

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BRUNO HENRIQUE SANTOS ELIAS

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE ASFALTO BORRACHA EM
REVESTIMENTO DO TIPO CAUQ NO MARANHÃO**

São Luís
2016

BRUNO HENRIQUE SANTOS ELIAS

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE ASFALTO BORRACHA EM
REVESTIMENTO DO TIPO CAUQ NO MARANHÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

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

São Luís
2016

BRUNO HENRIQUE SANTOS ELIAS

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE ASFALTO BORRACHA EM
REVESTIMENTO DO TIPO CAUQ NO MARANHÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Maria Teresinha de Medeiros Coelho (Orientadora)

Prof. Dr. Walter Canales Sant'anna

Prof. Me. Marivaldo Costa Duarte

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e vida que me foi concebida para que eu pudesse completar mais uma etapa da minha vida.

Aos meu Pais, Auricelia e Joaquim, por serem grandes exemplos de pessoas e por me apoiarem sempre.

Em especial ao meu pai, por toda a ajuda durante a pesquisa, principalmente com a questão dos materiais utilizados.

As empresas GRECA Asfaltos e CBEMI, pela colaboração na pesquisa através dos materiais cedidos.

A minha namorada Nathalia, por toda sua ajuda, compreensão, carinho e apoio, para que eu alcançasse todos os meus objetivos.

A meu amigo e engenheiro Éder, pela ajuda no ajuste do traço das misturas.

A minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Maria Teresinha, por toda a ajuda na pesquisa e pela ótima professora que foi durante o curso.

Ao Prof. Dr. Walter Canales, pela ideia do envelhecimento dos CP's antes do ensaio de desgaste Cântabro.

Aos meus amigos e parceiros do laboratório João Victor Pestana, Samuel Costa e Guilherme Barbosa, por toda ajuda e momentos descontraídos.

As minhas amizades formadas ao longo de todos esses anos de curso, em especial para: Paulo Casé, Hugo Leonardo, Victor Hugo, Gustavo Beckman, João Victor Pestana, Roberto Lázaro, Pedro Henrique, José Nilton, João Marinho, Caíque Reis, Eugênio Simão, Victor Langford, Lucas Borges, Lucas Gabriel, Rogério Lima, Willer Marino e João Victor Barbosa.

A Universidade Estadual do Maranhão pela oportunidade de estudar em sua instituição, por suas instalações e disponibilidade para a realização deste trabalho.

Aos demais amigos, familiares e terceiros que me ajudaram a concluir essa etapa.

RESUMO

Este trabalho tem como o principal objetivo a análise do asfalto borracha como uma alternativa de substituição do asfalto comum para a construção de estradas de maior durabilidade e qualidade. Essa avaliação foi feita a partir da comparação do asfalto comum e do asfalto borracha, do estudo de misturas do tipo CAUQ com a utilização dos dois asfaltos e da avaliação dos materiais utilizados na pesquisa. A utilização do asfalto borracha se justifica pelo fato da reutilização de pneus inservíveis, diminuição da emissão de poluentes e maior durabilidade do revestimento asfáltico. A metodologia utilizada na pesquisa se baseou em pesquisas bibliográficas e experimentais, aspirando as conquistas dos objetivos propostos. O trabalho foi dividido em três partes: a pesquisa bibliográfica, ensaios laboratoriais e interpretação dos resultados. Os resultados apresentados pelas misturas asfálticas estudadas foram satisfatórios, e a mistura que utilizou asfalto borracha se mostrou mais resistente ao desgaste Cântabro do que a mistura com asfalto comum, comprovando a maior durabilidade que o asfalto borracha proporciona ao revestimento.

Palavras-chave: Asfalto borracha. Durabilidade. Revestimento asfáltico.

ABSTRACT

The present study has as its main objective the analysis of rubber asphalt as an alternative over regular asphalt on construction of roads of better quality and durability. This evaluation was performed based on the comparison between both asphalts, on the study of mixtures of hot-mix asphalt concrete utilizing both materials and the proper evaluation of those materials. The usage of rubber asphalt is justified by the reutilization of old, disposed tires, decrease on pollutant emissions, and greater durability of the asphalt revetment. The methodology of the study consisted on bibliographic research and laboratory experiments, aiming to achieve the proposed objectives. This work was divided in three parts: the bibliographic research, laboratory procedures and result analysis. The results obtained from both materials were considerable, while the rubber asphalt mixture showed itself to be more resistant on Cântabro Loss tests, proving to be more durable than regular mixtures.

Keywords: Rubber asphalt. Durability. Asphalt revestment.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das britas.....	27
Tabela 2 - Temperaturas utilizadas para a moldagem dos CP's	61
Tabela 3 - Caracterização dos agregados graúdos.....	76
Tabela 4 - Caracterização dos agregados miúdos	77
Tabela 5 - Caracterização do fíler	77
Tabela 6 - Caracterização do CAP 50/70.....	78
Tabela 7 - Resultado do enquadramento granulométrico dos agregados na faixa B	80
Tabela 8 - Resultado da dosagem Marshall para a mistura CAUQ-REF	81
Tabela 9 - Resultado da dosagem Marshall para a mistura CAUQ-B	83
Tabela 10 - Estabilidade Marshall para as misturas asfálticas.....	85
Tabela 11 - Resistência à tração para as misturas asfálticas	86
Tabela 12 - Resultados da mistura CAUQ-REF	89
Tabela 13 - Resultados da mistura CAUQ-B.....	91
Tabela 14 - Resultados do desgaste cântabro para as misturas asfálticas.....	92
Tabela 15 - Granulometria brita 1.....	101
Tabela 16 - Granulometria brita 0.....	101
Tabela 17 - Granulometria pó de brita.....	102
Tabela 18 - Granulometria areia.....	102
Tabela 19 - Granulometria fíler.....	103
Tabela 20 - Equivalente de areia para agregados miúdos	104
Tabela 21 - Absorção agregados graúdos	104
Tabela 22 - Abrasão Los Angeles agregados graúdos	104
Tabela 23 - Índice de forma brita 1.....	105
Tabela 24 - Penetração ligantes asfálticos.....	106

Tabela 25 - Ponto de amolecimento ligantes asfálticos	106
Tabela 26 - Viscosidade Saybolt-Furol CAP50/70	106
Tabela 27 - Massa específica dos materiais da pesquisa	107
Tabela 28 - Correção do traço das misturas de acordo com a % de ligantes	108
Tabela 29 - Dosagem Marshall para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B	109
Tabela 30 - Estabilidade Marshall para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B	110
Tabela 31 - Resistência à para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B.....	111
Tabela 32 - Desgaste cântabro para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Estrutura fictícia de um pavimento rígido	23
Figura 2	- Estrutura fictícia de pavimento flexível	24
Figura 3	- Estrutura fictícia de pavimento semirrígido	25
Figura 4	- Situação da malha rodoviária brasileira	32
Figura 5	- Situação geral das rodovias do Maranhão	33
Figura 6	- Situação do pavimento das rodovias do Maranhão.....	33
Figura 7	- Destino final dos pneus descartados	36
Figura 8	- Ilustração de misturas com partículas sólidas de borracha.....	37
Figura 9	- Ilustração do processo de fabricação do asfalto borracha a úmido	38
Figura 10	- Aplicação de CPA com asfalto borracha em trecho do rodoanel de São Paulo.....	39
Figura 11	- Revestimento asfáltico finalizado com asfalto borracha.....	39
Figura 12	- Trecho finalizado com a utilização de asfalto borracha.....	40
Figura 13	- Granulometria dos agregados.....	43
Figura 14	- Proveta pronta para as leituras do ensino de EA	44
Figura 15	- Conjunto água/agregado no frasco Chapman.....	45
Figura 16	- Conjunto querosene/fíler no frasco Le Chatelier	46
Figura 17	- Cesto metálico padrão	47
Figura 18	- Amostra de material ensaiada.....	48
Figura 19	- Esquema para determinação do volume deslocado da amostra.....	48
Figura 20	- Amostras de material ensaiada.....	49
Figura 21	- Amostras espalhadas sobre pano absorvente	50
Figura 22	- Determinação das medidas das partículas	51
Figura 23	- Equipamento Los Angeles	52
Figura 24	- Amostra pronta para ser lavada na peneira 1,7 mm	53

Figura 25 - Amostra sobre superfície lisa para resfriamento	54
Figura 26 - Amostra coberta com água destilada pronta para ser colocada na estufa	54
Figura 27 - Realização do ensaio de penetração	56
Figura 28 - Recipiente necessário para a execução do ensaio	57
Figura 29 - Realização do ensaio de ponto de amolecimento	58
Figura 30 - Viscosímetro Saybolt-Furol utilizado no ensaio.....	59
Figura 31 - Passagem do ligante pelo equipamento	60
Figura 32 - Agregados pesados e prontos para o pré-aquecimento em estufa.....	62
Figura 33 - Aquecimento do ligante e agregados às temperaturas pré-determinadas	62
Figura 34 - Mistura do ligante asfáltico com os agregados	63
Figura 35 - Mistura asfáltica no molde metálico pronto para compactação.....	63
Figura 36 - Compactação manual da mistura asfáltica.....	64
Figura 37 - Armazenamento dos CP's após desmolde	64
Figura 38 - Determinação do peso do CP	65
Figura 39 - Determinação do volume do CP	65
Figura 40 - Determinação da altura média do CP	66
Figura 41 - CP's em ambiente controlado a 25°C	67
Figura 42 - Rompimento do CP.....	67
Figura 43 - Anel envoltório com friso metálico.....	69
Figura 44 - CP's em ambiente controlado a 25°C	69
Figura 45 - Rompimento do CP.....	70
Figura 46 - Confinamento em estufa à temperatura de 110°C por 48 horas	71
Figura 47 - Confinamento em freezer à temperatura de -12°C por 48 horas.....	72
Figura 48 - CP's após resfriamento e pronto para ficar imerso em água	72
Figura 49 - CP's imersos em água à temperatura ambiente por 48 horas	72

Figura 50 - Caracterização ECOFLEX B.....	78
Figura 51 - Resultado desgaste cântabro.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica Brita 1	74
Gráfico 2 - Curva granulométrica Brita 0.....	75
Gráfico 3 - Curva granulométrica Pó de Brita	75
Gráfico 4 - Curva granulométrica areia	75
Gráfico 5 - Curva granulométrica Fíler.....	76
Gráfico 6 - Resultado d ensaio de viscosidade Saybolt-Furol.....	79
Gráfico 7 - Resultado das misturas de acordo com a faixa B do DNIT	81
Gráfico 8 - Densidade aparente X teor de CAP: CAUQ-REF	82
Gráfico 9 - Volume de vazios X teor de CAP: CAUQ-REF	82
Gráfico 10- Relação betume /vazios x teor de CAP: CAUQ-REF	83
Gráfico 11- Densidade aparente x teor de CAP: CAUQ-B.....	83
Gráfico 12- Volume de vazios x teor de CAP: CAUQ-B.....	84
Gráfico 13- Relação betume/vazios x teor de CAP: CAUQ-B.....	84
Gráfico 14- Estabilidade Marshall CAUQ-REF.....	85
Gráfico 15- Estabilidade Marshall CAUQ-B	85
Gráfico 16- Resistência à tração CAUQ-REF	86
Gráfico 17- Resistência à tração CAUQ-REF	87
Gráfico 18- Volume de vazios 4% x teor de ligante equivalente: CAUQ-REF	88
Gráfico 19- Densidade aparente máxima x teor de ligante equivalente: CAUQ-REF	88
Gráfico 20- Estabilidade Marshall máxima x teor de ligante equivalente: CAUQ-REF	89
Gráfico 21 - Volume de vazios 4% x teor de ligante equivalente: CAUQ-B	90
Gráfico 22- Densidade aparente máxima x teor de ligante equivalente: CAUQ-B 90	
Gráfico 23- Estabilidade Marshall máxima x teor de ligante equivalente: CAUQ-B	91

