volume de água destilada a uma determinada temperatura.

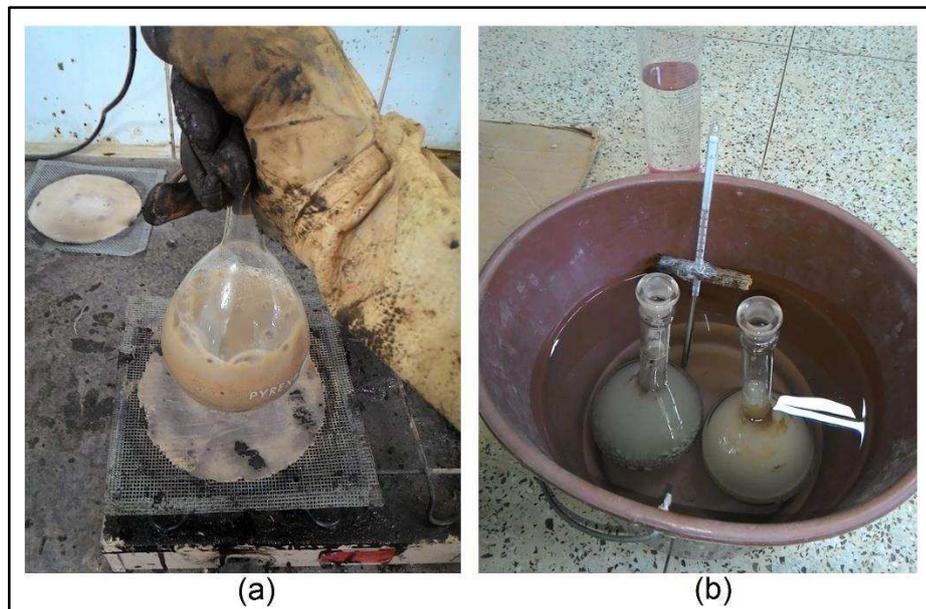
O procedimento adotado para a sua determinação foi feito de acordo com a DNER-ME 084/95. Bernucci et al (2006) comenta que nesse procedimento não é determinado a absorção do material, uma vez que a condição de superfície saturada seca é difícil de ser observada.

Inicia-se o procedimento peneirando aproximadamente 1kg de amostra seca e separando em porções com cerca de 500g de material retido entre as peneiras de abertura 4,8mm e 0,075mm . Em seguida é medido o peso de um picnômetro limpo e seco, denominando esse valor de “A”. Em seguida coloca-se as 500g de material seco dentro do picnômetro, e então pesa-se o valor do conjunto, picnômetro e amostra, esse valor foi chamado de “B”.

Preencheu-se então o picnômetro com água destilada até que se cobri-se inteiramente a amostra, mas sem enchê-lo completamente. Após isso, levou-se o frasco para uma fonte de calor por aproximadamente 15 min. Durante esse período foi feito o agitação para expulsar o ar da amostra (Figura 28 a).

Passado esse processo fez-se o resfriamento da amostra e preencheu-se o picnômetro até a marca de aferição. Em colocou-se o frasco em banho-maria até que atingisse a temperatura de 25°C (Figura 28 b) e pesou-se o conjunto, tendo o cuidado de secar toda sua superfície externa, denominando esse valor de “C”.

Figura 28 – Picnômetro sendo aquecido (a) e controle da temperatura das amostras para pesagem de “C” (b)



Fonte: Própria do autor

Fez-se então a limpeza do frasco, secando o completamente para então se adicionar água destilada à 25°C para então pesá-lo novamente. O valor do peso do frasco mais água destilada foi chamado de “D”.

O cálculo da densidade real do agregado foi obtido pela fórmula:

$$D_r = \frac{B-A}{(D-A)-(C-A)} \quad [\text{Eq. 9}]$$

Onde:

- a) D_r = densidade real, g/cm³;
- b) A = peso do picnômetro limpo e seco, em g;
- c) B = peso do picnômetro e amostra secos, em g;
- d) C = peso picnômetro preenchido com água e amostra à 25°C, em g;
- e) D = peso picnômetro e água destilada à 25°C, em g.

4.3.1.11 *Massa específica real do fíler*

A determinação da massa específica real feita para a cal hidratada, foi realizada conforme pode ser encontrado na norma DNER-ME 085/94, uma vez que esse ensaio serve apenas para materiais finamente pulverizados.

Utilizando um frasco de medição limpo e seco, conhecimento como frasco Le Chatelier, preenchido com querosene até a marcação "0" do frasco, sendo essa a leitura inicial. Em seguida o frasco foi colocado em banho-maria a 25°C enquanto era pesada uma amostra de aproximadamente 45g de cal hidratada (Figura 29 a). Então, com o auxílio de um funil, seco e limpo, colocou-se a amostra de cal com bastante cuidado dentro do frasco, para que o material não fica-se retido nas paredes do mesmo. Ao final desse procedimento fez a leitura final marcada no frasco. Com esses valores foi feito o cálculo da massa específica real do material através da fórmula:

$$\mu = \frac{M_s}{V} \quad [\text{Eq. 10}]$$

Onde:

- a) μ = Massa específica real do material, em g/cm³;
- b) M_s = Massa do material, em g;

c) V = volume do líquido deslocado, em cm^3 .

Obs: O volume do líquido deslocado é a diferença entre a leitura inicial e a leitura final.

Figura 29 – Amostra seca (a), frasco Le Chatelier com querosene (b) e frasco preenchido com querosene e cal (c)



Fonte: Própria do Autor (2016)

4.3.2 Ensaios com CAP

4.3.2.1 Ponto de amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento correlaciona a temperatura com o ponto de fusão do ligante asfáltico, uma vez que o asfalto é composto por diferentes materiais, como asfaltenos e maltenos, que possuem pontos de fusão distintos. Para Senço (2007) é complicado fixar um valor comum para o ponto de fusão dos dois elementos, por isso a necessidade da realização do ensaio.

A determinação do ponto de amolecimento do CAP foi feita utilizando o conjunto anel bola. Iniciou-se o ensaio com o aquecimento do ligante até uma temperatura de aproximadamente 120°C até que se verifica-se que o CAP era completamente fluido. Em seguida colocou-se o ligante dentro de dois anéis metálicos tendo o cuidado de deixar a superfície alisada, conforme indicado na norma. Então foram resfriados a temperatura ambiente por aproximadamente 45 minutos.

Os anéis foram colocados dentro de um suporte metálico, em seguida as guias das esferas foram postas sobre os anéis e finalmente colocaram-se as esferas metálicas sobre os centros dos anéis. Todo esse conjunto foi então posto dentro de um béquer com água e aquecido até que as bolas atingissem a placa inferior do suporte metálico. Marcou-se a temperatura em que cada bola atingiu o fundo do suporte e para a determinação do ponto de amolecimento fez-se a média dessas temperaturas.

Figura 30 – Amostras de CAP logo após atingirem o fundo do suporte metálico



Fonte: Própria do autor

4.3.2.2 Penetração

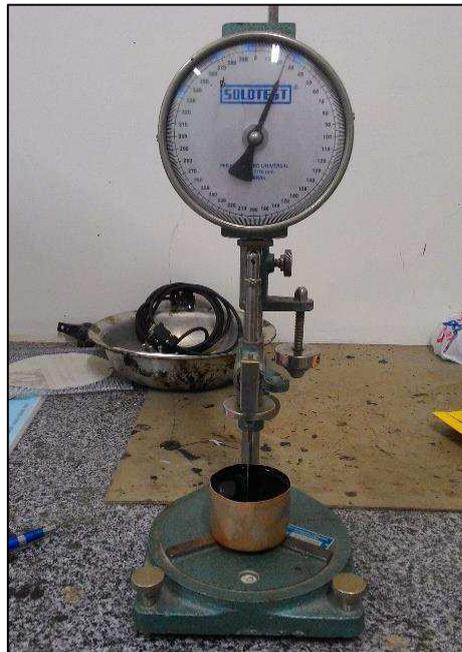
O ensaio de penetração é considerado o mais antigo teste para ligantes betuminosos e é fundamental para a caracterização e controle do CAP. Segundo a Pavement Interactive (2007) foi idealizado em 1888 por H.C. Bowen e posteriormente sofreu modificações de A.W Dow, Richardson e Forrest.

Para a realização desse ensaio aqueceu-se inicialmente o CAP até torná-lo liquefeito e então colocou-se o material dentro de três recipientes metálicos. Os recipientes foram deixados em repouso para resfriamento por aproximadamente uma hora e trinta minutos, passado esse tempo as amostras foram colocadas em banho-maria a uma temperatura de 25°C por mais duas horas.

Passado esse tempo cada uma das amostras foi submetida ao ensaio de penetração propriamente dito. A amostra foi colocada sob a agulha do penetrômetro,

de modo que a ponta apenas toca-se a superfície da amostra, depois liberou-se o peso de 100 gramas pelo período de 5 segundos e então anotou-se a variação marcada no leitor do penetrômetro. O procedimento foi feito três vezes para cada amostra, buscando sempre posicionar a agulha em diferentes regiões da amostra. Para encontrar o resultado do ensaio foi feita uma média para os valores encontrados para as três amostras.

Figura 31 – Penetrômetro e amostra de CAP



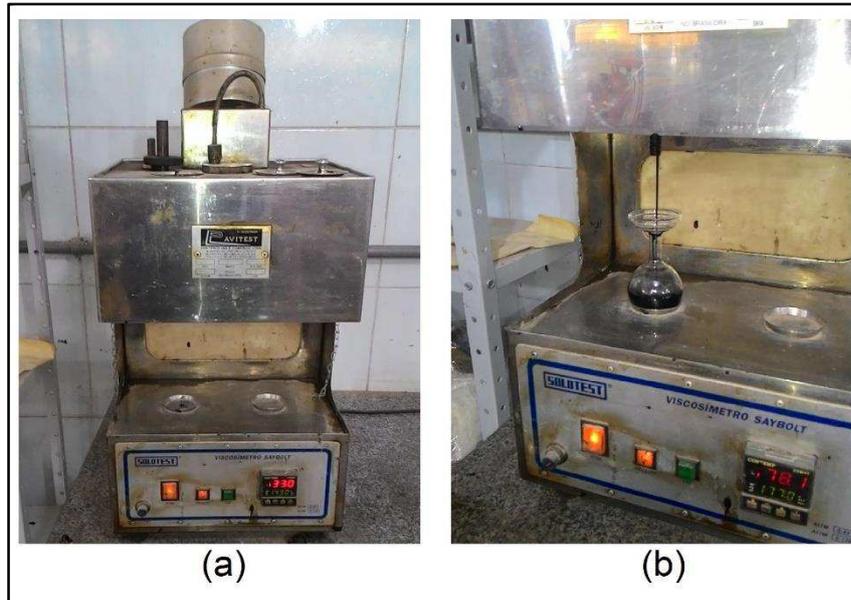
Fonte: Própria do autor

4.3.2.3 Viscosidade Saybolt-Furol

Bernucci et al (2006, p. 43) define a viscosidade como uma “medida da consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento”. No Brasil o aparelho mais utilizado para fazer a determinação da viscosidade é chamado de viscosímetro Saybolt-Furol, conforme pode ser visto na Figura 32 a.

Para a realização do ensaio, foram inicialmente determinadas três temperaturas, conforme determinado em norma. Então aqueceu-se as amostras 10°C acima de cada temperatura e então despejou-se o material dentro da abertura do aparelho, em seguida abriu-se o orifício de escoamento na parte inferior e tomou-se o tempo, em segundos, para que um frasco de 60 ml fosse preenchido. O tempo tomado por um cronômetro é chamado de Segundo Saybolt Furol (SSF).

Figura 32 – Viscosímetro Saybolt-Furol (a) e escoamento do CAP (b)



Fonte: Própria do Autor

As temperaturas escolhidas para o ensaio foram 135°C, 149°C e 177°C, uma vez que tais temperaturas foram usadas para determinar um gráfico que relaciona a viscosidade com a temperatura, usado para saber as temperaturas que os agregados e o ligante serão utilizados para a confecção de corpos de prova para a caracterização da mistura asfáltica pelo método Marshall.

4.3.3 Ensaio com as misturas asfálticas

4.3.3.1 Dosagem Marshall

A dosagem Marshall tem o objetivo de determinar teor ótimo de CAP para a mistura asfáltica estudada a partir da confecção de corpos de prova. Utilizando as informações dos ensaios com agregados foi possível determinar as massas específicas reais, bem como, enquadrá-los dentro de uma faixa granulométrica de acordo com a norma do DNIT 031/2006 – ES.

A partir da escolha da faixa granulométrica a ser utilizada fez-se o cálculo das proporções em peso de cada agregado de acordo com os teores de ligante conforme com os limites da faixa escolhida. Para cada um dos teores foram confeccionados 3 corpos de prova seguindo os procedimentos indicados pela norma DNER-ME 043/95.

Utilizando as informações do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol foi possível definir as temperaturas para o CAP, agregado e compactação.

Com as temperaturas definidas foram seguidas uma série de procedimentos para a determinação das características volumétricas e físicas da mistura asfáltica. Essas etapas podem ser resumidas em:

- a) Pesagem e secagem dos agregados (Figura 33);
- b) Aquecimento dos agregados até a temperatura de 165°C;
- c) Aquecimento do CAP até a temperatura de 155°C;
- d) Mistura do CAP e agregados por um período de 2 a 3 minutos até que se obtive-se homogeneidade;
- e) Colocação da mistura no anel metálico de compactação até que a mistura atingisse a temperatura de compactação;
- f) Compactação mecânica dos CP's, sendo golpeados 75 vezes em cada fase. O procedimento foi feito por compactador Marshall automatizado (Figura 34 b);
- g) Após 24 horas da compactação fez-se o desmolde do CP's;
- h) Medidas 4 alturas, em posições diametralmente opostas, e 3 diâmetros em posições paralelas (Figura 35 a);
- i) Pesagem do CP's secos;
- j) Pesagem hidrostática dos CP's (Figura 35 b).