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
B0	Brita 0
B1	Brita 1
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente
CAUQ-B	Concreto Asfáltico Usinado à Quente com asfalto borracha
CAUQ-REF	Concreto Asfáltico Usinado à Quente com asfalto comum
CBEMI	Construtora Brasileira e Mineradora Ltda
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
cm	centímetro
cm ³	centímetro cúbico
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
Dap	Massa específica aparente da mistura
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
ES	Especificação de Serviço
g	gramas
g/cm ³	gramas/centímetros cúbico
h	horas
kgf	Quilograma-força
km	Quilômetros
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação

ME	Método de Ensaio
mm	milímetro
MME	Ministério de Minas e Energia
MPa	Mega Pascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
RBV	Relação Betume/Vazios
SSF	Segundo Saybolt-Furol
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios Com Betume
Vv	Volume de vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo Geral.....	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Aspectos gerais de Pavimentação	22
2.2	Tipos de Pavimentos	23
2.2.1	Pavimento rígido.....	23
2.2.2	Pavimento flexível	24
2.2.3	Pavimento semirrígido.....	24
2.3	Ligantes asfálticos	25
2.4	Agregados	26
2.4.1	Agregado graúdo.....	26
2.4.2	Agregado miúdo	27
2.5	Revestimento asfáltico	27
2.5.1	Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)	28
2.6	Dosagem de misturas asfálticas	28
2.6.1	Dosagem Marshall.....	29
2.7	Técnicas para análise de misturas asfálticas	30
2.7.1	Estabilidade Marshall	30
2.7.2	Resistência à tração	30
2.7.3	Desgaste cântabro	31
2.8	A situação das rodovias Brasileiras e Maranhenses	31
2.8.1	Situação das rodovias Brasileiras.....	31

2.8.2	A situação das rodovias do Maranhão	33
2.9	Conceitos gerais a respeito do Asfalto Borracha.....	33
2.9.1	Histórico da utilização do asfalto borracha	34
2.9.2	Asfalto borracha e sua questão ambiental	35
2.9.3	O processo de fabricação do asfalto borracha	36
2.9.3.1	<i>Processo seco.....</i>	<i>37</i>
2.9.3.2	<i>Processo úmido.....</i>	<i>37</i>
2.10	Utilização do asfalto borracha no Brasil	38
3	METODOLOGIA	41
3.1	Tipo de Estudo.....	41
3.2	Pesquisas Bibliográficas	41
3.3	Atividades Laboratoriais.....	42
3.3.1	Ensaio realizados nos agregados utilizados nas misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B.....	42
3.3.1.1	<i>Granulometria dos agregados</i>	<i>42</i>
3.3.1.2	<i>Equivalente de areia.....</i>	<i>43</i>
3.3.1.3	<i>Massa específica pelo frasco Chapman.....</i>	<i>45</i>
3.3.1.4	<i>Massa específica pelo frasco Le Chatelier</i>	<i>46</i>
3.3.1.5	<i>Massa específica dos agregados graúdos</i>	<i>47</i>
3.3.1.6	<i>Absorção dos Agregados Graúdos.....</i>	<i>49</i>
3.3.1.7	<i>Índice de forma.....</i>	<i>50</i>
3.3.1.8	<i>Resistência à abrasão</i>	<i>51</i>
3.3.1.9	<i>Adesividade ao ligante asfáltico</i>	<i>53</i>
3.3.2	Ensaio realizados nos ligantes asfálticos utilizados nas misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B.....	55
3.3.2.1	<i>Ensaio de penetração.....</i>	<i>55</i>
3.3.2.2	<i>Ensaio de ponto de amolecimento – ensaio do anel e bola</i>	<i>57</i>

3.3.2.3	<i>Ensaio de viscosidade</i>	58
3.3.3	Dosagem das misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B	60
3.3.3.1	<i>Dosagem Marshall para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B</i>	61
3.3.3.2	<i>Estabilidade Marshall para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B</i>	66
3.3.3.3	<i>Resistência à tração para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B</i>	68
3.3.3.4	<i>Desgaste cântabro</i>	70
4	RESULTADOS E ANÁLISES	74
4.1	Ensaio realizado nos agregados utilizados nas misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B	74
4.2	Ensaio realizado nos ligantes asfálticos utilizados nas misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B	78
4.2.1	Determinação das temperaturas de mistura a partir da viscosidade Saybolt-Furol	79
4.3	Enquadramento Granulométrico das misturas CAUQ-REF e CAUQ-B	80
4.4	Resultados das misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B	81
4.4.1	Dosagem Marshall.....	81
4.4.2	Estabilidade Marshall	84
4.4.3	Resistência à Tração	86
4.4.4	Determinação do teor ótimo de ligante para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B e análise dos seus resultados	87
4.4.4.1	<i>Resultados para mistura CAUQ-REF</i>	88
4.4.4.2	<i>Resultados para mistura CAUQ-B</i>	90
4.4.5	Desgaste cântabro	92
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A – RESULTADOS DAS GRANULOMETRIAS DOS AGREGADOS	101

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	104
APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS	106
APÊNDICE D – MASSA ESPECÍFICA DOS MATERIAIS.....	107
APÊNDICE E – RESULTADOS DA DOSAGEM MARSHALL	108
APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESTABILIDADE MARSHALL, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DESGASTE CANTABRO	110
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DO ECOFLEX B.....	113
ANEXO B – TEMPERATURA DE MISTURA ECOFLEX B	114

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o transporte rodoviário é o principal meio de locomoção do Brasil. De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (BRASIL, 2015), a malha rodoviária brasileira tem aproximadamente 1,7 milhão de quilômetros de estradas, sendo que apenas 12,9% desse total são pavimentadas. Durante todos os dias, milhares de pessoas e mercadorias circulam pelas estradas, o que nos remete a sua grande importância para o desenvolvimento econômico e social do Brasil. Mesmo sendo o principal do transporte brasileiro, as estradas ainda são, em sua grande maioria, precárias e deficientes, sendo necessários grandes investimentos financeiros e científicos para melhorar sua qualidade.

As primeiras estradas de que se tem notícia surgiram no Antigo Egito (2600-2400 a.C.) para a construção das pirâmides, foram construídas com lajotas justapostas que tinha grande capacidade de suporte. Na região da Mesopotâmia (nos anos 600 a.C.), a chamada de Estrada de Semíramis cruzava o rio Tigre e margeava o rio Eufrates. Ao longo dos anos, diversas civilizações construíram estradas, mas os romanos foram os que melhores atribuíram um planejamento para a construção viária. Eles foram capazes de utilizar um sistema robusto, com alto grau técnico, que era utilizado para fins militares dentro do seu grande reino. Após a queda do império romano, o mundo, em geral, perdeu o foco na construção e manutenção de estradas, retornando apenas em 1790, quando Mascarenhas Neto apresenta o Tratado para a construção de estradas. A partir desse período começam a surgir as primeiras estradas modernas na Inglaterra, França e Escócia (BERNUCCI et al, 2006).

No Brasil, a primeira estrada de grande importância foi a Estrada do Mar, construída no período colonial, ligando São Vicente ao Planalto Piratininga. Entretanto, o grande crescimento veio um pouco mais tarde entre os anos de 1920 e 1930 com o então presidente Washington Luiz e sua famosa frase “governar é abrir estradas” (BERNUCCI et al, 2006). Desde então, o Brasil passou a ser um país voltado para o transporte rodoviário, chegando aos atuais 1,7 milhão de quilômetros de rodovias, embora a qualidade das mesmas não seja exemplar, sendo sua grande maioria não pavimentada, e as já pavimentadas, por sua vez, necessitam de manutenção e melhorias devido ao aumento excessivo em sua utilização.

Em face dessa realidade, há a necessidade de investimentos em novas técnicas de pavimentação asfálticas de maior eficiência, gerando estradas de maior qualidade e durabilidade.

O asfalto borracha vem como uma nova possível solução. Surgiu nos Estados Unidos durante a década de 1960 com o pesquisador Charles H. McDonald, que desenvolveu uma solução para pequenos reparos nas ruas da cidade de Phoenix, no estado do Arizona. Desde então, diversos países já utilizaram o asfalto borracha de maneira bem-sucedida. No Brasil, os primeiros estudos começaram no ano de 1999 com a parceria entre o Grupo GRECA e a UFRGS, desenvolvendo o melhoramento do asfalto comum com a introdução da borracha (GRECA..., 2012). O asfalto borracha ainda é pouco utilizado atualmente, entretanto já foi utilizado em grandes obras como por exemplo: na rodovia Anchieta/Imigrantes, em Copacabana e Aterro do Flamengo, na usina de Itaipu, no rodoanel de São Paulo, dentre outras (GRECA..., 2012).

O Asfalto Borracha, além da vantagem de reutilização de pneus também possui outras virtudes, como a menor propagação de trincas, redução dos custos de manutenção, economia energética devido as baixas temperaturas de trabalho, redução de poluentes, maior vida útil do pavimento entre outras (GRECA..., 2012).

A implantação e prática do asfalto borracha, no entanto, pode gerar alguns desafios, como a preocupação com os custos de execução, logística e aceitação de órgãos fiscalizadores. Estes possíveis problemas podem surgir devido à falta de fornecedores locais e falta de mão de obra especializada, sendo necessário, a importação do produto e dos serviços de outros estados enquanto não houver um fornecedor local e uma empresa que realize a execução do asfalto borracha com qualidade.

1.1 Justificativa

A partir da análise de todas as informações elencadas anteriormente, este estudo tem a finalidade de questionar: Qual a possibilidade do asfalto borracha substituir o asfalto comum para a construção de estradas de maior qualidade e durabilidade no estado do Maranhão?

A grande vantagem do asfalto borracha está na sua sustentabilidade, devido ao reaproveitamento de pneus que perderam sua vida útil. Assim além da reutilização, temos a redução dos impactos ambientais causados pelos pneus que tem sua degradação lenta e demorada, e acabam se transformando em vetores de proliferações de várias doenças. Sabemos que no nosso país o asfalto borracha é pouco utilizado, faltam incentivos fiscais e de políticas públicas para o seu melhor aproveitamento. Em contrapartida, pode-se citar o Estados Unidos, país onde a técnica é pesquisada desde o final da década de 1960, há um decreto que estabelece a utilização de uma quantidade mínima de borracha reciclada em misturas asfálticas. A lei ainda garante benefícios fiscais aos estados que a cumprem e prevê punições aos estados que não a obedecerem (GIULIO, 2007). O efeito é que em estados norte-americanos como a Flórida, Califórnia e Arizona o uso do Asfalto Borracha é uma prática há muito vivenciada pelos usuários das rodovias.