Em seguida os CP's foram imersos em água a 60°C (Figura 35 c) durante o período de 30 a 40 minutos. Passado esse período eles foram postos em uma prensa Marshall e assim determinados sua estabilidade e fluência.

A estabilidade Marshall é definida por Bernucci (2006, p.222) como a “carga máxima a qual o corpo-de-prova resiste antes da ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante (0,8mm/segundo)”.

Já a fluência também segundo Bernucci (2006) é o deslocamento vertical do corpo de prova até que a carga máxima seja alcançada.

Para a determinação da estabilidade Marshall é necessário definir primeiramente um fator de correção “f” em função da altura do corpo de prova, esse fator é definido pela seguinte expressão:

$$f = 927,23 \times h^{-1,64} \quad [\text{Eq.11}]$$

Onde:

- a) f = fator de correção em função da altura do corpo de prova;
- b) h = altura do corpo de prova.

A estabilidade Marshall é calculada pela expressão:

$$E = L_p \times f \times F_p \quad [\text{Eq. 12}]$$

Onde:

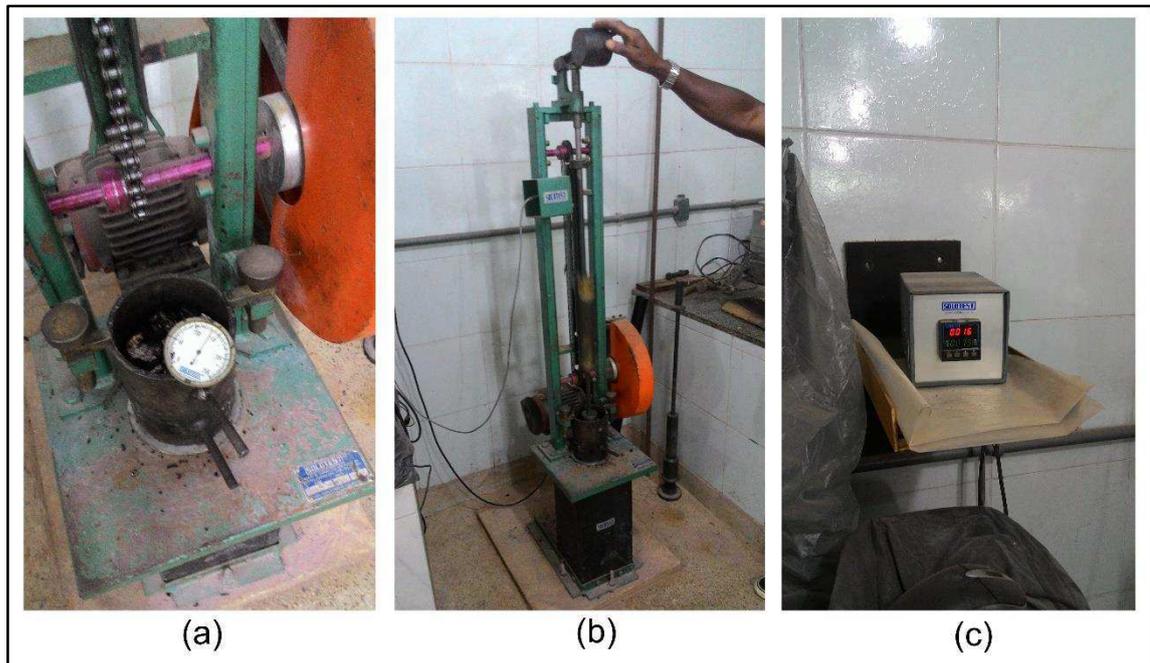
- a) E = estabilidade Marshall, em kgf;
- b) L_p = leitura da prensa, em kgf;
- c) f = fator de correção em função da altura do corpo de prova;
- d) F_p = fator de correção da prensa, o fator para a prensa usada no estudo é igua a 1.

Figura 33 – Agregados pesados e secos



Fonte: Própria do autor

Figura 34 – Controle da temperatura de compactação (a), compactação do corpo de prova (b) e controlador de golpes (c)



Fonte: Própria do autor

Figura 35 – Medição das dimensões dos CP's (a), pesagem hidrostática (b) e CP's imerso em água a 60°C (c)



Fonte: Própria do autor

Os parâmetros volumétricos foram determinados com a utilização das seguintes expressões matemáticas:

a) Densidade máxima teórica (DMT)

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%CAP}{G_{CAP}} + \frac{\%S1}{G_{S1}} + \frac{\%S0}{G_{S0}} + \frac{\%Pó}{G_{Pó}} + \frac{\%Areia}{G_{Areia}} + \frac{\%Cal}{G_{Cal}}} \quad [Eq.13]$$

Onde:

- DMT = Densidade máxima teórica da mistura, adimensional;
- %CAP, %S1, %S0, %Pó, %Areia e %Cal = Porcentagem de CAP e dos agregado em relação à massa total do corpo de prova;
- G_{CAP} , G_{S1} , G_{S0} , $G_{Pó}$, G_{Areia} , G_{Cal} = Massa específica real do CAP e dos agregados, em g/cm^3 .

b) Massa específica aparente da mistura (G_{mb})

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{sub}} \quad [Eq. 14]$$

Onde:

- G_{mb} = Massa específica aparente, em g/cm^3 ;
- M_s = Peso seco do corpo de prova, em g;
- M_{sub} = Peso hidrostático do corpo de prova, em g.

c) Volume de vazios (V_v)

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \times 100 \quad [Eq. 15]$$

Onde:

- V_v = Volume de vazios, em porcentagem;
- DMT = Densidade máxima teórica da mistura, adimensional;
- G_{mb} = Massa específica aparente, em g/cm^3 .

d) Vazios com betume (VCB)

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%CAP}{G_{CAP}} \quad [Eq. 16]$$

Onde:

- VCB = volume com betume, em percentagem;
- G_{mb} = Massa específica aparente, em g/cm^3 ;
- $\%CAP$ = Porcentagem de CAP à massa total do corpo de prova;
- G_{CAP} = Massa específica real do CAP, em g/cm^3 .

e) Vazios do agregado mineral (VAM)

$$VAM = V_v + VCB \quad [Eq. 17]$$

Onde:

- VAM = Vazios do agregado mineral, em percentagem;
- V_v = Volume de vazios, em percentagem;
- VCB = volume com betume, em percentagem.

f) Relação betume/vazio (RBV)

$$RBV = \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right) \times 100 \quad [Eq. 18]$$

Onde:

- RBV = Relação betume/vazio, em percentagem;
- VAM = Vazios do agregado mineral, em percentagem;
- V_v = Volume de vazios, em percentagem.

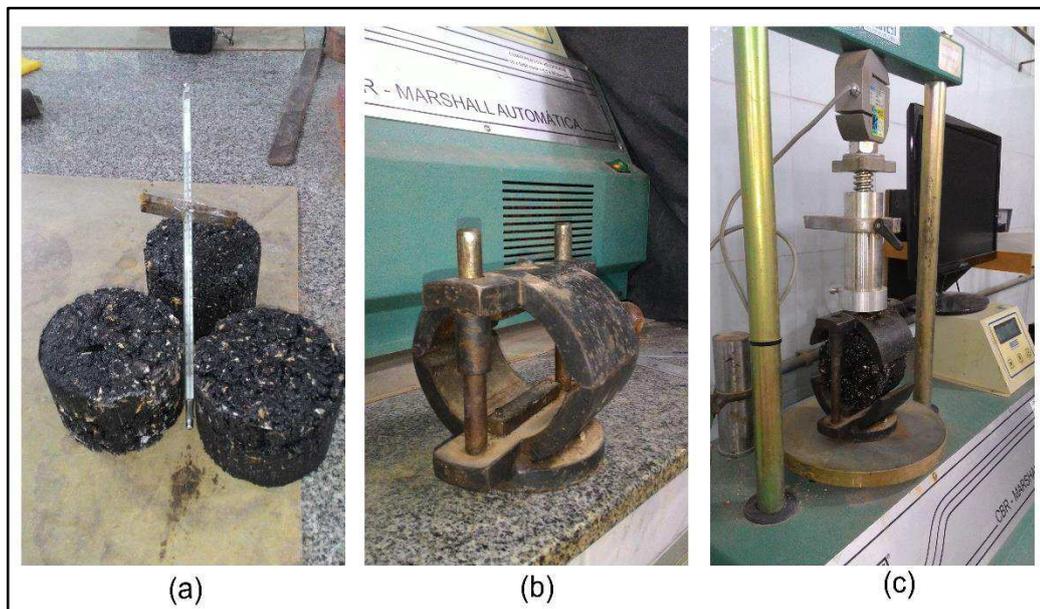
4.3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Após a determinação do teor ótimo de ligante na mistura foram confeccionados 3 CP's e submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conforme a norma DNIT 136/2010 – ME.

Os CP's foram confeccionados da mesma forma que os CP's utilizados na dosagem Marshall. Suas dimensões foram tomadas também seguindo o mesmo procedimento, 4 alturas diametralmente opostas e 3 diâmetros paralelos, onde os valores da altura e diâmetro são a média desses valores, respectivamente.

Após retiradas as medidas os CP's foram deixados em repouso a uma temperatura de 25°C por um período de 2 horas, e em seguida foram colocados em um molde com frisos e em seguida na prensa Marshall, para serem determinadas a resistência necessária para o rompimento dos CP's.

Figura 36 – Controle da temperatura dos CP's (a), molde com frisos (b) e CP no momento do ensaio (c)



A resistência à tração é calculada a partir da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{2F}{\pi DH} \quad [\text{Eq. 19}]$$

Onde:

- a) σ = Resistência à tração, em kgf/cm²;
- b) F = Carga de ruptura, em kgf;
- c) D = Diâmetro do corpo de prova, em cm;
- d) H = Altura do corpo de prova, em cm.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

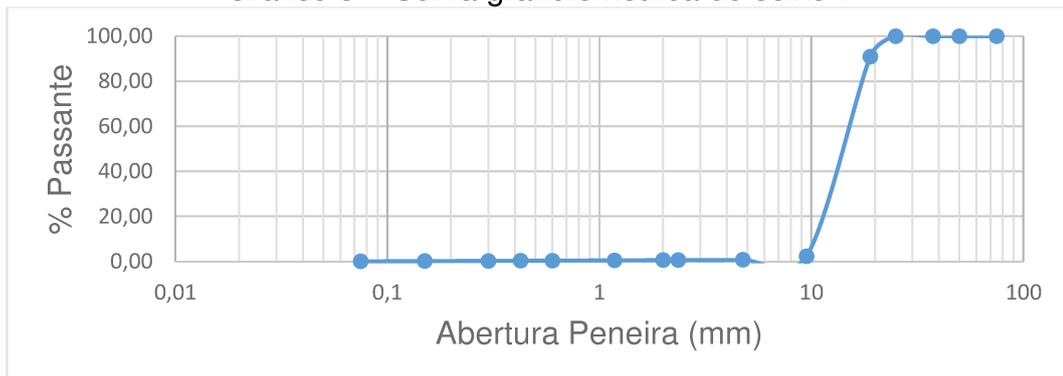
5.1 Considerações Iniciais

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios para que sejam feitas suas respectivas análises e comparações.

5.2 Análise granulométrica

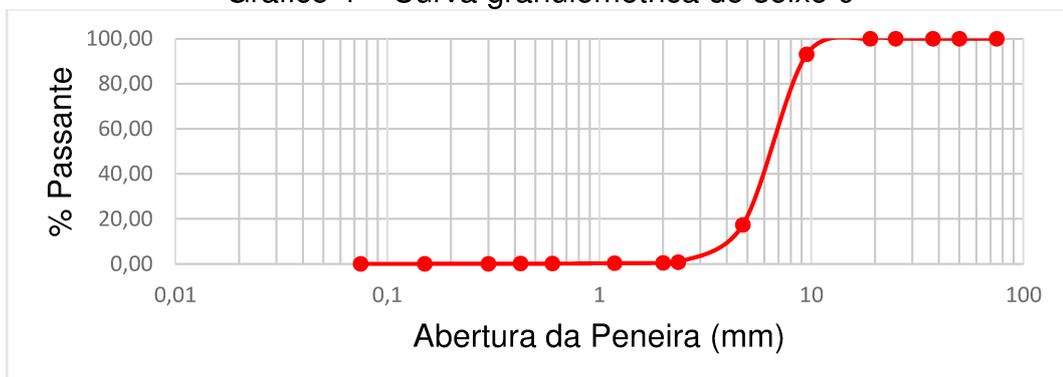
A análise granulométrica dos agregados foi realizada conforme a DNER-ME 083/98. A partir dos resultados obtidos de cada agregados (Apêndice A) foram então determinadas as seguintes curvas granulométricas:

Gráfico 3 – Curva granulométrica do seixo 1



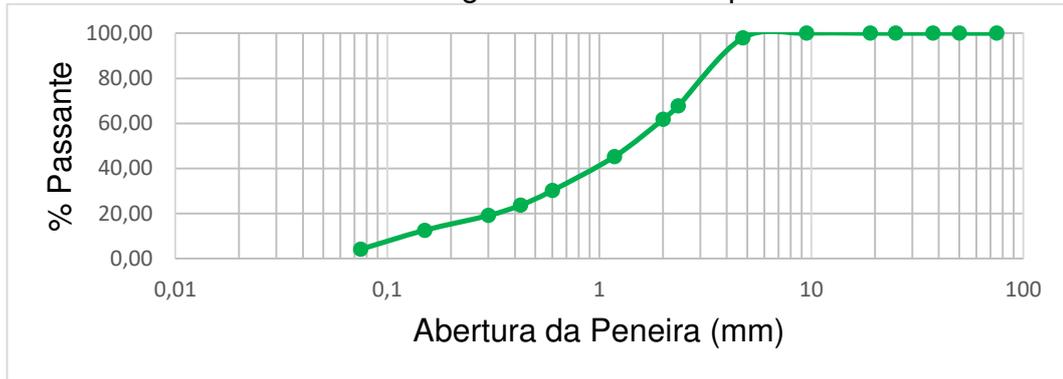
Fonte: Própria do autor

Gráfico 4 – Curva granulométrica do seixo 0



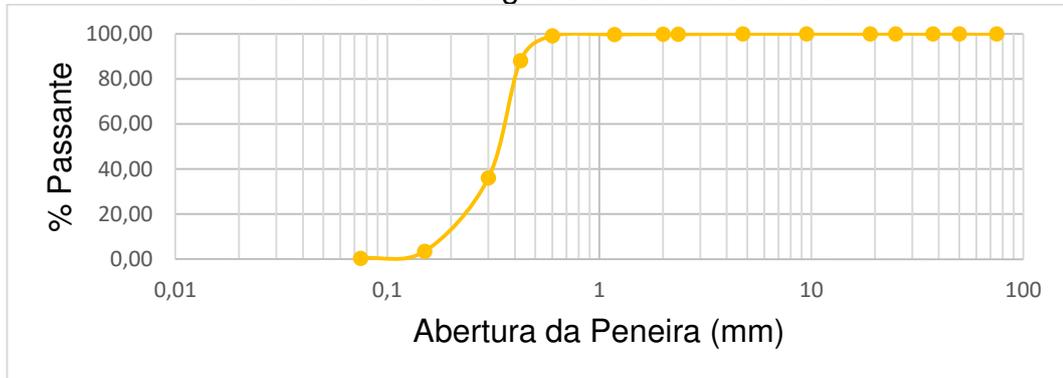
Fonte: Própria do autor

Gráfico 5 – Curva granulométrica do pó de brita



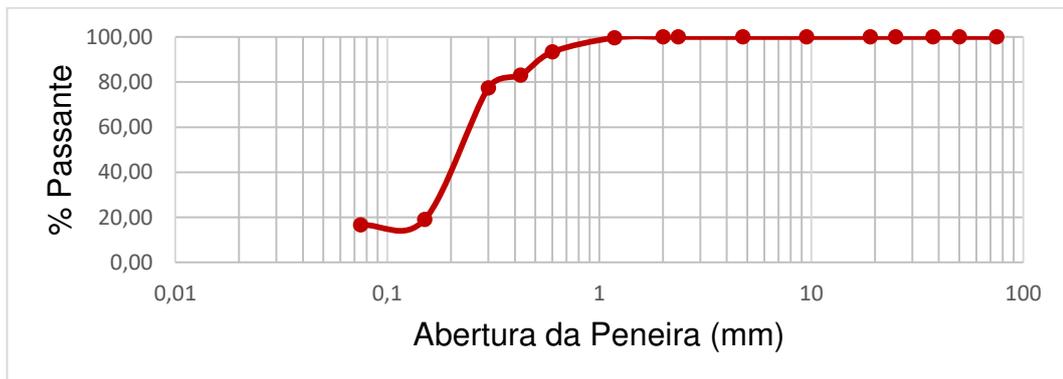
Fonte: Própria do autor

Gráfico 6 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Própria do autor

Gráfico 7 – Curva granulométrica da cal



Fonte: Própria do autor

Analisando as curvas granulométricas verificou-se que a da cal apresentou uma porção de grãos menores que 0,075mm inferior a 65%.

5.3 Massas específicas e absorção dos agregados

A partir dos ensaios de determinação das massas específicas dos agregados graúdos, miúdos e cal, além da determinação da absorção para os agregados graúdos foi possível desenvolver a Tabela 4, com base nos dados encontrados no Apêndice B.

Tabela 4 – Resumo das massas específicas e absorção

Material	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção (%)
Seixo 1	1,639	1,578	2,349
Seixo 0	1,634	1,561	2,879
Pó de brita	2,799	-	-
Areia	2,650	-	-
Cal	2,381	-	-

Fonte: Própria do autor

O estudo realizado por Nascimento (2015) utilizando agregados de origem basáltica e granítica apresentou os seguintes resultados:

Tabela 5 – Massas específicas e absorção de agregados de origem basáltica e granítica

Material	Norma de Referência	Origem	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção
Filler	DNER ME 085/84	Cal	2,195g/cm	-	-
Pó de Brita	DNER ME 084/95	Basalto	2,787g/cm ³	-	-
Pó de Brita	DNER ME 084/95	Granito	2,777g/cm ³	-	-
Brita 0	DNER ME 081/98	Basalto	2,765g/cm ³	2,649g/cm ³	1,59%
Brita 0	DNER ME 081/98	Granito	2,802g/cm ³	2,771g/cm ³	0,40%
Brita 1	DNER ME 081/98	Basalto	2,772g/cm ³	2,696g/cm ³	1,02%
Brita 1	DNER ME 081/98	Granito	2,841g/cm ³	2,819g/cm ³	0,28%

Fonte: Nascimento (2015, p.83)

Observa-se que o seixo britado apresentou valores inferiores de massas específicas, em contra-partida maiores valores de absorção. Pode-se então fazer um

paralelo entre esses dois resultados, uma vez que quanto maior a massa específica do material menor sua absorção.

Logo é importante atentar que possivelmente misturas asfálticas que tem o seixo britado como principal agregado deverão incluir um maior teor de ligante devido sua maior absorção, decorrente da quantidade de poros presente no agregado.

5.4 Equivalente de areia

Os resultados para o equivalente de areia do pó de brita e da areia foram os seguintes:

Tabela 6 – Resultados para equivalente de areia

Material	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Equivalente de areia (%)
Areia	h1 =13,1cm h2 = 12,3 cm	h1=13,2 cm h2=12,2 cm	h1=13,8 cm h2=13,1cm	93,75
Pó de Brita	h1 =14,0cm h2=10,8 cm	h1 =13,9cm h2=10,9 cm	h1 =13,9cm h2=10,9 cm	77,9

Fonte: Própria do autor

A norma do DNIT 031/2006 estipula um valor mínimo de 55% para o equivalente de areia, com o objetivo que os materiais estejam livre de torrões de argila e outras substâncias nocivas. Tanto a areia quanto o pó de brita apresentaram bons resultados para o ensaio de equivalente de areia.

5.5 Adesividade

Segundo a DNER ME 078/94 o resultado para o ensaio de adesividade é considerado satisfatório quando não há desprendimento da película de ligante que cobre os grãos do agregado e insatisfatório quando existe desprendimento total ou parcial dessa película. Partindo desse princípio e feita uma análise tátil visual da amostra concluiu-se que a adesividade para seixo 1 analisado foi insatisfatório, uma vez que ocorreu o desprendimento parcial da película de ligante após o período de 72 horas em que o material foi deixado em repouso na estufa a uma temperatura de 40°C.

Figura 37 – Amostra do ensaio de adesividade após 72h submetida a uma temperatura de 40°C



Fonte: Própria do autor

5.6 Índice de forma

Conforme exposto no capítulo anterior o índice de forma é importante pois influencia diretamente na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica. Para a determinação desse parâmetro foi utilizado o método da ABNT NBR 7809/06 obtendo-se um valor de 2,66 para o seixo 1. Um parâmetro importante de referência consta na ABNT NBR 7211/05 que indica um valor máximo de 3 para agregados usados em concreto. A granulometria do material bem como as dimensões dos grãos podem ser encontradas no apêndice C.

5.7 Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão “Los Angeles” podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados abrasão “Los Angeles”

Material	Graduação	Peso seco antes do ensaio "Mn" (g)	Peso lavado e seco após o ensaio "M'n" (g)	Abrasão Los Angeles "An" (%)
Seixo 1	B	4993,1	4364,1	12,60%
Seixo 0	C	5002,7	4164	16,76%

Fonte: Própria do autor

Conforme foi explicado no capítulo anterior o ensaio de abrasão “Los Angeles” foi adaptado para o seixo 1.

Para fins de análise a norma DNIT 031/2006 – ES estipula um valor igual ou inferior a 50% para o ensaio de abrasão “Los Angeles”, logo os seixos 0 e 1 estão adequados em relação a esse parâmetro.

Na Tabela 8 podem ser vistos os resultados obtidos para abrasão “Los Angeles” no estudo de Nascimento (2015).

Tabela 8 – Resultados abrasão “Los Angeles” para agregados de origem basáltica e granítica

Material	Origem	Graduação	Resultados
Brita 0	Basalto	C	17,38%
Brita 0	Granito	C	12,14%
Brita 1	Basalto	B	14,00%
Brita 1	Granito	A	8,29%

Fonte: Nascimento (2015, p.85)

Nota-se por esses resultados que o seixo britado apresentou valores intermediários aos agregados de origem basáltica e granítica.

5.8 Angularidade

A partir do ensaio de angularidade dos agregados miúdos foram obtidos os seguintes resultados:

Quadro 2 – Resultados para angularidade da areia

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Volume do cilindro "V" (cm ³)	100,4	100,4	100,4
Massa do agregado dentro do cilindro "W" (g)	166,7	169,23	168,61
Massa específica real "Gsb" (g/cm ³)	2,65	2,65	2,65
FAA (%)	37,345	36,394	36,627
FAA Médio (%)	36,789		

Fonte: Própria do autor

Quadro 3 – Resultados para angularidade do pó de brita

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Volume do cilindro "V" (cm ³)	100,4	100,4	100,4
Massa do agregado dentro do cilindro "W" (g)	144,45	144,67	146,11
Massa específica real "Gsb" (g/cm ³)	2,799	2,799	2,799
FAA (%)	48,598	48,520	48,007
FAA Médio (%)	48,375		

Fonte: Própria do autor

Nascimento (2015) também realizou o estudo da angularidade para agregados miúdos de origem basáltica e granítica como que podem ser vistos na Tabela 9:

Tabela 9 – Resultados para angularidade para agregados miúdos de origem granítica e basáltica

Material	Origem	ρ_{ap}	FAA
Pó de Brita	Basalto	2,788	49,45%
Pó de Brita	Granito	2,777	49,90%

Fonte: Nascimento (2015, p.85)

O pó de brita de origem granítica analisado por Nascimento (2015) apresentou valores semelhantes ao pó de brita do atual estudo, uma vez que esse material também tem a mesma origem.

De acordo com a ASTM C 1252-03 um agregado adequado para utilização deve apresentar um FAA de no mínimo 40%, logo observa-se que a areia não atende esse parâmetro. Já o pó de brita apresentou um FAA médio de 48,375%, portanto atende as especificações da norma.

5.9 Índice de degradação Marshall

O ensaios de degradação Marshall com ligante (ID_{ML}) e sem ligante (ID_M) apresentaram os seguintes resultados:

Tabela 10 – Resultados para ensaio ID_{ML} e ID_M

Abertura das peneiras (mm)	% Passante por peneira						D
	Granulometria Original	Granulometria Após a Compactação				D	
		AM 1	AM 2	AM 3	Média		
19	85	90,13	87,88	89,68	89,23	4,23	
9,5	65	65,26	66,76	65,81	65,94	0,94	
4,75	50	50,62	52,48	50,1	51,07	1,07	
2	35	35,75	37,07	36,32	36,38	1,38	
0,42	20	20,73	21,11	20,42	20,75	0,75	
0,074	5	8,75	7,39	7,37	7,84	2,84	
ΣD						11,21	
IDML ($\Sigma D/6$)						1,868	

Abertura das peneiras (mm)	% Passante por peneira						D
	Granulometria Original	Granulometria Após a Compactação				D	
		AM 1	AM 2	AM 3	Média		
19	85	90,96	90,72	90,52	90,73	5,73	
9,5	65	67,03	66,68	66,64	66,78	1,78	
4,75	50	54,32	54,54	52,03	53,63	3,63	
2	35	39,2	37,58	37,15	37,98	2,98	
0,42	20	22	23,96	23,02	22,99	2,99	
0,074	5	9,45	10,34	8,7	9,50	4,50	
ΣD						21,613	
IDM ($\Sigma D/6$)						3,60	

Fonte: Própria do autor

A mistura para ID_{ML} apresentou resultado igual 1,868% enquanto a mistura para IDM 3,60%.