Essa pesquisa visa colaborar com o estudo da aplicação do asfalto borracha como substituto do asfalto comum no estado do Maranhão, analisando seus desafios de implantação e realizando um estudo de propriedades mecânicas do material. O trabalho contribuirá com os estudos acerca do tema, tendo em vista que a bibliografia específica envolvendo a utilização de asfalto borracha em nossa região ainda é escassa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a utilização do asfalto borracha em substituição ao asfalto comum em revestimento do tipo CAUQ na construção de estradas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar e avaliar materiais utilizados para a pesquisa;
- b) Comparar mistura do tipo CAUQ com asfalto comum e asfalto borracha.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse ponto, serão apresentadas as definições e considerações sobre os elementos envolvidos nessa pesquisa, como os aspectos gerais da pavimentação, a situação das rodovias brasileiras, bem como os estudos já realizados acerca do tema.

2.1 Aspectos gerais da Pavimentação

O pavimento, de forma geral, tem a função de resistir os esforços gerados pelo tráfego de veículos, e garantir boas condições de rodagem e segurança aos veículos que por ele passam. Pode-se dizer que o pavimento é o coração de uma rodovia, pois sem ele, todas as atividades dependentes são prejudicadas, como por exemplo: uma rodovia que tem seu pavimento defeituoso acaba por gerar acidentes e danos aos veículos dos seus usuários. Dessa maneira, nota-se que a construção de um bom pavimento é de suma importância para o êxito de uma rodovia, não deixando de lado os demais serviços que são necessários para o seu perfeito funcionamento, por exemplo: drenagem, terraplanagem, sinalização, infraestrutura entre outros.

Assim pode-se dizer que as rodovias são formadas por um conjunto de camadas com espessuras finitas denominado pavimento asfáltico. Deste modo, o DNIT (BRASIL, 2006a, p. 95) afirma que:

Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço (*sic*) considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura (*sic*) ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito.

Para exercer suas principais finalidades, o pavimento depende de como se encontra a camada de revestimento que por sua vez, está diretamente em contato com as intempéries, o tráfego dos veículos, entre outros e basicamente das particularidades estruturais do pavimento como um todo.

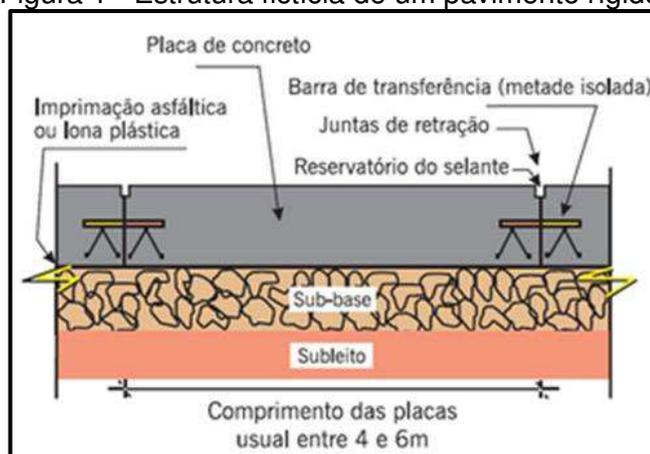
2.2 Tipos de Pavimentos

Os pavimentos podem ser classificados de acordo com sua rigidez, sendo essa adquirida conforme os materiais utilizados em sua elaboração e nas espessuras de suas camadas.

2.2.1 Pavimento rígido

Formado por placas de concreto, armadas ou não, de cimento Portland, apoiadas sobre uma sub-base de material granular ou até mesmo material estabilizado com algum tipo de aglomerante. Devido à sua grande rigidez, os esforços são captados praticamente pelas placas de concreto (BRASIL, 2006a). A figura a seguir mostra um exemplo de pavimento rígido:

Figura 1 - Estrutura fictícia de um pavimento rígido.



Fonte: SPT Sondagens (2015)

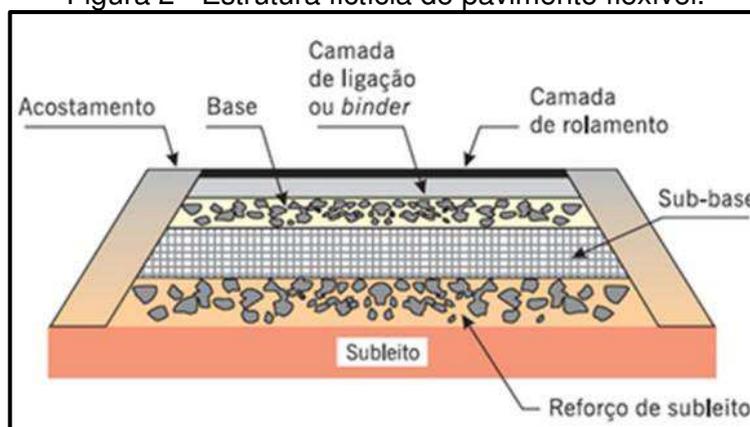
Balbo (1997), afirma que o pavimento rígido deve apresentar como conceitos primordiais a alta qualidade e a durabilidade já que caso contrário ele não será eficiente e reafirma que para alcançar tais características existe um conjunto de razões como projeto, normas, especificações de materiais e processos construtivos.

Assim, essa alta solidez do revestimento garante grande absorção das tensões, possibilitando a eliminação de uma das camadas intermediárias.

2.2.2 Pavimento flexível

Composto por concreto asfáltico, utiliza o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), apoiado sobre camadas de base, sub-base e, nem sempre, reforço de subleito. Devido a sua flexibilidade, os esforços são transmitidos e dissipados às demais camadas (BRASIL, 2006a). A figura a seguir mostra um exemplo de pavimento flexível:

Figura 2 - Estrutura fictícia de pavimento flexível.



Fonte: SPT Sondagens (2015)

Sendo o tipo de pavimento mais utilizado nas estradas brasileiras, o pavimento flexível possui um grande leque de métodos construtivos difundidos para diversas escalas, tornando-se o mais prático quanto a sua execução. Por possuir revestimento asfáltico, o carregamento é absorvido e distribuído por todas as suas camadas. Geralmente, as camadas que formam o pavimento asfáltico são sub-base, base e revestimento, e ainda em alguns casos emprega-se o reforço do subleito (GRECO, 2012).

2.2.3 Pavimento semirrígido

Pode-se dizer que ele é o meio termo entre o pavimento rígido e o flexível, caracterizado por apresentar as camadas intermediárias (base ou sub-base) de material rígido, podendo ser um solo/cal, solo/cimento entre outros (BRASIL, 2006a). A figura a seguir mostra um exemplo de pavimento semirrígido:

Figura 3 - Estrutura fictícia de pavimento semirrígido.



Fonte: Programa de Capacitação e Integração DER/2008

2.3 Ligantes asfálticos

Pode-se dizer que o ligante mais utilizado na pavimentação é o cimento asfáltico de petróleo, conhecido popularmente como asfalto, onde Senço (2007) aponta que o asfalto derivado do petróleo teve sua descoberta nos Estados Unidos, por volta de 1902, e que, somente a partir de 1908, seu uso na pavimentação foi intensificado com sua inserção nas misturas asfálticas com diferentes teores de CAP de acordo com a experiência dos profissionais adquiridas em campo.

No Brasil, sua produção teve início na refinaria de Ipiranga - RS, no ano de 1944, e antes disso, o asfalto utilizado na pavimentação brasileira vinha quase sempre da Venezuela (SENÇO, 2007).

Para sua utilização em rodovias, o CAP deve possuir algumas características importantes para a qualidade do pavimento. Segundo Pilati (2008, p. 6):

Os cimentos asfálticos de petróleo, produtos derivados da destilação do petróleo, são produzidos para apresentarem características próprias para uso direto nas misturas asfálticas. Oferecem propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, também apresentam flexibilidade durabilidade e alta resistência à ação da maioria de produtos inorgânicos.

O CAP, atualmente, é classificado de acordo com o resultado do ensaio de penetração regido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas

(ABNT), através da Norma Brasileira (NBR) 6576/2007 sendo classificado como: CAP 30-45; CAP 50-70; CAP 85-100 e CAP 150-200. Quanto maior o resultado do ensaio mais flexível é o CAP. No Maranhão o CAP 50-70 é o mais utilizado.

Assim, o funcionamento das rodovias está diretamente relacionado com o ligante utilizado. Segundo Pilati (2008) o desempenho de uma rodovia, está associado ao CAP, que precisa suportar as cargas geradas pelo tráfego de veículos em diversas condições climáticas e transmiti-los para as demais camadas. Assim ele deve ser dúctil, em baixas temperaturas, para evitar trincas térmicas no pavimento, e, ao mesmo tempo enrijecido, em altas temperaturas, para evitar deformações permanentes.

2.4 Agregados

Os agregados são provenientes de diversos tipos de rochas, podendo ser naturais, quando são formados por agentes naturais (erosão, sedimentação, desgaste entre outros), e artificiais, quando sua formação é decorrente de um trabalho precedente para que o agregado atinja as virtudes necessárias para ser utilizado em obras de engenharia (SENÇO, 2007).

Segundo Senço (2007, p. 264) “[...] agregados são materiais inertes, granulares, sem forma e dimensões definidas, com propriedades adequadas a compor camadas ou misturas para utilização nos mais diversos tipos de obra.” Aqui o foco está voltado para os agregados utilizados na pavimentação asfáltica, desde misturas asfálticas para revestimento até comentes das demais camadas.

2.4.1 Agregado graúdo

O agregado graúdo mais comum na indústria da construção civil é a brita, é um material granular que possui alta resistência que é gerado a partir da fragmentação de rochas maiores por meio de britadores mecânicos. A NBR 7211/2009 define agregado graúdo como material cujos grãos tem dimensões de 4,8mm até 152mm.

As britas são identificadas de acordo com seu tamanho, podendo ser por exemplo: brita 0, brita 1 entre outras. A tabela a seguir foi feita com base no Relatório Técnico 30: Perfil de brita para construção civil, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e mostra as principais classificações das britas:

Tabela 1 – Classificação das britas.

Classificação	Dimensão das partículas (mm)
Pó de Brita	0 a 5,0
Brita 0	4,8 a 9,5
Brita 1	9,5 a 19
Brita 2	19 a 25
Brita 3	25 a 50
Brita 4	50 a 76
Brita 5	76 a 100

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2009)

2.4.2 Agregado miúdo

Na a construção civil, o agregado miúdo mais usado é a areia. A areia é um conjunto de material granular oriundo do desgaste de rochas estáveis devido às intemperes naturais. A NBR 7211/2009 define o agregado miúdo como conjunto de partículas cujos grãos tem dimensões entre 0,075mm até 4,8mm.