Os agregados basálticos e graníticos estudados por Nascimento (2015) apresentaram os seguintes resultados:

Quadro 4 – Resultados para ensaio ID_{ML} de agregados basálticos e graníticos

Peneiras (mm)	% Passando nas Peneiras					
	Granulometria Original	Granulometria após a compactação Basalto	D	Granulometria Original	Granulometria após a compactação Granito	D
19,00	-	-	-	85,00	86,78	1,78
9,50	76,47	78,42	1,95	65,00	65,40	0,40
4,75	58,82	61,13	2,31	50,00	50,08	0,08
2,00	41,18	43,07	1,90	35,00	35,14	0,14
0,43	23,53	25,14	1,61	20,00	20,07	0,07
0,08	5,88	7,11	1,23	5,00	5,26	0,26
		$\Sigma D =$	8,99		$\Sigma D =$	2,72
		IDMI= $\Sigma D/5 =$	1,80		IDMI= $\Sigma D/6 =$	0,45

Fonte: Nascimento (2015, p.86)

Quadro 5 – Resultados para ensaio ID_M de agregados basálticos e graníticos

Peneiras (mm)	% Passando nas Peneiras					
	Granulometria Original	Granulometria após a Compactação Basalto	D	Granulometria Original	Granulometria após a compactação Granito	D
19,00	-	-	-	85,00	87,16	2,16
9,50	76,47	79,08	2,61	65,00	66,73	1,73
4,75	58,82	62,27	3,45	50,00	51,44	1,44
2,00	41,18	43,70	2,52	35,00	37,75	2,75
0,43	23,53	24,88	1,35	20,00	21,54	1,54
0,08	5,88	6,97	1,09	5,00	6,48	1,48
		$\Sigma D =$	11,02		$\Sigma D =$	11,10
		IDM= $\Sigma D/5 =$	2,20		IDM= $\Sigma D/6 =$	1,85

Fonte: Nascimento (2015, p.86)

A mistura de agregados basálticos apresentou resultados de 2,20% e 1,80% para ID_M e ID_{ML} , respectivamente. Já a mistura composta de agregados graníticos teve como resultado 1,85% para ID_M e 0,45% para ID_{ML} .

Analisando os dados encontrados em ambos os estudos pode-se notar que a mistura composta por seixo 1, seixo 0 e pó de brita de origem granítica apresentou valores superiores tanto para ID_M quanto para ID_{ML} em relação as misturas de materiais graníticas e basálticas estudadas por Nascimento (2015), logo pode-se concluir que são menos resistentes ao desgaste sofrido durante o processo de compactação Marshall.

Em relação aos parâmetros estabelecidos na norma DNIT 031/2006 – ES a mistura do atual estudo apresenta resultados satisfatórios, uma vez que a norma estipula valores iguais ou inferiores a 5% para ID_{ML} e valores iguais ou inferiores a 8% para ID_M .

5.10 Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP)

Os resultados obtidos para o CAP 50/70 estudado foram resumidos no Quadro 6.

Quadro 6 – Resultados para o CAP

Parâmetro analisado	Unidade	Método de ensaio	Especificação da ANP (2005)	Resultados
Penetração (100g,5s,25°C)	0,1mm	ABNT NBR 6576	50 a 70	51
Ponto de amolecimento,min	°C	ABNT NBR 6560	46	49
Viscosidade Saybolt Furol	a 135°C,min	SSF	ABNT NBR 14950	141
	a 150°C,min			50
	a 177°C,min			30 a 150
				38

Fonte: Própria do autor

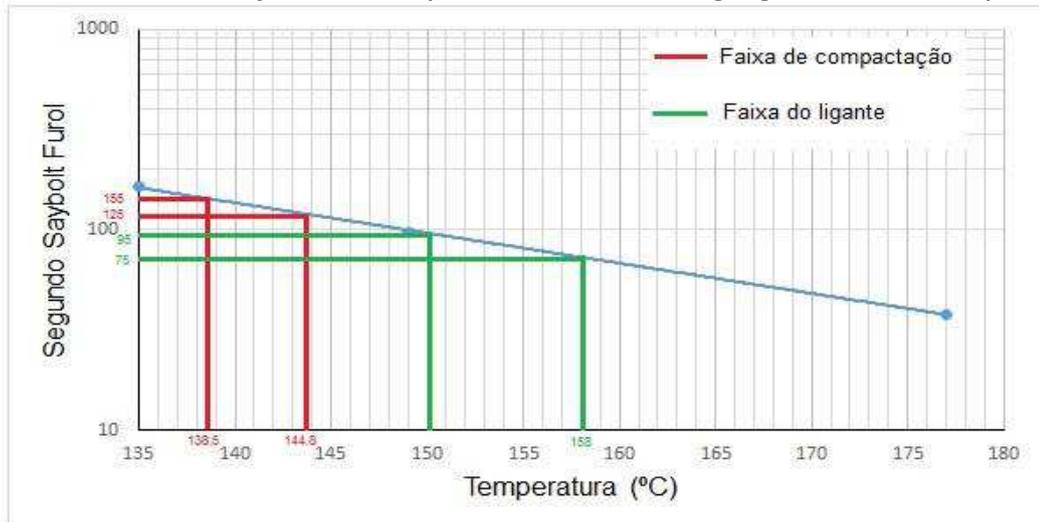
O concreto asfáltico de petróleo usado no presente estudo apresentou resultados satisfatórios para os parâmetros analisados. Todos resultados foram obtidos através dos valores encontrados no Apêndice D.

5.10.1 Escolha das temperaturas do CAP, agregados e de compactação

As temperaturas do CAP, agregados e de compactação para a confecção dos corpos de prova foram estabelecidas de acordo com a DNER 043/95 que estipula

a temperatura do ligante equivalente a viscosidade 85 ± 10 SSF. A temperatura deve ser 10°C acima da temperatura do ligante. Já a temperatura de compactação deve ser equivalente a viscosidade de 140 ± 15 SSF. Conforme pode ser visto no gráfico a seguir:

Gráfico 8 – Determinação das temperaturas do CAP, agregados e de compactação



Fonte: Própria do autor

As temperaturas escolhidas foram:

- a) 155°C para o CAP;
- b) 165°C para os agregados;
- c) 140°C para a compactação.

5.11 Dosagem Marshall

5.11.1 Enquadramento granulométrico dos agregados

Conforme foi citado no capítulo anterior os agregados estudados foram enquadrados na “Faixa B” de acordo com a norma DNIT 031/2006. O resultado do enquadramento pode ser visto no Quadro 7.

Quadro 7 – Enquadramento na Faixa B

Faixa "B"											
Peneira n°	Abertura (mm)	Cal	Areia	Pó de brita	Seixo 0	Seixo 1	Composição Granulométrica	Média DNIT	Diferença	Min	Máx
1 1/2"	50,8	100	100	100	100	100	100,00	100	0,00	100	100
1"	38,1	100	100	100	100	100	100,00	97,5	2,50	95	100
3/4"	19,00	100,00	100,00	100,00	100,00	84,27	94,65	90	4,65	80	100
3/8"	9,50	100,00	100,00	100,00	95,43	6,25	66,98	62,5	4,48	45	80
4	4,75	100,00	100,00	97,36	22,88	0,14	46,05	44	2,05	28	60
10	2,00	100,00	99,94	59,78	0,99	0,13	30,43	32,5	-2,07	20	45
40	0,425	98,20	93,79	25,06	0,53	0,09	20,24	21	-0,76	10	32
80	0,180	78,37	13,74	14,44	0,41	0,06	8,53	14	-5,47	8	20
200	0,075	22,68	3,71	7,50	0,29	0,04	3,39	5,5	-2,11	3	8
Fator		4,00%	10,00%	27,00%	25,00%	34,00%	100,00%	Soma=	0,77		

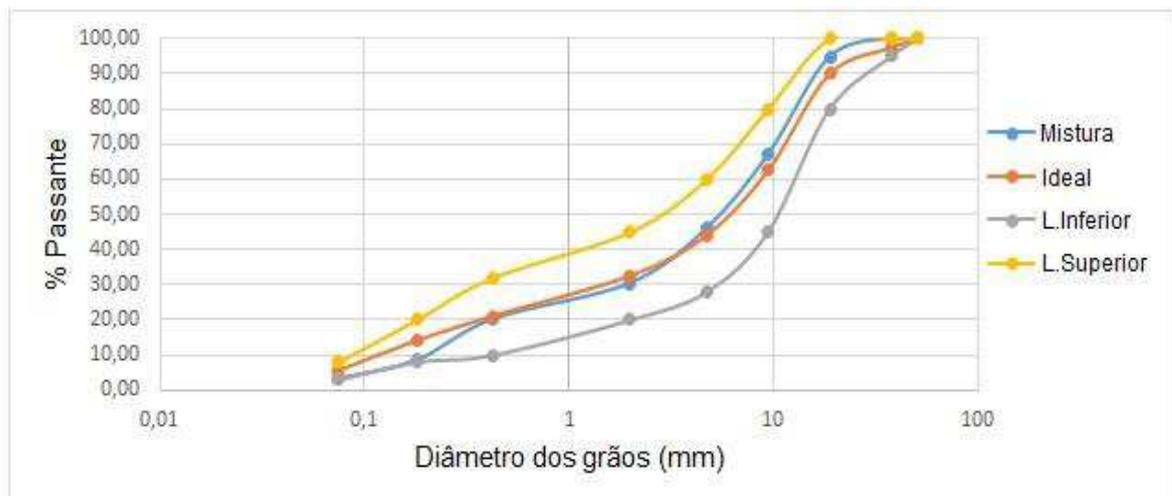
Fonte: Própria do autor

O enquadramento foi feito de forma B pelo método da tentativa através do programa Excel, onde chegou-se a um traço composto da seguinte maneira:

- a) 4% de cal
- b) 10% de areia
- c) 27% de pó de brita
- d) 25% de seixo 0
- e) 34% de seixo 1

O Gráfico 9 apresenta a curva granulométrica da mistura e os limites determinados para a Faixa B.

Gráfico 9 – Resultado do enquadramento na Faixa B



Fonte: Própria do autor

5.11.2 Propriedades volumétricas

No Quadro 8 são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros volumétricos DMT, Gmb, Vv, VAM e RBV e em seguida são apresentados os respectivos gráficos.

Quadro 8 – Parâmetros volumétricos

Teor de ligante (%)	DMT (g/cm ³)	GMB (g/cm ³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
5	1,870	1,762	5,767	8,613	14,380	59,897
5,5	1,862	1,778	4,529	9,558	14,087	67,849
6	1,854	1,779	4,019	10,437	14,456	72,197
6,5	1,846	1,775	3,874	11,275	15,149	74,426
7	1,838	1,773	3,545	12,132	15,676	77,389
Parâmetros exigidos pela DNIT 031/2006	-	-	3% a 5%	-	Mín 15%	75% a 82%

Fonte: Própria do autor

Gráfico 10 – Resultado para densidade máxima teórica (DMT)

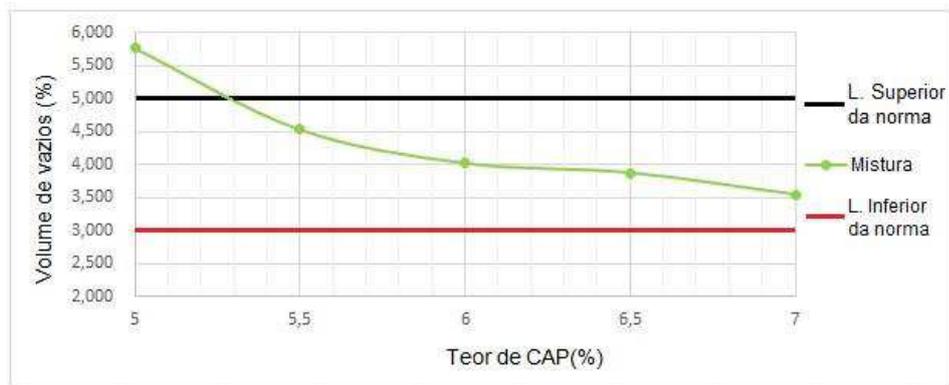


Fonte: Própria do autor

Gráfico 11 – Resultado para densidade aparente (Gmb)



Fonte: Própria do autor

Gráfico 12 – Resultado para volume de vazios (V_v)

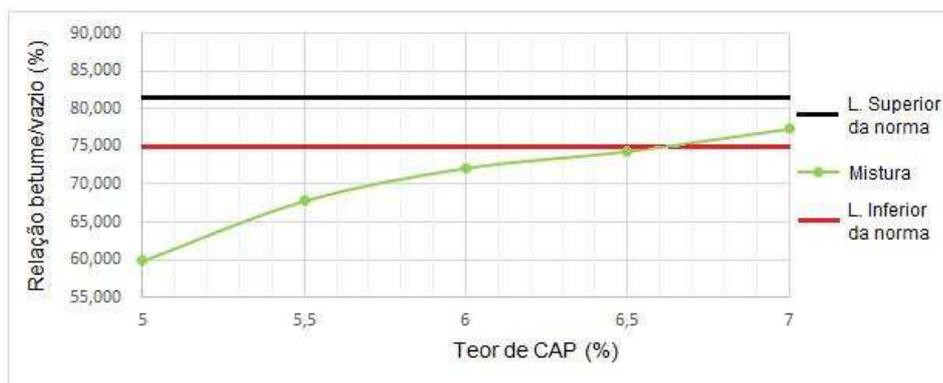
Fonte: Própria do autor

Gráfico 13 – Resultado para volume de vazio dos agregados minerais (VAM)



Fonte: Própria do autor

Gráfico 14 – Resultado para relação betume/vazio (RBV)

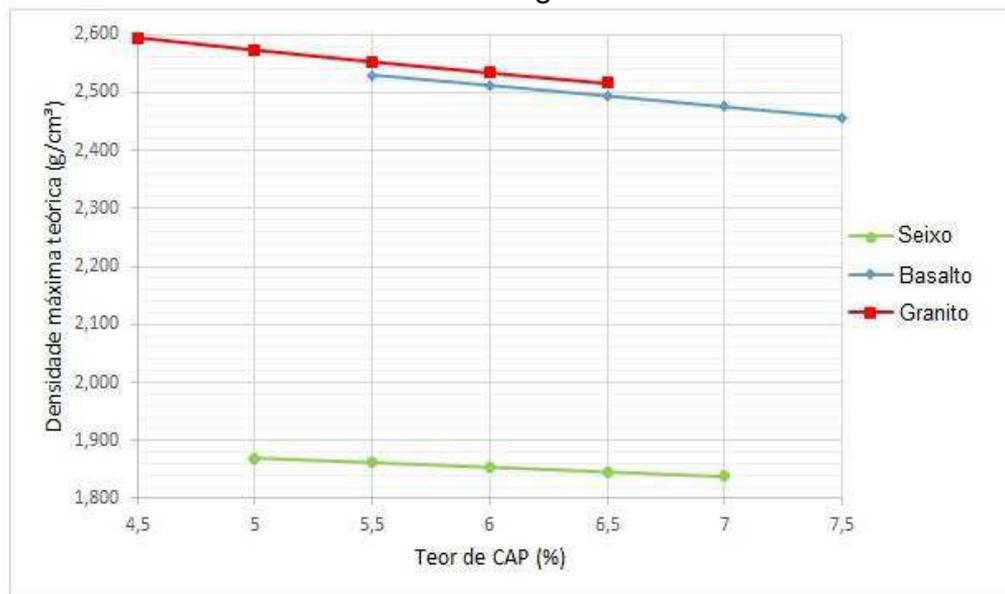


Fonte: Própria do autor

Observa-se que a mistura não atende bem os parâmetros VAM e RBV exigidos pela norma, o que pode ser justificado pela alta absorção do seixo britado.

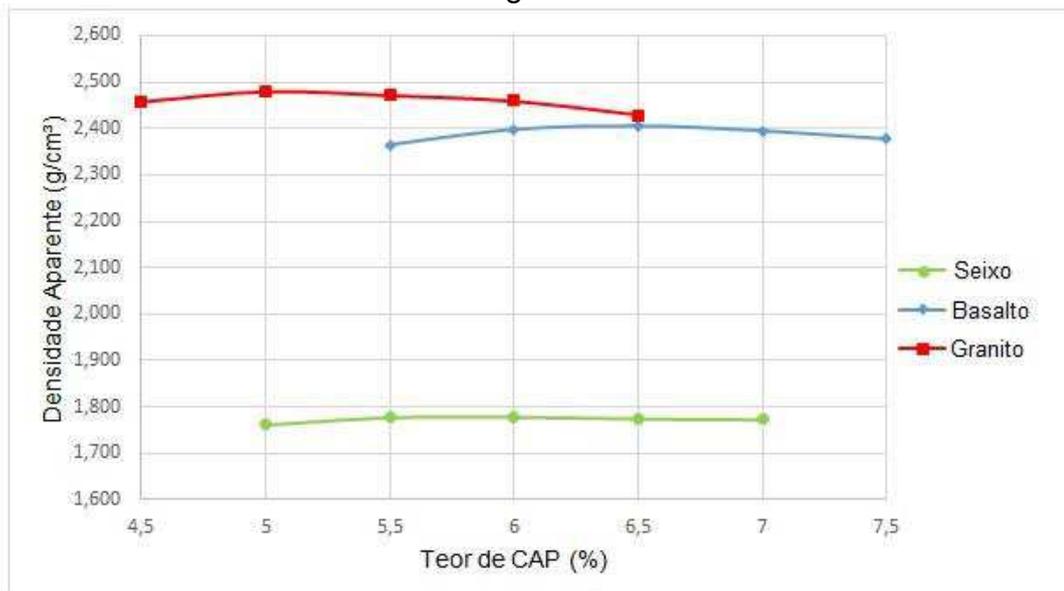
A seguir são apresentadas comparações entre os parâmetros volumétricos obtidos no estudo atual e os parâmetros de agregados basálticos e graníticos estudados por Nascimento (2015).

Gráfico 15 – Densidade máxima teórica (DMT) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito



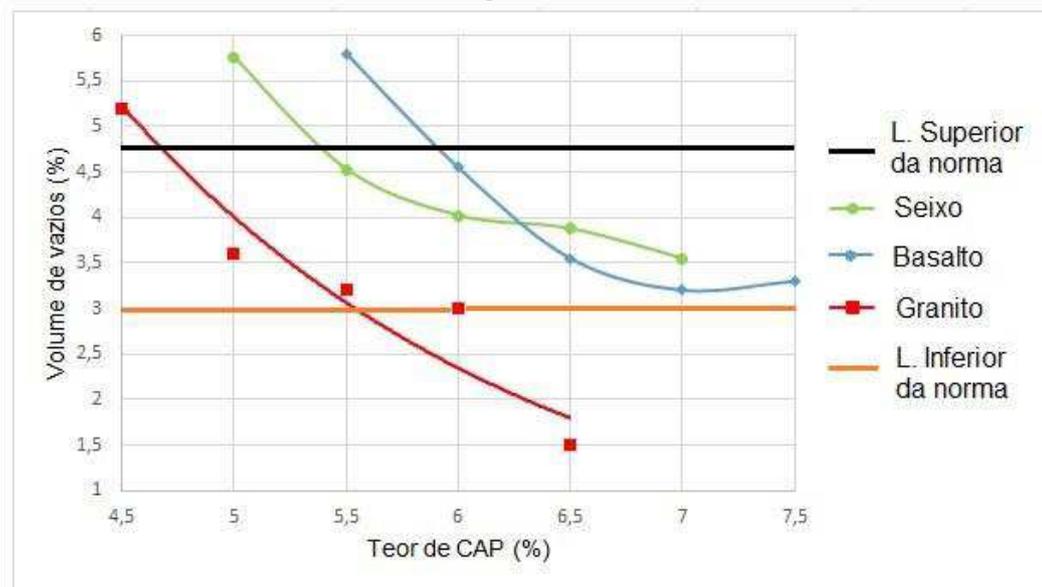
Fonte: Própria do autor baseado no estudo de Nascimento (2015)

Gráfico 16 – Densidade aparente (Gmb) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito



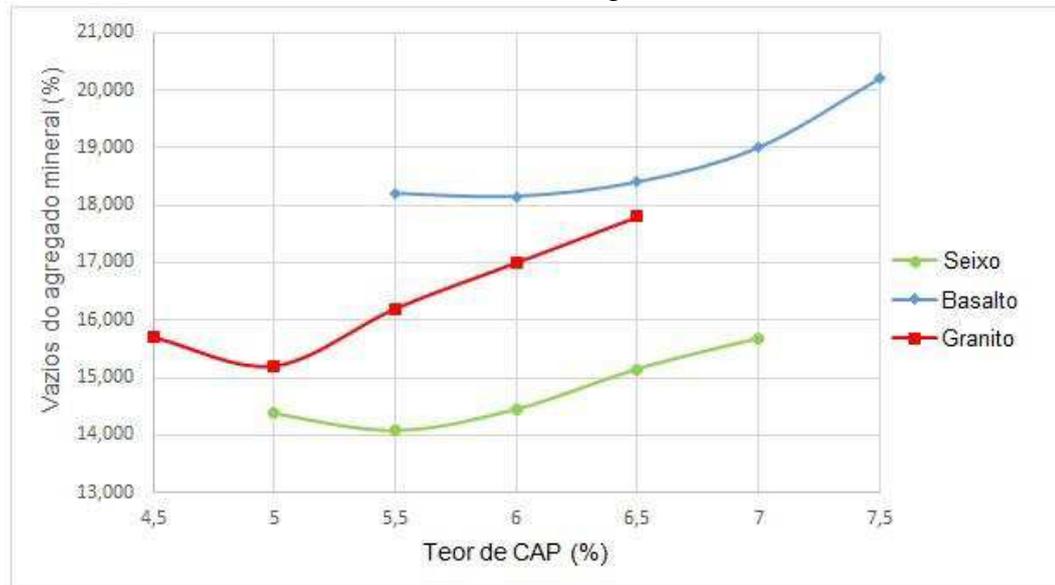
Fonte: Própria do autor baseado no estudo de Nascimento (2015)

Gráfico 17 – Volume de vazios (V_v) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito



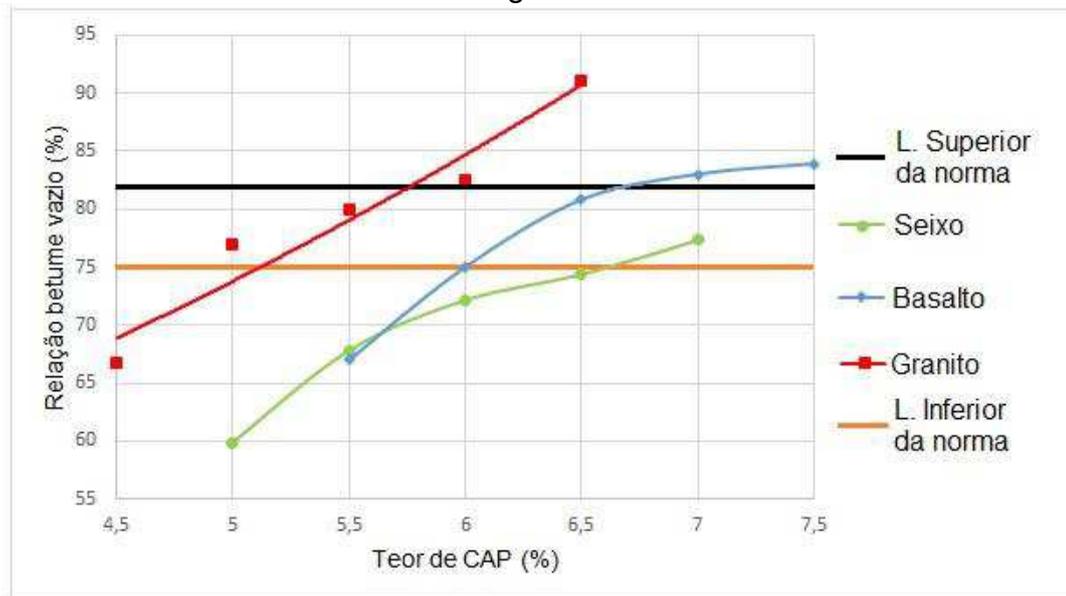
Fonte: Própria do autor baseado no estudo de Nascimento (2015)

Gráfico 18 – Vazios dos agregados minerais (VAM) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito



Fonte: Própria do autor baseado no estudo de Nascimento (2015)

Gráfico 19 – Relação betume/vazio (RBV) para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito



Fonte: Própria do autor baseado no estudo de Nascimento (2015)

Analisando os gráficos nota-se que a mistura que utilizou seixo britado apresentou valores densidade máxima teórica (DMT) e densidade aparente (G_{mb} ou D_{ap}) inferiores às misturas com agregados basálticos e graníticos. Isso pode ser explicado pois o seixo britado possui uma massa específica real e aparente menor do que as dos outros agregados.

Em relação aos volume de vazios (V_v) a mistura com seixo apresentou um comportamento semelhante a mistura de agregados basálticos, contudo ambas possuem uma quantidade de vazios maior do que a mistura com agregado granítico.

Os vazios do agregado mineral (VAM) para as misturas com seixo tiveram os menores valores dentre os três agregados bem como a relação betume/vazio (RBV). Isso pode ser justificado pelo fato de que os seixos apresentam uma absorção maior que os outros agregados.

5.11.3 Propriedades mecânicas

O resultados de estabilidade e fluência para a mistura são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Resultados para estabilidade e fluência

Teor de CAP (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
5	717,97	3,93
5,5	639,18	3,74
6	560,15	4,10
6,5	652,05	6,05
7	701,33	4,69

Fonte: Própria do autor

A partir desses dados foi feito o gráfico de estabilidade x teor de CAP como pode ser visto no Gráfico 20.

Gráfico 20 – Resultado para estabilidade Marshall

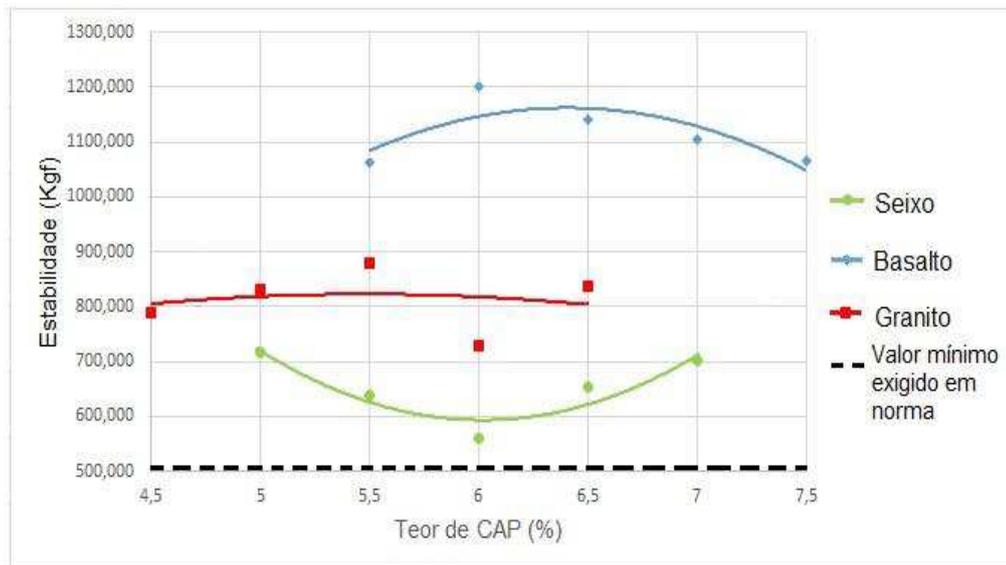


Fonte: Própria do autor

Segundo a norma DNIT 031/2006 – ES a estabilidade mínima para misturas usadas como camadas de rolamento é de 500 Kgf, portanto a mistura com seixo está de acordo com a norma.