2.5 Revestimento asfáltico

Focando na camada de revestimento do pavimento (camada de rodagem), pode-se dizer que a maioria dos revestimentos brasileiros utilizam uma mistura composta por diversos agregados, de diferentes tamanhos que, junto com ligantes asfálticos formam uma mistura homogênea capaz de garantir totais

condições de tráfego para os veículos. Bernucci et al (2006, p. 157) define revestimento asfáltico como:

[...] uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local.

2.5.1 Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ)

O CAUQ é o revestimento mais usual no país, formado basicamente por agregados graúdos, miúdos e ligantes asfálticos, sendo estes misturados, espalhados e compactados a altas temperaturas. O CAUQ pode ser utilizado como capa de rolamento, capa de ligação (binder), base e reforço de pavimento (BRASIL, 2006b).

O CAUQ é uma mistura asfáltica muito rígida em todos os seus pontos de vista, desde que os materiais utilizados sejam dosados e selecionados de maneira conveniente. Devido a organização dos agregados de forma bem graduada, a quantidade de ligante necessário para encobrir as partículas e ajudar a ocupar os vazios da mistura não pode ser muito elevado, tendo em vista que a mistura precisa contar com vazios livres depois de ser compactada (BERNUCCI et al, 2006).

2.6 Dosagem de misturas asfálticas

Sabe-se que a qualidade de um pavimento é muito importante. Para se atingir esse objetivo, é necessário que uma dosagem adequada seja realizada. A dosagem tem como principal objetivo, a determinação do teor de ligante ótimo, ou de projeto, para uma determinada faixa de mistura de agregados (BERNUCCI et al, 2006).

2.6.1 Dosagem Marshall

O método de dosagem mais utilizado no Brasil é a dosagem Marshall, seu principal objetivo é encontrar o teor de ligante ótimo, ou seja, a quantidade de CAP ideal para a mistura betuminosa. O método surgiu na década de 1930 desenvolvido por Bruce G. Marshall, porém, sua utilização se deu a partir da segunda guerra mundial, quando houve um aumento de carregamento gerado pela aviação militar e seus pesados aviões bombardeiros. Assim, os Estados Unidos adotaram o método Marshall devido a praticidade e rapidez, que foi comparada previamente com os outros métodos existentes e se mostrou mais eficiente (SPECHT, 2004).

Essa praticidade e rapidez é expressa de forma bem sucinta por Specht (2004, p. 121)

Em síntese, a sistemática de procedimentos do método consiste no seguinte: molda-se por compactação a quente, uma série de corpos-de-prova com diferentes porcentagens de ligante asfáltico, dentro de molde 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.

A dosagem Marshall calcula e avalia os seguintes parâmetros para a determinação do teor de ligante ótimo (BERNUCCI et al, 2006):

- a) Massa específica aparente da mistura (D_{ap} , g/cm³);
- b) Volume de vazios (V_v , %);
- c) Vazios com betume (V_{CB} , %);
- d) Vazios do agregado mineral (V_{AM} , %);
- e) Relação betume/vazios (R_{BV} , %).

Esse método é normatizado no Brasil pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual DNIT, pelo Método de Ensaio (ME) 043/1995, que estabelece as etapas a serem seguidas para a obtenção de resultados satisfatórios, de acordo com os materiais selecionados, e que os parâmetros obtidos

estejam dentro dos limites das normas do respectivo revestimento dosado. O procedimento da dosagem será mais detalhado no capítulo 3 deste trabalho.

2.7 Técnicas para análise de misturas asfálticas

Nesse item, serão abordados os métodos para a avaliação mecânica da mistura asfáltica estudada. A partir dos Corpos de Prova (CP) moldados serão testados a estabilidade Marshall, a resistência à tração e ao Desgaste Cântabro.

2.7.1 Estabilidade Marshall

A Estabilidade Marshall pode ser definida como: a máxima resistência apresentada por um CP, moldado e dosado conforme a dosagem Marshall, quando este for submetido à compressão diametral, após ficar imerso em água a 60°C por um período de 30 a 40 minutos (BRASIL, 1995).

Essa resistência é um parâmetro muito importante para os pavimentos, assim o DNIT estabelece valores mínimos para os diversos tipos de revestimentos utilizados, entretanto, deve-se ter cuidado com a interpretação dos resultados, pois valores de estabilidade Marshall muito altos indicam um revestimento muito rígido e este pode vir a não apresentar seu desempenho esperado (BERNUCCI et al, 2006).

2.7.2 Resistência à tração

A resistência à tração é obtida pelo mesmo equipamento que realiza o ensaio de estabilidade Marshall, porém o CP deve ficar por um período de duas horas a uma determinada temperatura. Este ensaio é regulamentado pela norma DNIT-ME 136/2010 e calculado pela fórmula:

$$\sigma = \frac{2F}{100\pi HD}$$

Onde:

σ – Resistência à tração, em Mpa;

F – Carga de ruptura, em N;

D – Diâmetro do CP, em cm;

H – Altura do CP, em cm.

Deve-se ressaltar a importância da temperatura do CP para a realização do ensaio, sendo esta, a maior causa de variação nos resultados apresentados.

2.7.3 Desgaste cântabro

O desgaste pode ser definido com a extração gradual dos agregados, devido ao contato direto do revestimento com os pneus dos veículos, sendo um defeito cotidiano dos pavimentos brasileiros. Com origem na Espanha, o desgaste cântabro foi criado com objetivo de medir esse desgaste. O ensaio consiste na análise de CP's Marshall de revestimentos asfálticos, mais utilizado para pavimentos drenantes, entretanto pode ser utilizado para as demais misturas asfálticas, por meio da máquina de abrasão Los Angeles (BERNUCCI et al, 2006).

2.8 A situação das rodovias Brasileiras e Maranhenses

Esse tópico, será dedicado a mostrar a situação atual das rodovias do Brasil, tomando como base uma pesquisa feita pela Confederação Nacional de Transporte (CNT) no ano de 2015.

2.8.1 Situação das rodovias Brasileiras

O Brasil é considerado um país continental devido as suas grandes dimensões e, portanto, possui uma grande malha rodoviária, que segundo a CNT, em uma pesquisa de rodovias (2015), está em torno de 1.720.607 km, entretanto a quantidade de rodovias pavimentadas não chega a 13%.

De modo geral, foram avaliados mais de cem mil quilômetros de estradas pavimentadas. A CNT (BRASIL, 2015, p. 66) afirma:

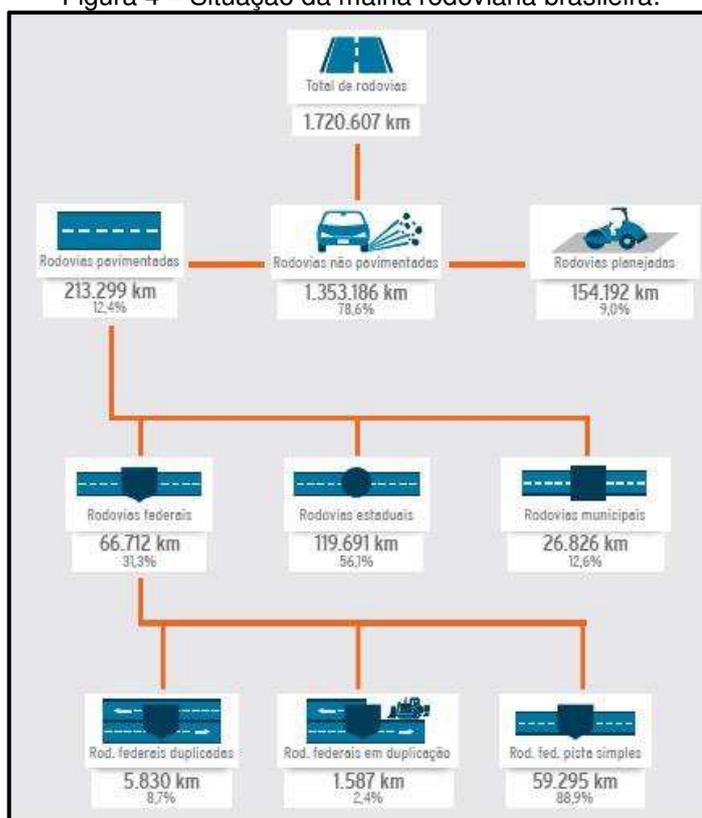
No ano de 2015, 57,3% da extensão total avaliada apresentaram algum tipo de deficiência, seja no Pavimento, na Sinalização ou na Geometria da Via, sendo que 6,3% encontra-se em estado Péssimo, 16,1% Ruim e 34,9% Regular. 43.104 km das rodovias pesquisadas (42,7%) possuem adequadas condições de segurança e desempenho, sendo classificadas como Ótimo ou Bom no Estado Geral.

Em relação a classificação dos pavimentos a CNT (BRASIL, 2015, p. 66) afirma:

Foram identificados na Pesquisa 48.897 km (48,6%) com algum tipo de deficiência no pavimento, 35,4% foram classificados como Regular, 10,1% como Ruim e 3,1% como Péssimo. Ainda em relação à avaliação do Pavimento, 41,6% da extensão pesquisada encontravam-se em Ótimo estado de conservação e 9,8% em Bom estado.

A figura abaixo mostra de forma resumida a situação das rodovias brasileiras:

Figura 4 – Situação da malha rodoviária brasileira.



Fonte: Confederação Nacional de Transporte (2015)

2.8.2 A situação das rodovias do Maranhão

Trazendo para o âmbito estadual, de acordo com a CNT (BRASIL, 2015) foram avaliados ao todo 4.577 km de rodovias no estado. Foi constatado que 65,1% apresentam algum tipo de deficiência, com relação a situação do pavimento, cerca de 50,6% foi classificada como regular, ruim ou péssimo, e ainda foram relatados que 69,1% apresentam pavimento desgastado. As figuras abaixo mostram um resumo da situação das rodovias no maranhão:

Figura 5 - Situação geral das rodovias do Maranhão.

Classificação do Estado Geral - Extensão Total		
Estado Geral	Extensão Total	
	km	%
Ótimo	97	2,1
Bom	1.502	32,8
Regular	1.702	37,3
Ruim	807	17,6
Péssimo	469	10,2
Total	4.577	100,0

Fonte: Confederação Nacional de Transportes (2015)

Figura 6 - Situação do pavimento das rodovias do Maranhão.

Classificação do Pavimento - Extensão Total		
Pavimento	Extensão Total	
	km	%
Ótimo	2.043	44,7
Bom	217	4,7
Regular	1.805	39,4
Ruim	306	6,7
Péssimo	206	4,5
Total	4.577	100,0

Fonte: Confederação Nacional de Transportes (2015)

2.9 Conceitos gerais a respeito do Asfalto Borracha

Esse tópico aborda os assuntos relacionados ao asfalto borracha, tratando do seu histórico de utilização, importância para o meio ambiente processos de fabricação entre outros.

2.9.1 Histórico da utilização do asfalto borracha

As primeiras tentativas de utilização do asfalto borracha datam do século XIX e XX, na Europa, conforme RRL (1962 *apud* SPECHT, 2004, p. 47):

Outra importante tentativa de se modificar as propriedades dos betumes com borracha data de 1898 na Inglaterra, cujo processo patenteado originava um produto chamado 'rubber-bitumen'. Em 1930, primeiro na Holanda e depois na Inglaterra, começou-se a utilizar borracha granulada para melhorar as características dos ligantes, várias pesquisas foram começadas e interrompidas devido a Segunda Guerra Mundial.