O Gráfico 21 apresenta os resultados para estabilidade de misturas com seixo, agregados basálticos e graníticos.

Gráfico 21 – Estabilidade Marshall para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito



Fonte: Própria do autor baseado no estudo de Nascimento (2015)

Comparando as as três misturas observa-se que as misturas com seixo foram as que apresentaram menor estabilidade, porém ainda possui estabilidade dentro da norma.

5.11.4 Teor de ligante ótimo

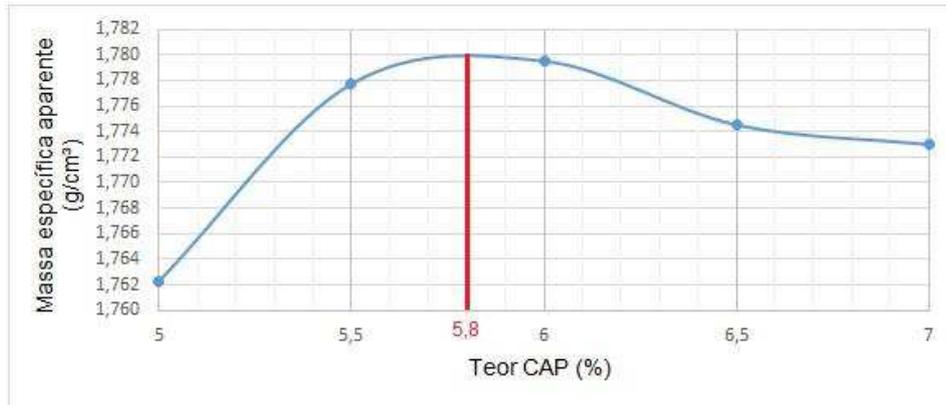
A determinação de ligante ótimo foi feita utilizando através da média de três teores associados a máxima estabilidade, máxima massa específica aparente e volume de vazios de 4%.

Gráfico 22 – Teor de ligante para estabilidade máxima



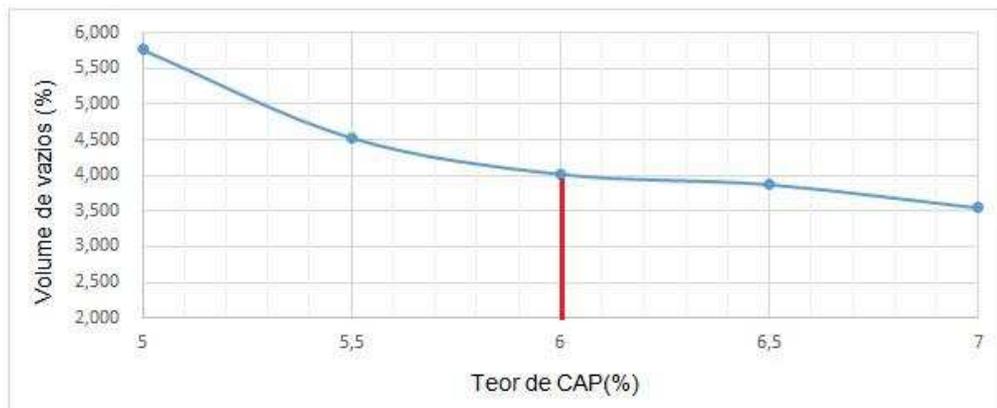
Fonte: Própria do autor

Gráfico 23 – Teor de ligante para máxima massa específica aparente



Fonte: Própria do autor

Gráfico 24 – Teor de ligante para volume de vazios de 4%



Fonte: Própria do autor

Analisando-se os gráficos de estabilidade, massa específica aparente (G_{mb}) e volume de vazios (V_v), chega-se a conclusão de que máxima estabilidade é obtida quando se tem um teor de CAP igual a 5%, a máxima massa específica aparente ocorre com um teor de CAP igual a 5,8%, enquanto o volume de vazios de 4% equivale ao um teor de CAP de 6%.

O valor ótimo de CAP então é obtido fazendo uma média entre esses três valores:

$$T_{\text{ótimo}} = \frac{5\% + 5,8\% + 6\%}{3} \quad [\text{Eq.20}]$$

$$T_{\text{ótimo}} = 5,6\%$$

5.12 Resistência à tração por compressão diametral

Após a determinação de ligante ótimo foram confeccionados 3 CP's para o ensaio de resistência, os resultados obtidos foram:

Quadro 10 – Resultados para resistência à tração

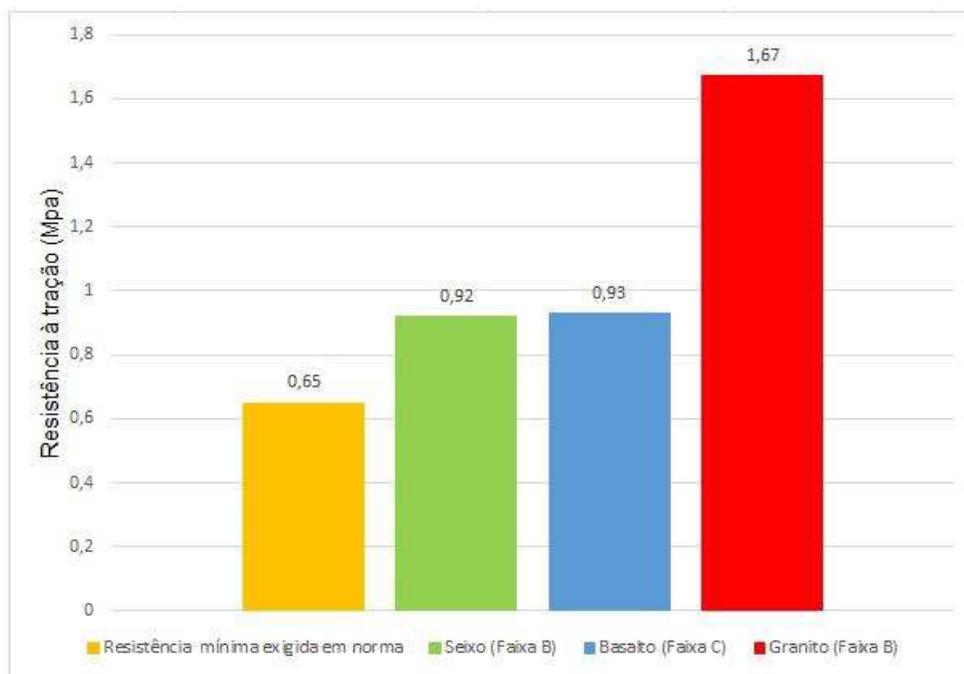
	Leitura Máquina (Kgf)	Altura média (cm)	Diâmetro Médio (cm)	RT (Mpa)	RT Médio (Mpa)	RT mínima (em Mpa) DNIT 031/2006
CPI	1003	6,821	10,048	0,91	0,92	0,65
CPII	1060	6,767	10,088	0,97		
CPIII	940	6,619	10,084	0,88		

Fonte: Própria do autor

Como pode ser visto o valor encontrado para a resistência à tração usando o teor ótimo de ligante apresentou um valor bem acima do valor mínimo estabelecido pela norma.

Os resultados de resistência foram novamente comparados aos resultados das misturas com basaltos e granitos.

Gráfico 25 - Resistência à tração por compressão diametral para misturas asfálticas com seixo, basalto e granito



Fonte: Própria do autor baseado no estudo de Nascimento (2015)

Comparando as três misturas conclui-se que as misturas asfálticas compostas com seixo britado mostraram menor resistência à tração do que as misturas com agregados basálticos e graníticos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar o seixo britado usado em misturas asfálticas do tipo CAUQ bem como as próprias misturas, buscando mostrar suas qualidades para que sejam usados na pavimentação do Maranhão, uma vez que o seixo britado teve origem na região de Balsas.

O trabalho foi iniciado realizando um levantamento teórico sobre os aspectos que envolviam a origem dos seixos, que são rochas sedimentares, conceitos básicos acerca de pavimentos, classificação de agregados usados para pavimentação, processo de britagem, definição de asfalto e mistura asfálticas usinadas a quente, conceito sobre dosagem Marshall e um levantamento sobre as condições das estradas maranhenses.

Em seguida foram delimitados quais seriam os materiais utilizados no estudo e quais seriam os métodos de ensaios que seriam utilizados para fazer sua caracterização e controle, descrevendo com detalhes como foram realizados cada um desses ensaios. O seixo britado foi submetido aos ensaios de granulometria, adesividade a ligante, índice de degradação após compactação Marshall com e sem ligante, abrasão “Los Angeles”, absorção, índice de forma e determinação das massas específicas real e aparente. Para o ligante asfáltico foram realizados os ensaios de viscosidade Saybolt-Furol, penetração e ponto de amolecimento. As misturas asfálticas passaram pelos ensaios de estabilidade Marshall, fluência e resistência à tração por compressão diametral. Todas essas informações serviram para verificar se o agregado, o ligante e as misturas estavam de acordo com as normas.

O seixo apresentou algumas características pouco interessantes para uso em pavimentação como alto grau de absorção e problemas de adesividade. Quanto ao problema de absorção será necessário um cuidado com o teor de CAP da mistura uma vez que parte dele será absorvido pelos vazios do seixo gerando um maior consumo do ligante. Para o problema de adesividade será necessário a adição de um melhorador de adesividade DOPE ao ligante.

Quanto aos corpos de provas confeccionados com diferentes teores de CAP foram determinados seus parâmetros volumétricos e comparados seus resultados com os parâmetros de controle previstos na norma DNIT 301/2006 - ES. As misturas asfálticas apresentaram valores inferiores aos exigidos pela norma para os parâmetros VAM e RBV o que pode ser justificado pela alta absorção do seixo.

Os parâmetros volumétricos também foram comparados com os de misturas asfálticas compostas por agregados de origem basáltica e granítica realizados no estudo de Nascimento (2005). De maneira geral observou-se que as misturas com seixo apresentaram densidades menores do que as misturas com agregados basálticos e graníticos, isso pode ser explicado pela baixa massa específica do seixo em relação aos outros dois agregados.

Após definir as propriedades volumétricas foram realizados ensaios de estabilidade com as misturas que mostraram valores superiores ao mínimos exigidos pela norma. Feito isso, foi definido o valor ótimo de ligante e confeccionados novos corpos de prova para realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Novamente a mistura apresentou valores superiores ao mínimo exigido em norma.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral também foram confrontados aos resultados do mesmo ensaio feitos com misturas asfálticas com agregados basálticos e graníticos, e, dentre as três misturas a com seixo foi a que apresentou menor valor para esse parâmetro.

De maneira geral as misturas com seixo não apresentaram características satisfatórias para uso na pavimentação de rodovias do Maranhão, porém pode-se obter misturas asfálticas adequadas com teores de ligante em torno de 6,5% e 7% e na impossibilidade de se obter agregados graníticos e basálticos recomenda-se o uso do seixo brita uma vez que existe uma enorme malha que necessita ser pavimentada no Maranhão. Além disso, deixasse esse estudo como contribuição científica para a comunidade local que carece de estudos sobre esse material.

Ao longo do estudo percebeu-se a necessidade de se fazerem estudos complementares que poderam ser realizados em trabalhos futuros tais como:

- a) Utilização de melhoradores de adesividade (DOPE) ao ligante devido a pouca adesividade do seixo britado;
- b) Análise comparativa das característica física e mecânicas dos seixos britados e rolado;
- c) Análise comparativa entre seixo britado, agregado granítico e agregado basáltico utilizando a dosagem SUPERPAVE.

REFERÊNCIAS

ADADA, Lucas Bach. **Tópicos de projeto de pavimentos asfálticos e de cimento Portland**. Curitiba: Departamento de Estradas de Rodagens - DER, 2008. Color. Programa de integração e capacitação. Disponível em: <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/RHTemp/PavimentosFlexiveiseRigidos_LucasAdada.pdf>. Acesso em: 14 de set. 2016

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM C 152 - 03** - Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading), Pensilvânia, Estados Unidos da America, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR: 6560/00**: materiais asfálticos - determinação de ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 6576**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR 14950**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº. 19**. Brasília: ANP, 2005.

BRASIL. Confederação Nacional de Transporte. **Boletim Estatístico – CNT – Julho 2016**. Disponível em:

<<http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO%202016/Boletim%20Estat%20C3%ADstico%20-%2007%20-%202016.pdf>>. Acesso em: 22 de ago. 2016.

BRASIL. Confederação Nacional de Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial**. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2015.

BRITO, Lúvia. **Dicas para Monografia/TCC – Como formatar seu trabalho, segundo as normas ABNT**. Disponível em: <<http://www.sobreadministracao.com/dicas-para-monografia-tcc-como-formatar-seu-trabalho-segundo-as-normas-abnt/>>. Acesso em 01 de dez. 2016.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES Antonio Eduardo Clark. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem**. São Paulo. Signus Editora, 2003, v.3.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro DNER, 1998.