As primeiras tentativas de se utilizar a borracha de pneus inservíveis na pavimentação datam da década de 1950, entretanto os resultados encontrados não foram satisfatórios, sendo deixado de lado. Após esse período, somente na década de 1960, com o engenheiro de materiais Charles H. McDonald, que a borracha volta a ser pesquisada com maior profundidade. McDonald usava um composto de pó de borracha com asfalto para cobrir buracos na cidade de Phoenix, Arizona, assim: "Ele costumava misturar o pó com asfalto e deixava reagir por 45 minutos à uma hora para que um material com novas propriedades se formasse, o *asphalt-rubber*" conforme Carlson e Zhu (1999, *apud* SPECHT, 2004).

No entanto, somente a partir da década de 1970 que o asfalto borracha começou a ser distribuído de forma mecânica, e, a partir daí ele começou a ser utilizado em tratamentos superficiais. A partir de 1975 o asfalto borracha começou a ser utilizado em misturas asfálticas usinadas a quente, sendo utilizado em misturas de graduação aberta, descontínua e densa (PILLATI, 2008).

Podemos dizer que, no Brasil, o asfalto borracha surgiu devido à resolução 258/99 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), em que um de seus artigos proíbe o descarte de pneus no meio ambiente e a incineração a céu aberto. Dessa maneira surge a necessidade de uma nova destinação para os pneus que não tem mais utilidade, dando então início às primeiras pesquisas da incorporação da borracha na pavimentação asfáltica. Segundo o grupo GRECA, no ano de 1999 em parceria com a UFRGS foram realizados os primeiros estudos com borracha afim de melhorar as propriedades do asfalto tradicional.

A primeira obra que teve a utilização de asfalto borracha no Brasil foi no estado do Rio Grande do Sul, segundo Ribeiro (2001 *apud* SPECHT, 2004, p. 50-51):

[...] uma parceria envolvendo a Metrovias (empresa concessionária de rodovias) a Greca Asfaltos e a UFRGS, foi construído o primeiro trecho de Asfalto Borracha via úmida do país. Trata-se de um trecho de dois quilômetros (entre os quilômetros 318 e 320 da BR 116), próximo a cidade de Guaíba, (região metropolitana de Porto Alegre) construído em agosto de 2001.

A partir do ano de 2003, a utilização do asfalto borracha deu um elevado salto, sendo comercializado para grandes obras, devido aos bons resultados das aplicações nos anos anteriores e também devido ao congresso internacional *Asphalt Rubber* que aconteceu em Brasília.

2.9.2 Asfalto borracha e sua questão ambiental

Para Sandra Oda (2000), a finalidade da adição da borracha de pneu em ligantes e misturas asfálticas estão diretamente associadas com a diminuição dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto destes pneus, pois mesmo quando lançados em aterros sanitários podem gerar problemas ambientais que prejudicam a saúde pública.

No Brasil, ainda não existe uma lei que obrigue a utilização de uma parcela mínima de pneus descartados em obras de pavimentação. Mas já a Resolução 258/99 do CONAMA, estabelece o conceito de que o produtor é o responsável pelo destino final do produto.

A produção de energia pela combustão e a recauchutagem foram as primeiras maneiras de reaproveitamento de pneus. Com o avanço tecnológico, novas aplicações foram descobertas, como a utilização em revestimentos asfálticos, estimada pelo Estados Unidos como uma das melhores soluções para a reutilização dos milhões de pneus inservíveis (ODA, 2000). A figura a seguir mostra os principais destinos dos pneus após sua utilização:

Figura 7 – Destino final dos pneus descartados.



Fonte: Oda (2000)

A pavimentação apresenta dois fatores que fazem com que a utilização de pneus inservíveis tenha um excelente potencial: o uso de pneus em larga escala e o melhoramento do ligante e revestimento asfáltico, assim esse segmento é um dos mais estudados quanto ao reaproveitamento da borracha dos pneus (SPECHT, 2004).

2.9.3 O processo de fabricação do asfalto borracha

A borracha pode ser incorporada de duas maneiras na pavimentação, a primeira é como agregado, onde as partículas entram no traço da mistura asfáltica, sendo denominada de processo a seco, a segunda, sua incorporação se dá no ligante, com porcentagens entre 5 e 25% do peso total do ligante, sendo denominado de processo úmido (ODA, 2000).

O processo seco fica restringido à aplicação de revestimentos asfálticos, enquanto o processo úmido pode ser utilizado tanto para revestimentos como para selagem de trincas, tratamentos superficiais e outros. Os resultados finais obtidos pelos processos são chamados de agregado borracha (para o processo seco) e asfalto borracha (para o processo úmido) (FAXINA, 2006).

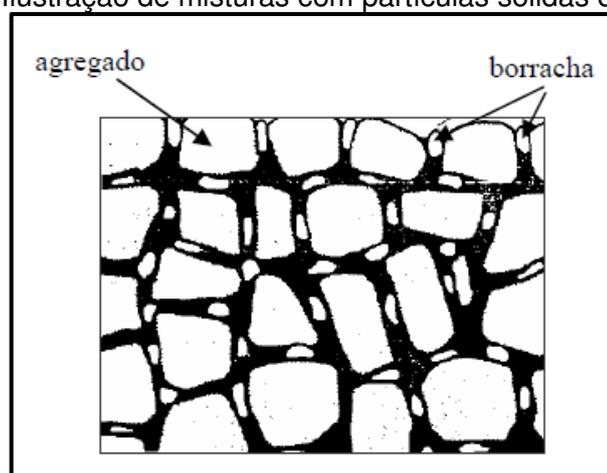
2.9.3.1 Processo seco

Nesse processo a quantidade incorporada de borracha fica em torno de 3 a 5% da massa total dos agregados minerais, com dimensão de grãos entre 1,6 e 6,4mm (PILLATI, 2008). Faxina (2006) diz que nesse processo é consumido mais borracha do que no processo via úmida, ficando em torno 2 a 4 vezes mais borracha. O processo seco pode ser descrito de com acordo com VISSER e VERHAEGHE (2000, *apud* PILATI, 2008, p. 19):

No processo seco, o agregado é aquecido a temperaturas de aproximadamente 200°C, quando então, a borracha é adicionada e processa-se a mistura por um tempo próximo de 15 segundos, ou até a formação de uma mistura homogênea agregado-borracha. Posteriormente é adicionado o ligante betuminoso a esta composição final por meio de processos convencionais de usinagem.

O resultado dessa mistura pode ser mostrado na figura a seguir:

Figura 8 - Ilustração de misturas com partículas sólidas de borracha.



Fonte: Takallou e Hicks (1988, *apud* SPECHT, 2004, p. 87).

2.9.3.2 Processo úmido

Nesse processo a quantidade incorporada de borracha fica em torno de 5 a 25% da massa total do ligante utilizado na mistura, com dimensão de grãos inferiores a 2mm (FAXINA, 2006). O processo a úmido é descrito por VISSER e VERHAEGHE (2000, *apud* PILATI, 2008, p. 18):

No processo úmido, o ligante asfáltico é aquecido a temperaturas ordem de 190°C, em um tanque de superaquecimento em condições herméticas, sendo em seguida, levado para um tanque de mistura apropriado. Nesse tanque ocorre adição de borracha moída ao ligante convencional, com período de mistura de 1 a 4 horas a uma determinada temperatura.

O processo dessa mistura pode ser mostrado na figura a seguir:

Figura 9 - Ilustração do processo de fabricação do asfalto borracha a úmido.



Fonte: Moacyr Paim (2012).

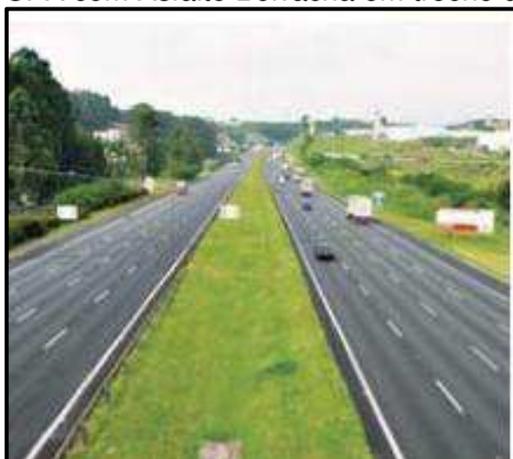
2.10 Utilização do asfalto borracha no Brasil

O rodoanel de São Paulo é um exemplo de aplicação de asfalto borracha bem-sucedido. Considerada uma obra de alto grau de dificuldade, pois foi implantada uma camada de pavimento flexível sobre uma camada de pavimento rígido. O principal objetivo da obra foi a redução de ruídos aplicando uma Camada Porosa de Atrito (CPA), segundo o Grupo GRECA (2009, não paginado):

Então foi executado entre os quilômetros 11 e 13 do Rodoanel Mário Covas, próximo à região do Tamboré (área residencial), CPA com asfalto modificado por polímero SBS (333,91t Flexpave) no sentido Bandeirantes – Castelo Branco e no sentido inverso CPA, com asfalto modificado por borracha de pneu moído (337,73t ECOFLEXPAVE).

A figura a seguir mostra o local da aplicação:

Figura 10 - Aplicação de CPA com Asfalto Borracha em trecho do rodoanel de São Paulo.



Fonte: Greca Asfaltos (2009)

O Asfalto Borracha também foi utilizado para a restauração da malha viária interna da usina hidrelétrica de Itaipu, com a utilização de concreto asfáltico usinado a quente, com ligante asfáltico modificado com pó de borracha de pneus inutilizados. Ao total foram 21 quilômetros de vias restauradas que reutilizaram ao todo 21.000 pneus (GRECA, 2012). A figura a seguir mostra um trecho pronto dentro da usina de Itaipu:

Figura 11 - Revestimento asfáltico finalizado com Asfalto Borracha.



Fonte: GRECA Asfaltos (2012).

Na obra da SC-480 tem-se mais um bom exemplo da eficiência do Asfalto Borracha. Nessa rodovia foi executado um tratamento superficial duplo, com a utilização do ECOFLEX B (GRECA, 2014). Em outro trecho foi aplicado o concreto asfáltico usinado a quente, também com ligante modificado com o pó da borracha,

mostrando a grande versatilidade para diversas situações. A figura a seguir mostra o resultado final da aplicação:

Figura 12 -Trecho finalizado com a utilização de Asfalto Borracha.



Fonte: GRECA Asfaltos (2014).

Como já foi apresentado, existem diversas obras com o Asfalto Borracha, mostrando que é possível sua utilização. O que falta ainda é investimentos e iniciativas maiores para que esse asfalto se popularize por todo país, ressaltando que as poucas obras realizadas, estão concentradas nas regiões sul e sudeste.

3 METODOLOGIA

Este estudo tem como base uma pesquisa bibliográfica e uma etapa experimental, visando o alcance dos objetivos propostos. O trabalho se dividiu basicamente em três partes: pesquisa bibliográfica, ensaios laboratoriais e interpretação dos resultados.

3.1 Tipo de Estudo

Este trabalho faz uma análise comparativa das características mecânicas do revestimento do tipo CAUQ, quando este utiliza dois tipos de ligantes diferentes, sendo eles: o CAP 50/70 e o asfalto borracha (ECOFLEX B). A pesquisa apresentará uma abordagem qualitativa, pois visa à aplicação do asfalto borracha no Maranhão, com base na melhoria da qualidade das malhas rodoviárias. Além disso, a pesquisa tem caráter explicativo-exploratório, pois além de se aprofundar na explicação do porquê o asfalto borracha possui mais vantagens que o asfalto comum, irá ainda abordar um tema que não apresenta muitos estudos no Brasil, logo com o intuito de aprimorar esse conhecimento.

3.2 Pesquisas Bibliográficas

Inicialmente, foi realizada a revisão bibliográfica para análise de alguns pontos, como: tipos de asfalto borracha utilizados, os conceitos de pavimentos, bem como os tipos de pavimento e outros dados pertinentes ao assunto. A revisão bibliográfica foi realizada mediante leitura, fichamento e resumo de cada obra e artigo utilizados, com finalidade de destacar os conceitos necessários a esse estudo.

Terminando a revisão bibliográfica, foram iniciadas as atividades laboratoriais, onde estudou-se os materiais utilizados nas misturas, definiu-se a faixa de enquadramento do DNIT, o traço da mistura asfáltica, e outros fatores importantes para a realização deste estudo. Essas atividades estão expostas e detalhadas nos itens a seguir.

3.3 Atividades Laboratoriais

As atividades laboratoriais foram realizadas no campus da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) do Centro de Ciências Tecnológicas (CCT). Os materiais utilizados nesse estudo foram:

1. Agregados graúdos e miúdos, cedidos pela Construtora Brasileira e Mineradora Ltda (CBEMI);
2. Material de enchimento, cedido Laboratório de Concreto e Materiais (LABCOM);
3. CAP 50/70, cedido pela usina da prefeitura de São Luís;
4. ECOFLEX B, cedido pela empresa GRECA Asfaltos.

Ressalta-se que todos os equipamentos utilizados na realização dos ensaios são do próprio LSP.

3.3.1 Ensaios realizados nos agregados utilizados nas misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B

Os agregados utilizados na pesquisa foram: areia e pó de brita (agregados miúdos), brita 1 e brita 0 (agregados graúdos) e fíler (material de enchimento). Os mesmos necessitam ser testados para que possam atender os requisitos das normas do DNIT-ES 112/2009 e DNIT-ES 031/2006 e assim possam ser utilizados na composição das misturas asfálticas.

3.3.1.1 Granulometria dos agregados

A granulometria dos agregados foi realizada de acordo com a norma DNIT-ES 083/98, de forma manual, onde um conjunto de peneiras pré-definidas é organizada de acordo com o tamanho de sua malha de maneira decrescente. Uma amostra de material, previamente separada, foi colocada no conjunto de peneiras e agitada de forma constante e sistemática.

Após o peneiramento, o material retido em cada peneira é pesado de forma acumulada, onde calculou-se a porcentagem de material acumulada que passa em cada peneira. A figura a seguir mostra a execução do ensaio:

Figura 13 – Granulometria dos agregados.



Fonte: Própria do autor (2016).

3.3.1.2 Equivalente de areia

Este ensaio tem como objetivo comprovar a pureza dos agregados miúdos, tendo em vista que estes não podem conter grande quantidade de argila e material orgânico em sua composição. O ensaio é normatizado pela norma DNER-ME 054/97.

O ensaio foi realizado para o pó de brita e a areia, onde suas amostras foram preparadas com material passante na peneira de 4,8mm. Após o preparo das amostras e dos equipamentos, a solução de trabalho é colocada dentro da proveta até atingir o traço de referência a 10cm da base, em seguida a amostra é inserida na proveta com auxílio de um funil e golpes com a palma da mão, que são aplicados para evitar o acúmulo de bolhas de ar. Deixa-se a seguir, a proveta em repouso por 10 minutos. Após o descanso, a proveta é vedada e agitada, de acordo com a norma, de forma sistemática por 30 segundos, então a proveta é aberta e completada com a solução de trabalho até o traço superior, lavando as paredes

internas. Novamente, a proveta fica em repouso por mais 20 minutos para então determinar o nível de material orgânico com a ajuda de um pistão, sendo assim possível o cálculo do equivalente de areia da amostra. A figura a seguir mostra a proveta após os 20 minutos e pronta para a determinação do nível de argila:

Figura 14 – Proveta pronta para as leituras do ensaio do EA.



Fonte: Própria do autor (2016).

Após as leituras da argila em suspensão (H1) e do agregado sedimentado (H2), o cálculo do equivalente de areia é feito pela equação abaixo:

$$EA = \frac{H2}{H1} \times 100$$

Onde:

EA – Equivalente de areia da amostra, em %;

H1 – Leitura da argila em suspensão, em cm;

H2 – Leitura do agregado sedimentado, em cm.

3.3.1.3 Massa específica pelo frasco Chapman

Para a determinação da massa específica dos agregados miúdos (pó de brita e areia) foi utilizado o frasco Chapman. Esse ensaio é regido pela norma DNER-ME 194/98. A amostra foi preparada com o material retido na peneira de 0,075mm e passante na peneira 4,8mm, e seca na estufa a 110°C.

Após o preparo de uma amostra de 500g, o frasco Chapman é preenchido com 200 cm³ de água, deixando-o em repouso por alguns instantes para que a água das faces laterais escorra totalmente. Em seguida, a amostra é inserida dentro do frasco cuidadosamente e pequenos golpes são aplicados para a remoção de qualquer bolha de ar. A leitura do conjunto água/agregado atingida no frasco, mostra o volume total, a figura a seguir mostra a realização do ensaio:

Figura 15 – Conjunto água/agregado no frasco Chapman.



Fonte: Própria do autor (2016).

O cálculo da massa específica dos agregados é feito pela fórmula abaixo:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Onde:

γ – Massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;

L – Leitura do conjunto água/agregado no frasco Chapman, em cm³.

3.3.1.4 Massa específica pelo frasco Le Chatelier

O frasco de Le Chatelier é utilizado para a obtenção da massa específica de materiais finamente pulverulentos, no caso deste trabalho, o fíler. Esse ensaio é normatizado pela norma DNER-ME 085/94. Para a execução do ensaio, foi separado uma amostra de 60g. Inicialmente o frasco é preenchido com querosene até a marcação entre 0 e 1 cm³, o que equivale a leitura inicial (Li). Em seguida, a amostra é colocada dentro do frasco, de maneira cuidadosa para que o material não se prenda nas paredes e nem bolhas de ar sejam formadas. Após o fim desse processo, anota-se a leitura final (Lf) do conjunto querosene/fíler. Os materiais utilizados nesse ensaio são demonstrados na figura a seguir:

Figura 16 – Conjunto querosene/fíler no frasco Le Chatelier.



Fonte: Própria do autor (2016).

O cálculo da massa específica do fíler é feito pela equação abaixo:

$$\mu = \frac{60}{L_f - L_i}$$

Onde:

μ – Massa específica do fíler, em g/cm^3 ;

L_i – Leitura inicial do querosene, em cm^3 ;

L_f – Leitura final do conjunto querosene/fíler, em cm^3 .

3.3.1.5 Massa específica dos agregados graúdos

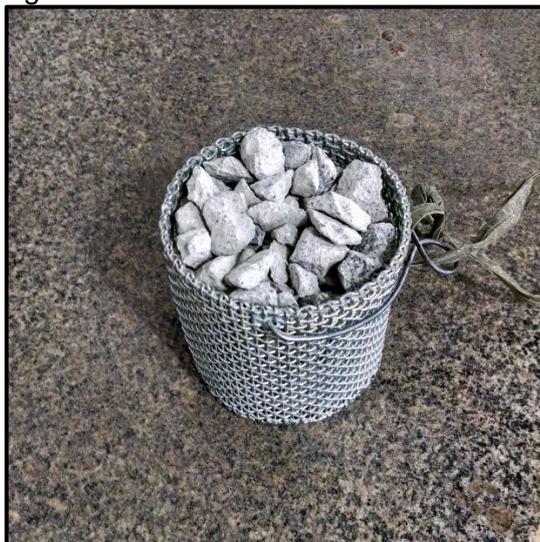
Para a determinação da massa específica dos agregados graúdos foi utilizado o princípio de sólidos irregulares de Arquimedes, que diz que o volume deslocado por um sólido irregular é exatamente igual ao seu volume próprio. O material para o ensaio deve estar totalmente seco. A amostra foi predefinida a partir de um cesto metálico padrão, onde ele foi completamente preenchido com o agregado para a determinação da massa seca (M_s) da amostra, então com a ajuda de um balde cheio de água e um suporte metálico o cesto é imerso, com a amostra, para se obter o volume deslocado (V_d) da amostra. As figuras a seguir ilustram o processo:

Figura 17 – Cesto metálico padrão.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 18 – Amostra de material ensaiada.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 19 – Esquema para determinação do volume deslocado da amostra.



Fonte: Própria do autor (2016).

Para a determinação da massa específica, usa-se a equação a seguir:

$$\mu = \frac{Ms}{Vd}$$

Onde:

μ – Massa específica do agregado graúdo, em g/cm³;

Ms – Massa seca da amostra, em g;

Vd – Volume deslocado pela amostra, em cm³.

3.3.1.6 Absorção dos Agregados Graúdos

A absorção é muito importante para a mistura asfáltica, pois agregados que apresentarem alta absorção não são muito recomendados, pois podem consumir uma quantidade maior de ligante do que a necessária, obrigando adicionar uma parcela extra de ligante na mistura (BERNUCCI et al, 2006). O ensaio de absorção foi realizado para a brita 1 e a brita 0, e é normatizado pela norma DNER-ME 081/98.

As amostras dos materiais a serem utilizados no ensaio são retidas na peneira 4,8mm, lavadas na mesma peneira e secas em estufa a temperatura entre 105°C a 110°C. Após seco, resfria-se a amostra por um período de 1h a 3h, e anota-se a sua massa seca (Ms). Em seguida, a amostra é novamente imersa em água por 24h, como mostra a figura a seguir:

Figura 20 – Amostras submersas.



Fonte: Própria do autor (2016).

Posteriormente, as amostras são retiradas da imersão, espalhadas sobre um pano absorvente e secas de maneira a retirar as películas visíveis de água, como mostra a figura a seguir:

Figura 21 – Amostras espalhadas sobre pano absorvente.



Fonte: Própria do autor (2016).

Após esse processo, pesa-se a amostra mais uma vez para a determinação de sua massa na condição saturada (M_h) e calcula-se a absorção pela fórmula abaixo:

$$A = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Onde:

A – Absorção do agregado, em %;

M_s – Massa da amostra seca, em g;

M_h – Massa da amostra na condição saturada, em g.