_____. **DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, DNER, 1995.

_____. **DNER-ME 054: Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, DNER, 1997.

_____. **DNER-ME 078: Adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

_____. **DNER-ME 081: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado**. Rio de Janeiro, DNER, 1998.

_____. **DNER-ME 084: agregado miúdo- determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, DNER, 1995.

_____. **DNER-ME 085: Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real**. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

_____. **DNER-ME 401:** Agregados – determinação do índice de degradação das rochas após compactação Marshall, com ligante – ID_{ML} e sem ligante – ID_M . Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 136 – ME.** Pavimentação asfáltica – Determinação da resistência a tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 031/2004-ES.** Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.

_____. **DNIT-ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2009.

DINIZ, Bruno Athayde, DE CASTRO JUNIOR, José Nilson Santos. **Análise comparativa de misturas asfáltica com seixo rolado e seixo rolado britado quanto aos parâmetros Marshall**. 52p. TCC. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade da Amazônia, Belém, 2010.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002.

LEITE, Leni Figueiredo Mathias. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LUZ, Adão Benvindo da, et al. **Tratamento de Minérios**. 5 ed. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2010.

MACAULAY, David. **CITY – A Story of Roman Planning and Construction**. New York: Houghton Mifflin Company Boston, 1974.

Nascimento, Anderson. **Análise comparativa das propriedades físicas de agregados basálticos e graníticos usados nas misturas de CAUQ no estado do Maranhão**. 97p. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2015.

PAVEMENT INTERACTIVE. **Penetration Test**. 2007. Disponível em: <<http://www.pavementinteractive.org/article/penetration-test/>> Acesso em: 30 de out. 2016.

PETROBRAS. **Concretos Asfálticos de Petróleo**. 2016. Disponível em: <<http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-pavimentacao/cimentos-asfalticos-de-petroleo>> Acesso em: 29 de nov. 2016

PORTAL DO PROFESSOR. **As rochas sedimentares em nosso dia-a-dia**. 2016 Acesso em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=5277>> Acesso em: 2 de out. 2016.

PREGO, Atahualpa Schimitz da Silva. **A memória da Pavimentação no Brasil – Fatos Históricos, Recordações, Depoimentos**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

PRESS, Frank. et al. **Para entender a terra**. 4 ed . São Paulo. Editora ARTMED, 2006.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2 ed. PINI. São Paulo, 2007, v.1.

SCOTTIMAQ. **Produtos Telsmith – Britadores Cônicos**. Disponível em: <<http://www.scottimaq.com.br/britadores+conicos.html>> Acesso em: 2 de out. 2016.

SPECHT, Luciano Pivotto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 279p. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

SUGIO, Kenitiro. **Rochas Sedimentares: Propriedade, gênese, importância econômica**. Ed. da Universidade de São Paulo. Editora Edgar Blüncher, São Paulo, 1980.

APÊNDICE A - RESULTADOS DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS

Quadro 11 – Granulometria do seixo 1

Seixo 1 - (Peso Amostra = 2000,1 g)			
PENEIRA		Peso Retido Acumulado (g)	% Passante
#	Abertura (mm)		
3"	75	0,0	100,00
2"	50	0,0	100,00
1 1/2"	37,5	0,0	100,00
1"	25	0,0	100,00
3/4"	19	181,6	90,92
1/2"	9,5	1953,9	2,31
3/8"	4,75	1984,9	0,76
4	2,36	1987,3	0,64
10	2	1988,1	0,60
16	1,18	1989,9	0,51
30	0,6	1992,7	0,37
40	0,425	1993,1	0,35
50	0,3	1994,5	0,28
100	0,15	1996,9	0,16
200	0,075	1998,9	0,06

Fonte: Própria do autor

Quadro 12 – Granulometria do seixo 0

Seixo 0 - (Peso Amostra = 2000,2g)			
PENEIRA		Peso Retido Acumulado (g)	% Passante
#	Abertura (mm)		
3"	75	0,0	100,00
2"	50	0,0	100,00
1 1/2"	37,5	0,0	100,00
1"	25	0,0	100,00
3/4"	19	0,0	100,00
1/2"	9,5	140,0	93,00
3/8"	4,75	1654,8	17,27
4	2,36	1985,6	0,73
10	2	1991,8	0,42
16	1,18	1993,8	0,32
30	0,6	1997,2	0,15
40	0,425	1997,6	0,13
50	0,3	1998,2	0,10
100	0,15	1998,4	0,09
200	0,075	1999,2	0,05

Fonte: Própria do autor

Quadro 13 – Granulometria do pó de brita

Pó de Brita - (Peso Amostra = 1500,00 g)			
PENEIRA		Peso Retido Acumulado (g)	% Passante
#	Abertura (mm)		
3"	75	0,0	100,00
2"	50	0,0	100,00
1 1/2"	37,5	0,0	100,00
1"	25	0,0	100,00
3/4"	19	0,0	100,00
1/2"	9,5	0,0	100,00
3/8"	4,75	31,8	97,88
4	2,36	490,1	67,33
10	2	573,0	61,80
16	1,18	820,7	45,29
30	0,6	1047,8	30,15
40	0,425	1144,8	23,68
50	0,3	1213,4	19,11
100	0,15	1311,6	12,56
200	0,075	1437,8	4,15

Fonte: Própria do autor

Quadro 14 – Granulometria da areia

Areia - (Peso Amostra = 1000,3g)			
Peneira		Peso Retido Acumulado (g)	% Passante
#	Abertura (mm)		
3"	75	0,0	100,00
2"	50	0,0	100,00
1 1/2"	37,5	0,0	100,00
1"	25	0,0	100,00
3/4"	19	0,0	100,00
1/2"	9,5	0,0	100,00
3/8"	4,75	0,4	99,96
4	2,36	1,6	99,84
10	2	1,8	99,82
16	1,18	2,6	99,74
30	0,6	9,2	99,08
40	0,425	119,2	88,08
50	0,3	640,2	36,00
100	0,15	965,7	3,46
200	0,075	996,3	0,40

Fonte: Própria do autor

Quadro 15 – Granulometria da cal

Cal - (Peso Amostra = 300,0g)			
PENEIRA		Peso Retido Acumulado (g)	% Passante
#	Abertura (mm)		
3"	75	0,0	100,00
2"	50	0,0	100,00
1 1/2"	37,5	0,0	100,00
1"	25	0,0	100,00
3/4"	19	0,0	100,00
1/2"	9,5	0,0	100,00
3/8"	4,75	0,0	100,00
4	2,36	0,0	100,00
10	2	0,0	100,00
16	1,18	1,0	99,68
30	0,6	20,0	93,33
40	0,425	51,1	82,97
50	0,3	67,7	77,44
100	0,15	243,0	18,99
200	0,075	250,3	16,57

Fonte: Própria do autor

APÊNDICE B - RESULTADOS PARA MASSA ESPECÍFICA REAL, MASSA ESPECÍFICA APARENTE E ABSORÇÃO

Tabela 11 – Massa específica real, massa específica aparente e absorção do seixo 1

Massa seca (g)	3000,6
Massa saturada (g)	3071,07
Peso hidrostático (g)	1169,79
Massa específica real (g/cm ³)	1,639
Massa específica aparente (g/cm ³)	1,578
Absorção (%)	2,349

Fonte: Própria do autor

Tabela 12 – Massa específica real, massa específica aparente e absorção do seixo 0

Massa seca (g)	2869,3
Massa saturada (g)	2951,9
Peso hidrostático (g)	1113,70
Massa específica real (g/cm ³)	1,634
Massa específica aparente (g/cm ³)	1,561
Absorção (%)	2,879

Fonte: Própria do autor

Quadro 16 – Massa específica real do pó de brita

	Peso "A" (g)	Peso "B" (g)	Peso "C" (g)	Peso "D" (g)
Ensaio 1	189,7	690	1010,2	688,8
Ensaio 2	189,7	689,8	1009,4	687,8
Massa específica real (g/cm ³)	2,799			

Fonte: Própria do autor

Quadro 17 – Massa específica real da areia

	Peso "A" (g)	Peso "B" (g)	Peso "C" (g)	Peso "D" (g)
Ensaio 1	180,8	681,2	990,7	679,1
Ensaio 2	180,8	681	990,2	678,8
Massa específica real (g/cm ³)	2,650			

Fonte: Própria do autor

Quadro 18 – Massa específica real da cal

	Ensaio 1	Ensaio 2
Massa seca (g)	45	45,02
Leitura Inicial	0	0
Leitura Final	18,9	18,9
Massa específica real (g/cm ³)	2,381	2,382
Massa específica real média (g/cm ³)	2,381	

Fonte: Própria do autor

APÊNDICE C – DIMENSÕES GRÃOS E GRANULOMETRIA PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FORMA

Quadro 19 – Dimensão dos grãos do seixo 1

N	C (mm)	E (mm)	C/E	N	C (mm)	E (mm)	C/E	N	C (mm)	E (mm)	C/E	N	C (mm)	E (mm)	C/E
1	46,27	5,09	9,09	51	29,69	8,51	3,49	101	26,52	7,54	3,52	151	23,78	10,5	2,26
2	40,2	11,78	3,41	52	29,69	5,89	5,04	102	26,5	10,06	2,63	152	23,73	9,05	2,62
3	38,83	10,13	3,83	53	29,69	5,7	5,21	103	26,47	7,54	3,51	153	23,67	11,67	2,03
4	38,53	6,11	6,31	54	29,65	15,59	1,90	104	26,46	12,64	2,09	154	23,52	9,02	2,61
5	37,12	11,81	3,14	55	29,62	9,47	3,13	105	26,45	10,96	2,41	155	23,44	12,06	1,94
6	37,04	6,85	5,41	56	29,56	8,63	3,43	106	26,44	7,97	3,32	156	23,3	8,72	2,67
7	35,53	12,12	2,93	57	29,47	16,28	1,81	107	26,39	13,43	1,97	157	23,14	8,38	2,76
8	35,47	10,01	3,54	58	29,39	9,78	3,01	108	26,27	11,81	2,22	158	23,11	8,31	2,78
9	35,36	9,15	3,86	59	29,37	11,1	2,65	109	26,25	8,13	3,23	159	23,08	13,16	1,75
10	35,19	12,45	2,83	60	29,36	10,82	2,71	110	25,86	7,89	3,28	160	23,08	9,03	2,56
11	35,01	12,22	2,86	61	29,35	7,72	3,80	111	25,81	10,3	2,51	161	23,03	10,58	2,18
12	34,89	10,26	3,40	62	29,12	10,03	2,90	112	25,75	10,27	2,51	162	23,02	10,42	2,21
13	34,89	10,14	3,44	63	28,88	8,37	3,45	113	25,74	10,33	2,49	163	22,97	12,33	1,86
14	34,59	3,06	11,30	64	28,84	9,59	3,01	114	25,74	7,22	3,57	164	22,89	10,08	2,27
15	34,53	12,73	2,71	65	28,74	10,81	2,66	115	25,7	5,81	4,42	165	22,88	8,09	2,83
16	33,8	10,79	3,13	66	28,72	7,15	4,02	116	25,65	8,33	3,08	166	22,87	6,96	3,29
17	33,8	9,88	3,42	67	28,65	11,19	2,56	117	25,62	4,01	6,39	167	22,49	17,68	1,27
18	33,76	8,2	4,12	68	28,48	13,27	2,15	118	25,51	13,89	1,84	168	22,41	9,76	2,30
19	33,47	8,71	3,84	69	28,37	11,46	2,48	119	25,48	14,71	1,73	169	22,41	8,63	2,60
20	33,41	11,84	2,82	70	28,36	12,95	2,19	120	25,47	8,72	2,92	170	22,29	14,89	1,50
21	33,39	9,86	3,39	71	28,34	5,61	5,05	121	25,41	12,84	1,98	171	22,26	11,11	2,00
22	33	11,46	2,88	72	28,33	11,45	2,47	122	25,30	12,64	2,00	172	22,2	10,23	2,17
23	32,89	8,74	3,76	73	28,32	6,9	4,10	123	25,3	9,5	2,66	173	22,18	12	1,85
24	32,78	14,52	2,26	74	28,26	9,64	2,93	124	25,14	2,98	8,44	174	22,1	12,76	1,73
25	32,56	7,25	4,49	75	28,22	11,13	2,54	125	25,12	8,52	2,95	175	22,03	4,71	4,68
26	32,53	7,34	4,43	76	28,17	10,64	2,65	126	25,1	8,57	2,93	176	21,97	11,6	1,89
27	32,34	11,29	2,86	77	28,16	10,76	2,62	127	25,1	11,94	2,10	177	21,95	8,64	2,54
28	32,12	7,36	4,36	78	28,14	10,97	2,57	128	25,03	4,52	5,54	178	21,89	10,9	2,01
29	31,85	8,25	3,86	79	28,04	8,28	3,39	129	25,01	3,63	6,89	179	21,81	9,08	2,40
30	31,53	9,37	3,36	80	27,95	11,88	2,35	130	24,92	12,26	2,03	180	21,71	7,76	2,80
31	31,52	8,05	3,92	81	27,94	9,36	2,99	131	24,92	11,93	2,09	181	21,68	11,18	1,94
32	31,35	9,78	3,21	82	27,91	10,3	2,71	132	24,91	4,29	5,81	182	21,56	15,42	1,40
33	31,35	11,71	2,68	83	27,89	8,81	3,17	133	24,91	8,54	2,92	183	21,26	9,53	2,23
34	31,28	11,43	2,74	84	27,87	11,25	2,48	134	24,83	13,61	1,82	184	21,11	8,68	2,43
35	31,23	10	3,12	85	27,83	9,75	2,85	135	24,76	9,45	2,62	185	21,08	10,68	1,97
36	31,19	10,52	2,96	86	27,8	10,16	2,74	136	24,71	9,85	2,51	186	20,99	14,99	1,40
37	30,94	8,16	3,79	87	27,8	6,83	4,07	137	24,69	9,1	2,71	187	20,95	13,82	1,52
38	30,89	7,26	4,25	88	27,78	11,76	2,36	138	24,62	11,04	2,23	188	20,94	11,85	1,77
39	30,83	10,99	2,81	89	27,76	9,28	2,99	139	24,57	9,63	2,55	189	20,77	14,95	1,39
40	30,81	4,05	7,61	90	27,56	9,54	2,89	140	24,48	7,45	3,29	190	20,54	12,35	1,66
41	30,59	12,88	2,38	91	27,46	10,87	2,53	141	24,46	14,13	1,73	191	20,08	9,1	2,21
42	30,46	10,84	2,81	92	27,37	11,87	2,31	142	24,37	8,67	2,81	192	19,57	5,63	3,48
43	30,43	8,92	3,41	93	27,36	13,2	2,07	143	24,34	12,51	1,95	193	19,5	9,78	1,99
44	30,43	4,77	6,38	94	27,33	11,33	2,41	144	24,2	9,5	2,55	194	18,71	11,47	1,63
45	30,36	13,57	2,24	95	27,06	9,61	2,82	145	24,15	9,57	2,52	195	18,65	9,85	1,89
46	30,12	12,07	2,50	96	26,99	7,46	3,62	146	24,05	12,31	1,95	196	18,56	7,57	2,45
47	30,09	8,3	3,63	97	26,87	13,78	1,95	147	23,96	13,34	1,80	197	18,28	10,83	1,69
48	29,83	13,8	2,16	98	26,82	12,33	2,18	148	23,88	6,83	3,50	198	18,09	9,78	1,85
49	29,8	11,2	2,66	99	26,62	16,79	1,59	149	23,87	10,32	2,31	199	17,82	8,43	2,11
50	29,78	11,84	2,52	100	26,56	16,61	1,60	150	23,82	14,93	1,60	200	12,93	8,08	1,60