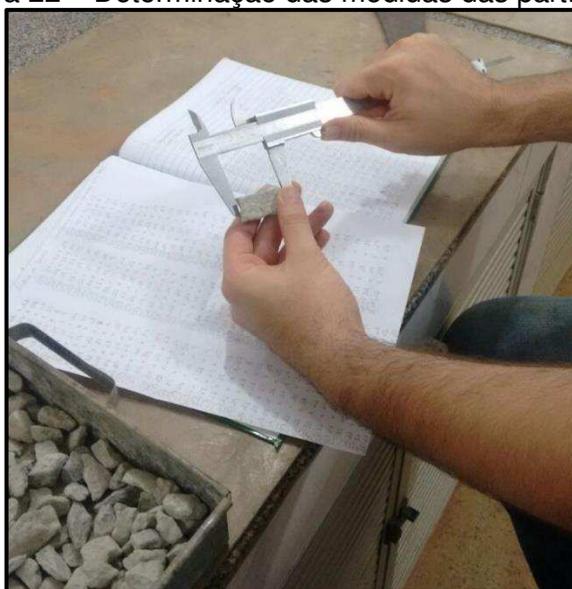
3.3.1.7 Índice de forma

A forma das partículas dos agregados influencia alguns fatores importantes como a resistência ao cisalhamento, a trabalhabilidade e a energia de compactação para atingir determinadas densidades (BERNUCCI et al, 2006). Para a

determinação do índice de forma dos agregados graúdos foi utilizado o método do paquímetro, que é regulamentado pela norma NBR 7809/2006.

Para o preparo da amostra, são escolhidas partículas retidas na peneira 9,5mm. O ensaio foi feito apenas para a brita 1, pois a brita 0 tem grande quantidade de material passando na peneira 9,5mm. Além disso, as partículas devem estar completamente secas, utilizando uma amostra com 200 unidades. A realização do ensaio é feita de maneira manual. Com um paquímetro, mede-se as três dimensões de cada agregado: comprimento (a), largura (b) e espessura (c). A figura a seguir mostra a determinação das medidas das partículas:

Figura 22 – Determinação das medidas das partículas.



Fonte: Própria do autor (2016).

Após a obtenção de todas as medidas, o cálculo do índice de forma é feito pela média das razões de b/a e c/b .

3.3.1.8 Resistência à abrasão

Para os agregados graúdos, foi utilizado o método de abrasão Los Angeles, que tem esse nome devido ao equipamento que é utilizado para a realização do ensaio. A resistência à abrasão é muito importante para misturas asfálticas, pois a camada de revestimento sofre ação direta de desgaste provocada

por veículos (BERNUCCI et al, 2006). O ensaio obedece a norma DNER-ME 035/98. O material utilizado para a confecção das amostras deve ser previamente lavado e seco em estufa à temperatura de 105°C a 110°C, até se verificar a constância de peso. As amostras foram selecionadas de acordo com as graduações presentes na norma, sendo escolhido a graduação A para a brita 1 e graduação B para a brita 0. Após o enquadramento, as amostras são colocadas dentro do equipamento Los Angeles, mostrado na figura a seguir:

Figura 23 – Equipamento Los Angeles.



Fonte: Própria do autor (2016).

Com uma quantidade de esferas pré-estabelecidas por norma, de acordo com a sua graduação, as amostras são giradas dentro do tambor por 500 ciclos completos. Ao término dos giros, todo o material é retirado do tambor e lavado na peneira 1,7mm, desprezando a parcela passante na mesma. Em seguida, o material retido é seco em estufa à temperatura de 105°C a 110°C por no mínimo 3 horas. A figura a seguir mostra o material retirado do tambor e pronto para ser lavado na peneira 1,7mm:

Figura 24 – Amostra pronta para ser lavada na peneira 1,7mm.



Fonte: Própria do autor (2016).

Feito isso o cálculo da abrasão Los Angeles é feito pela equação:

$$A_n = \frac{M_n - M'_n}{M_n} \times 100$$

Onde:

A_n – Abrasão Los Angeles da graduação n , em %;

n – Graduação escolhida de acordo com a norma;

M_n – Massa da amostra seca colocada no equipamento, em g;

M'_n – Massa da amostra lavada e seca após o ensaio, em g.

3.3.1.9 Adesividade ao ligante asfáltico

O ensaio foi realizado para os agregados graúdos. A adesividade é verificada pelo não escorrimento da capa de ligante asfáltico que reveste o agregado, quando a amostra permanece a 40°C em água destilada por 72 horas. O ensaio é regido pela norma DNER-ME 078/94. O preparo da amostra é feito com 500g de material que passa na peneira 19mm e fica retido na peneira 12,7mm. Após lavado, é colocado em um recipiente na estufa, com água destilada, à temperatura de 120°C por 2 horas. Subsequente, a amostra pronta e o ligante asfáltico são aquecidos respectivamente a 100°C e 120°C. Assim, são misturados de forma

homogênea, sendo 17,5g de ligante acrescentado ao agregado. O conjunto agregado/ligante é colocado sobre superfície lisa para resfriamento, logo em seguida o material é colocado dentro de um béquer e totalmente coberto com água destilada, e levado a estufa à uma temperatura de 40°C por 72 horas. As figuras a seguir ilustram o processo do ensaio:

Figura 25 – Amostra sobre superfície lisa para resfriamento.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 26 – Amostra coberta com água destilada pronta para ser colocada na estufa.



Fonte: Própria do autor (2016).

O resultado é considerado satisfatório quando não há desprendimento de ligante ao fim das 72 horas, e insatisfatório quando há desprendimento total ou parcial de ligante após as 72 horas.

3.3.2 Ensaio realizado nos ligantes asfálticos utilizados nas misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B

Os ligantes utilizados nessa pesquisa foram: o CAP 50/70 e o ECOFLEX B (asfalto borracha). Os mesmos precisam ser testados e apresentar resultados satisfatórios com suas devidas normas. Vale ressaltar que os ensaios realizados foram feitos apenas para o CAP 50/70, tendo em vista que o ECOFLEX B foi analisado pelo fabricante antes de ser enviado, cujas características encontram-se especificadas no anexo A. A seguir apresentam-se com detalhes os ensaios realizados com o CAP 50/70.

3.3.2.1 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração verifica a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de ligante sob condições pré-estabelecidas de carga, temperatura e tempo de aplicação da carga (BERNUCCI et al, 2006). O ensaio é normatizado pela norma DNIT-ME 155/2010, onde define as condições de ensaio como: temperatura de 25°C. Carga de 100g e tempo de aplicação da carga de 5 segundos. Para a realização do ensaio, uma amostra de CAP foi colocada em um recipiente padrão, e mantido em ambiente com temperatura controlada de 25°C, por meio de um penetrômetro, a amostra é perfurada por uma agulha padrão, livre de impurezas, em um tempo pré-determinado. A figura a seguir mostra o momento de realização do ensaio:

Figura 27 – Realização do ensaio de penetração.



Fonte: Própria do autor (2016).

Para determinação da penetração, são necessárias duas leituras: a leitura inicial (L_i), antes da execução do ensaio, quando agulha toca na amostra; e a leitura final (L_f), após a realização da penetração. O cálculo é feito pela fórmula abaixo:

$$P = L_f - L_i$$

Onde:

P – Penetração da amostra de CAP, em décimo de mm;

L_i – Leitura inicial do penetrômetro, em décimo de mm;

L_f – Leitura final do penetrômetro, em décimo de mm.

O ensaio é realizado três vezes para uma mesma amostra, variando o local de aplicação da carga, onde o resultado final é obtido pela média dos três.

3.3.2.2 Ensaio de ponto de amolecimento – ensaio do anel e bola

O ponto de amolecimento de um ligante é definido como uma medida empírica, que relaciona a temperatura em que o ligante amolece no momento em que é aquecido, perante situação peculiar, e alcança uma certa condição de escoamento (BERNUCCI et al, 2006). O ensaio é padronizado pela norma DNIT-ME 131/2010. O preparo da amostra foi feito com o ligante aquecido, em seguida, os anéis foram preenchidos com o CAP e deixados em superfície lisa por 30 minutos para resfriamento. Após o resfriamento, o anel é acoplado com as guias e esferas dentro do recipiente utilizado para o ensaio, então o recipiente é preenchido com água e o conjunto é aquecido conforme a norma. As figuras a seguir mostram a realização do ensaio:

Figura 28 – Recipiente necessário para a execução do ensaio.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 29 – Realização do ensaio de ponto de amolecimento.



Fonte: Própria do autor (2016).

Conforme o aquecimento, a temperatura é monitorada pelo termômetro de mercúrio. O ponto de amolecimento é determinado no momento em que a amostra do CAP toca a placa de referência. Se a diferença entre as duas amostras for maior que 2°C o ensaio deve ser realizado novamente.

3.3.2.3 *Ensaio de viscosidade*

A viscosidade é definida como: “[...] uma medida de consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento” (BERNUCCI et al, 2006, p. 43). Para a determinação da viscosidade do CAP estudado, foi utilizado o método Saybolt-Furol, o mais utilizado no Brasil, que é regido pela norma NBR 14950/2003.

Para a realização do ensaio foi utilizado o viscosímetro Saybolt-Furol, mostrado na figura a seguir:

Figura 30 – Viscosímetro Saybolt-Furol utilizado no ensaio.



Fonte: Própria do autor (2016).

Antes do início do ensaio, o aparelho foi limpo afim de eliminar qualquer impureza que possa prejudicar o experimento. As temperaturas escolhidas para a realização do ensaio foram feitas de acordo com a norma, sendo elas: 135°C, 150°C e 177°C. A amostra utilizada teve sua temperatura elevada em 10°C acima das temperaturas de ensaio. Após atingir a temperatura ideal para o ensaio, o ligante é colocado no equipamento, com a passagem vedada, e com auxílio de funil até que o mesmo atinja o nível para o ensaio. Em seguida a máquina tem sua passagem desbloqueada e o tempo é cronometrado até o que ligante alcance a marca de um frasco padrão (60 ml). Esse processo é repetido para as demais temperaturas, e o tempo que o ligante leva para atingir a marca do frasco é chamado de Segundo Saybolt-Furol (SSF). A realização do ensaio é mostrada na figura a seguir:

Figura 31 – Passagem do ligante pelo equipamento.



Fonte: Própria do autor (2016).

Após o ensaio um gráfico é elaborado em função dos SSF e a temperatura. Esse gráfico será utilizado para a determinação das temperaturas de mistura e compactação da mistura asfáltica.

Para o ECOFLEX B, não foi possível a realização deste ensaio, tendo em vista que esse ligante apresenta uma alta viscosidade, sendo necessário a utilização do método Brookfield. Como o LSP não apresenta condições para a realização desse ensaio, as temperaturas da mistura asfáltica foram obtidas direto com o fabricante, que realizou esse ensaio. Para mais detalhes acessar o anexo B.

3.3.3 Dosagem das misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B

Para a dosagem das misturas asfálticas, foi utilizado o método Marshall, onde o revestimento estudado foi o CAUQ. Nesse estudo optou-se por denominar de CAUQ-REF o que utilizou o CAP 50/70 e o CAUQ-B que utilizou o ECOFLEX B. Ambas as misturas foram enquadradas na faixa B do DNIT, de acordo com as normas DNIT-ES 031/2006 e DNIT-ES 112/2009.

Ao total foram elaborados 78 Corpos de Prova (CP's), sendo 36 utilizados para o ensaio de estabilidade Marshall, 36 para ensaio de resistência à tração e 6 para desgaste cântabro.