Fonte: Própria do autor

Quadro 20 – Granulometria do seixo 1

Peso da amostra = 5002,2 g					
Peneira		Peso retido por peneira (g)	Peso retido acumulado (g)	% Passante	% Retido
#	Abertura (mm)				
3"	75	0	0	100	0
2"	50	0	0	100	0
1"	25	0	0	100	0
3/4"	19	465,9	465,9	90,69	9,31
1/2"	9,5	4482,5	4948,4	1,08	89,61

Fonte: Própria do autor

APÊNDICE D – RESULTADOS PARA ENSAIOS COM CAP

Quadro 21 – Resultados ensaio de penetração

CP 1			
	1º Penetração	2º Penetração	3º Penetração
Leitura Inicial (0,1mm)	54	106	159
Leitura Final (0,1mm)	106	159	209
Resultado	52	53	50
Média dos Resultados	52		
CP 2			
	1º Penetração	2º Penetração	3º Penetração
Leitura Inicial (0,1mm)	125	176	227
Leitura Final (0,1mm)	176	227	279
Resultado	51	51	52
Média dos Resultados	51		
CP 3			
	1º Penetração	2º Penetração	3º Penetração
Leitura Inicial (0,1mm)	279	329	381
Leitura Final (0,1mm)	329	381	433
Resultado	50	52	52
Média dos Resultados	51		
Média Final	51		

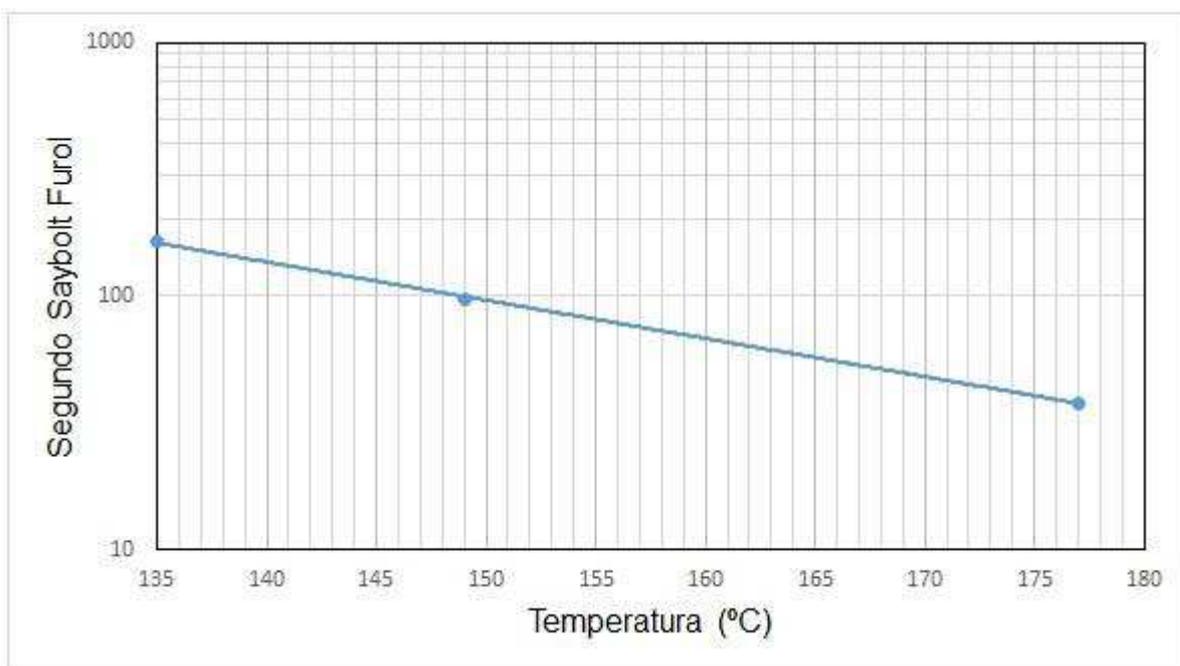
Fonte: Própria do Autor

Quadro 22 – Resultados para ensaio de ponto de amolecimento

	Temperatura (°C)
Ensaio 1	49
Ensaio 2	49
Ensaio 3	48
Média	49

Fonte: Própria do Autor

Gráfico 26 – Resultados para viscosidade Saybolt Furol



Fonte: Própria do autor

APÊNDICE E – DIMENSÕES E DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS DE PROVA USADOS NO ENSAIO DE ESTABILIDADE MARSHALL

Quadro 23 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 5,0% de CAP

TEOR = 5%					
CP 1		CP 2		CP 3	
H1 (cm)	6,819	H1 (cm)	6,602	H1 (cm)	6,902
H2 (cm)	6,961	H2 (cm)	6,674	H2 (cm)	6,828
H3 (cm)	7,013	H3 (cm)	6,747	H3 (cm)	6,899
H4 (cm)	6,956	H4 (cm)	6,8	H4 (cm)	6,838
Hmed (cm)	6,937	Hmed (cm)	6,706	Hmed (cm)	6,867
D1 (cm)	10,113	D1 (cm)	10,191	D1 (cm)	10,078
D2 (cm)	9,993	D2 (cm)	10,061	D2 (cm)	10,139
D3 (cm)	10,083	D3 (cm)	10,067	D3 (cm)	10,066
Dmed (cm)	10,063	Dmed (cm)	10,106	Dmed (cm)	10,094
Wd/peso seco (g)	1196,6	Wd/peso seco (g)	1198,3	Wd/peso seco (g)	1185,9
Wsub/peso submerso (g)	515,1	Wsub/peso submerso (g)	519,2	Wsub/peso submerso (g)	514,6
Volume (cm ³)	681,5	Volume (V)	679,1	Volume (V)	671,3
Gmb (g/cm ³)	1,756	Gmb	1,765	Gmb	1,767
Gmb médio (g/cm³)	1,762				

Fonte: Própria do autor

Quadro 24 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 5,5% de CAP

TEOR = 5,5%					
CP 1		CP 2		CP 3	
H1 (cm)	6,534	H1 (cm)	6,608	H1 (cm)	6,828
H2 (cm)	6,733	H2 (cm)	6,97	H2 (cm)	6,841
H3 (cm)	6,687	H3 (cm)	6,83	H3 (cm)	6,878
H4 (cm)	6,74	H4 (cm)	6,898	H4 (cm)	6,742
Hmed (cm)	6,674	Hmed (cm)	6,827	Hmed (cm)	6,822
D1 (cm)	10,146	D1 (cm)	10,007	D1 (cm)	10,134
D2 (cm)	9,963	D2 (cm)	10,109	D2 (cm)	10,039
D3 (cm)	10,149	D3 (cm)	10,048	D3 (cm)	10,082
Dmed (cm)	10,086	Dmed (cm)	10,055	Dmed (cm)	10,085
Wd/peso seco (g)	1193,1	Wd/peso seco (g)	1188	Wd/peso seco (g)	1194,4
Wsub/peso submerso (g)	519,8	Wsub/peso submerso (g)	521,1	Wsub/peso submerso (g)	523,3
Volume (cm ³)	673,3	Volume (V)	666,9	Volume (V)	671,1
Gmb (g/cm ³)	1,772	Gmb	1,781	Gmb	1,780
Gmb médio (g/cm³)	1,778				

Fonte: Própria do autor

Quadro 25 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 6,0% de CAP

TEOR = 6,0%					
CP 1		CP 2		CP 3	
H1 (cm)	6,889	H1 (cm)	6,552	H1 (cm)	6,552
H2 (cm)	6,869	H2 (cm)	6,769	H2 (cm)	6,769
H3 (cm)	6,701	H3 (cm)	6,598	H3 (cm)	6,598
H4 (cm)	6,878	H4 (cm)	6,541	H4 (cm)	6,541
Hmed (cm)	6,834	Hmed (cm)	6,615	Hmed (cm)	6,615
D1 (cm)	10,09	D1 (cm)	10,137	D1 (cm)	10,241
D2 (cm)	10,122	D2 (cm)	10,241	D2 (cm)	10,137
D3 (cm)	10,03	D3 (cm)	10,19	D3 (cm)	10,19
Dmed (cm)	10,081	Dmed (cm)	10,189	Dmed (cm)	10,189
Wd/peso seco (g)	1198,8	Wd/peso seco (g)	1182,9	Wd/peso seco (g)	1182,9
Wsub/peso submerso (g)	526,6	Wsub/peso submerso (g)	521,7	Wsub/peso submerso (g)	513,1
Volume (cm ³)	672,2	Volume (V)	661,2	Volume (V)	669,8
Gmb (g/cm ³)	1,783	Gmb	1,789	Gmb	1,766
Gmb médio (g/cm³)	1,779				

Fonte: Própria do autor

Quadro 26 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 6,5% de CAP

TEOR = 6,5%					
CP 1		CP 2		CP 3	
H1 (cm)	6,528	H1 (cm)	6,676	H1 (cm)	6,699
H2 (cm)	6,628	H2 (cm)	6,53	H2 (cm)	6,578
H3 (cm)	6,647	H3 (cm)	6,329	H3 (cm)	6,683
H4 (cm)	6,678	H4 (cm)	6,53	H4 (cm)	6,707
Hmed (cm)	6,620	Hmed (cm)	6,516	Hmed (cm)	6,667
D1 (cm)	10,209	D1 (cm)	10,143	D1 (cm)	10,119
D2 (cm)	10,136	D2 (cm)	10,213	D2 (cm)	10,162
D3 (cm)	10,185	D3 (cm)	10,159	D3 (cm)	10,132
Dmed (cm)	10,177	Dmed (cm)	10,172	Dmed (cm)	10,138
Wd/peso seco (g)	1181,3	Wd/peso seco (g)	1179,7	Wd/peso seco (g)	1185,7
Wsub/peso submerso (g)	516,1	Wsub/peso submerso (g)	515,2	Wsub/peso submerso (g)	516,7
Volume (cm ³)	665,2	Volume (V)	664,5	Volume (V)	669
Gmb (g/cm ³)	1,776	Gmb	1,775	Gmb	1,772
Gmb médio (g/cm³)	1,775				

Fonte: Própria do autor

Quadro 27 – Dimensões e densidade aparente para misturas com 7,0% de CAP

TEOR = 7,0%					
CP 1		CP 2		CP 3	
H1 (cm)	6,433	H1 (cm)	6,484	H1 (cm)	6,615
H2 (cm)	6,489	H2 (cm)	6,6439	H2 (cm)	6,549
H3 (cm)	6,509	H3 (cm)	6,604	H3 (cm)	6,549
H4 (cm)	6,289	H4 (cm)	6,537	H4 (cm)	6,52
Hmed (cm)	6,430	Hmed (cm)	6,567	Hmed (cm)	6,558
D1 (cm)	10,058	D1 (cm)	10,125	D1 (cm)	10,043
D2 (cm)	9,928	D2 (cm)	10,1	D2 (cm)	10,078
D3 (cm)	10,111	D3 (cm)	10,068	D3 (cm)	10,108
Dmed (cm)	10,032	Dmed (cm)	10,098	Dmed (cm)	10,076
Wd/peso seco (g)	1165,6	Wd/peso seco (g)	1168	Wd/peso seco (g)	1170,1
Wsub/peso submerso (g)	510,5	Wsub/peso submerso (g)	507,6	Wsub/peso submerso (g)	509,4
Volume (cm ³)	655,1	Volume (V)	660,4	Volume (V)	660,7
Gmb (g/cm ³)	1,779	Gmb	1,769	Gmb	1,771
Gmb médio (g/cm³)	1,773				

Fonte: Própria do autor