3.3.3.1 Dosagem Marshall para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B

A dosagem Marshall é regulamentada pela norma DNER-ME 043/95, e consiste na elaboração de CP's de misturas asfálticas usinadas à quente, para determinação da estabilidade Marshall, fluência e parâmetros volumétricos, que tem ainda, como objetivo a determinação do teor ótimo de projeto para as misturas.

Após o enquadramento granulométrico da mistura e de todos os ensaios descritos anteriormente, foram definidos 5 teores de ligante utilizados para a dosagem, sendo eles: 4%, 4,5%, 5%, 5,5% e 6%. Para cada teor, foram elaborados 12 CP's (6 do tipo CAUQ-REF e 6 do tipo CAUQ-B), sendo que 6 (3 do tipo CAUQ-REF e 3 do tipo CAUQ-B) foram utilizados para a estabilidade Marshall e 6 (3 do tipo CAUQ-REF e 3 do tipo CAUQ-B) para a determinação da resistência à tração.

A escolha das temperaturas de mistura e compactação se faz através do ensaio de viscosidade, o mesmo descrito anteriormente. A tabela a seguir mostra as temperaturas utilizadas para as duas misturas:

Tabela 2 – Temperaturas utilizadas para a moldagem dos CP's.

Temperatura (°C)	CAUQ-REF	CAUQ-B
Ligante	155	175
Agregados	165	183
Compactação	140	175

Fonte: Própria do autor (2016).

O procedimento para a moldagem dos CP's do CAUQ-REF e do CAUQ-B, segundo a norma, é descrito abaixo:

1. Secagem e pesagem dos agregados utilizados;
2. Pré-aquecimento dos agregados em estufa;
3. Aquecimento do ligante à temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade indicado na tabela 2;
4. Aquecimento dos agregados à temperatura indicada na tabela 2 (10º acima da temperatura do ligante, salvo CAUQ-B);
5. Aquecimento de molde metálico à temperatura de 100ºC;

6. Mistura manual do ligante com os agregados por um período de 2 a 3 minutos;
7. Compactação manual, 75 golpes em cada face, da mistura na temperatura indicada na tabela 2.

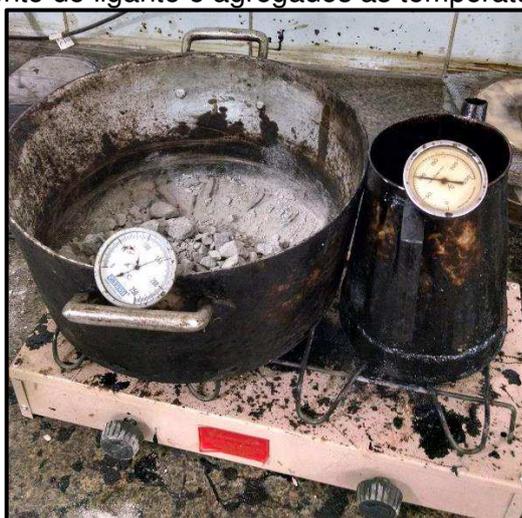
As figuras a seguir, mostram o processo de moldagem dos CP's:

Figura 32 – Agregados pesados e prontos para o pré-aquecimento em estufa.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 33 – Aquecimento do ligante e agregados às temperaturas pré-determinadas.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 34 – Mistura do ligante asfáltico com os agregados.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 35 – Mistura asfáltica no molde metálico pronto para compactação.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 36 – Compactação manual da mistura asfáltica.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 37 – Armazenamento dos CP's após desmolde.



Fonte: Própria do autor (2016).

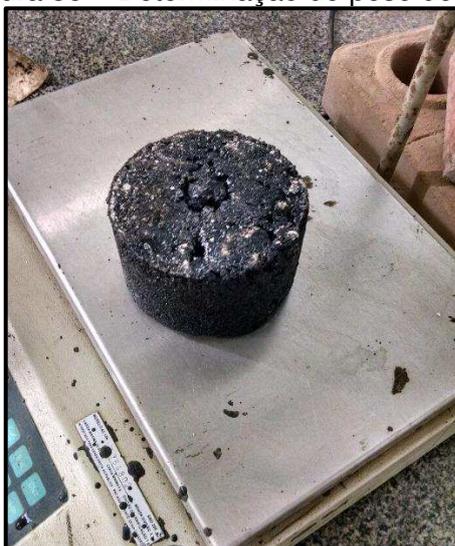
Após 24 horas da compactação, os CP's são desmoldados e armazenados, estando prontos para serem ensaiados. Para a determinação do teor de projeto, os CP's, que serão ensaiados para a estabilidade Marshall, tem seu peso e volume determinados, para que seja possível calcular os seguintes parâmetros utilizados para a definição do teor ótimo:

1. Densidade aparente (D_{ap}) e Densidade Máxima Teórica (DMT);

2. Volume de Vazios (VV);
3. Vazios Com Betume (VCB);
4. Vazios do Agregado Mineral (VAM);
5. Relação Betume/Vazios (RBV).

As figuras a seguir mostram a determinação do peso e volume dos CP's:

Figura 38 – Determinação do peso do CP.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 39 – Determinação do volume do CP.



Fonte: Própria do autor (2016).

Feito isso, são elaborados gráficos das variações dos parâmetros citados em função dos teores de ligante utilizados. Os métodos para a determinação do teor ótimo de ligante, utilizados neste trabalho, serão apresentados no capítulo 4 deste trabalho.

3.3.3.2 Estabilidade Marshall para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B

A norma para o ensaio de estabilidade Marshall é a mesma da dosagem, a norma DNER-ME 043/95. Para a determinação da estabilidade Marshall, os CP's selecionados aleatoriamente tem sua altura média determinada, tendo em vista que existe um fator de correção na norma que leva em conta a altura do CP. Feito isso, os corpos de prova ficam imersos em banho maria por 30 a 40 minutos a 60° C e em seguida são rompidos na prensa Marshall por meio de anéis envoltórios. As figuras a seguir mostram o processo:

Figura 40 – Determinação da altura média do CP.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 41 – CP's em banho maria a 60°C.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 42 – Rompimento do CP.



Fonte: Própria do autor (2016).

Após o rompimento, a estabilidade Marshall é determinada pela equação abaixo:

$$EM = Lp \times Fp \times Fh$$

Onde:

EM – Estabilidade Marshall, em kgf;

Lp – Leitura da prensa, em kgf;

Fp – Fator de correção da prensa;

Fh – Fator de correção em função da altura do CP.

De acordo com a mesma norma, o fator em função da altura é calculado pela expressão:

$$Fh = 927,23 \times h^{-1,64}$$

Onde:

Fh – Fator de correção em função da altura do CP;

h – Altura média do CP, em mm;

3.3.3.3 Resistência à tração para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B

A resistência à tração é regida pela norma DNIT-ME 136/2010. Os CP's escolhidos para o ensaio tem suas dimensões médias, altura e diâmetro determinadas. Feito isso, os CP's são colocados em ambiente com temperatura controlada (25°C) por um período de 2 horas para que depois possam ser rompidos na prensa Marshall por anéis envoltórios, que possuem friso metálico para realizar a compressão diametral do CP.

O controle de temperatura é muito importante para o ensaio. Assim, para garantir que os CP's estivessem na temperatura adequada, foi moldado um CP extra e nele foi feito um furo com uma haste metálica no centro, para poder medir a temperatura interna do CP. Esse CP não foi rompido, pois sua finalidade foi apenas para medir a temperatura. As figuras a seguir mostram o procedimento:

Figura 43 – Anel envoltório com friso metálico.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 44 – CP's em ambiente controlado a 25°C.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 45 – Rompimento do CP.



Fonte: Própria do autor (2016).

O cálculo da resistência à tração é feito pela equação abaixo:

$$\sigma = \frac{2F}{100\pi HD}$$

Onde:

σ – Resistência à tração, em Mpa;

F – Carga de ruptura, em N;

D – Diâmetro do CP, em cm;

H – Altura do CP, em cm.

3.3.3.4 Desgaste cântabro

O desgaste cântabro foi realizado neste trabalho a título de complementação, tendo em vista que seu uso não é muito comum em revestimentos do tipo CAUQ. O ensaio foi realizado apenas para o teor ótimo das misturas CAUQ-REF e CAUQ-B, e ao total foram utilizados 6 CP's (3 CAUQ-REF e 3 CAUQ-B). O ensaio é normatizado pela norma DNER-ME 383/1999.

Para 2 CP's, um de cada mistura, o procedimento foi seguido de acordo com a norma, onde após a desmoldagem dos CP's, os mesmos foram pesados e colocados dentro do tambor da máquina Los Angeles, sem carga abrasiva e

individualmente. A máquina é então acionada até que o tambor complete as 300 revoluções previstas em norma, e após as revoluções os CP's são pesados novamente sendo possível o cálculo do desgaste cântabro.

Para os 4 CP's restantes, dois de cada mistura, o ensaio seguiu o mesmo procedimento, entretanto, após a desmoldagem, os CP's passaram por 3 processos de tentativas de desgaste, não previstos em norma, para tentar simular um envelhecimento da mistura como acontece com o passar dos anos com o revestimento construído. Esses processos foram:

1. Confinamento em estufa à temperatura de 110°C por 48 horas;
2. Confinamento em freezer à temperatura de -12°C por 48 horas;
3. Imersão em água à temperatura ambiente por 48 horas;

Após essas etapas, seguiu-se os mesmos procedimentos dos outros 2 CP's, porém, sua pesagem final aconteceu após os CP's ficarem por 24 horas na estufa à 110°C para garantir que a água que preencheu os vazios não causaria variação no peso final. As tentativas de simulação de envelhecimento são mostradas nas figuras a seguir:

Figura 46 – Confinamento em estufa à temperatura de 110°C por 48 horas.



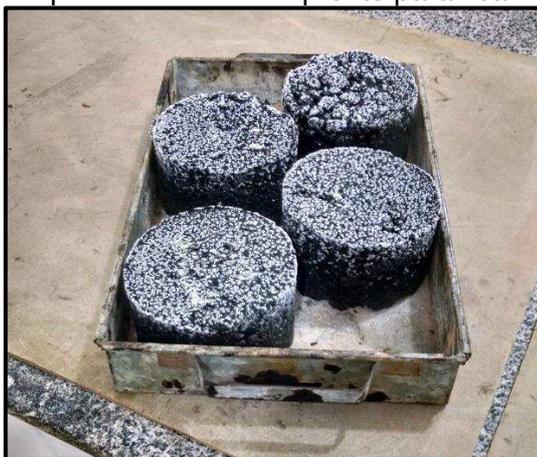
Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 47 – Confinamento em freezer à temperatura de -12°C por 48 horas.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 48 – CP's após resfriamento e pronto para ficar imerso em água.



Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 49 – CP's imersos em água à temperatura ambiente por 48 horas.



Fonte: Própria do autor (2016).

O cálculo do desgaste cântabro é feito pela equação abaixo:

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100$$

Onde:

A – Desgaste cântabro, em %;

P – Peso do CP antes do ensaio, em g;

P' – Peso do CP após o ensaio, em g.

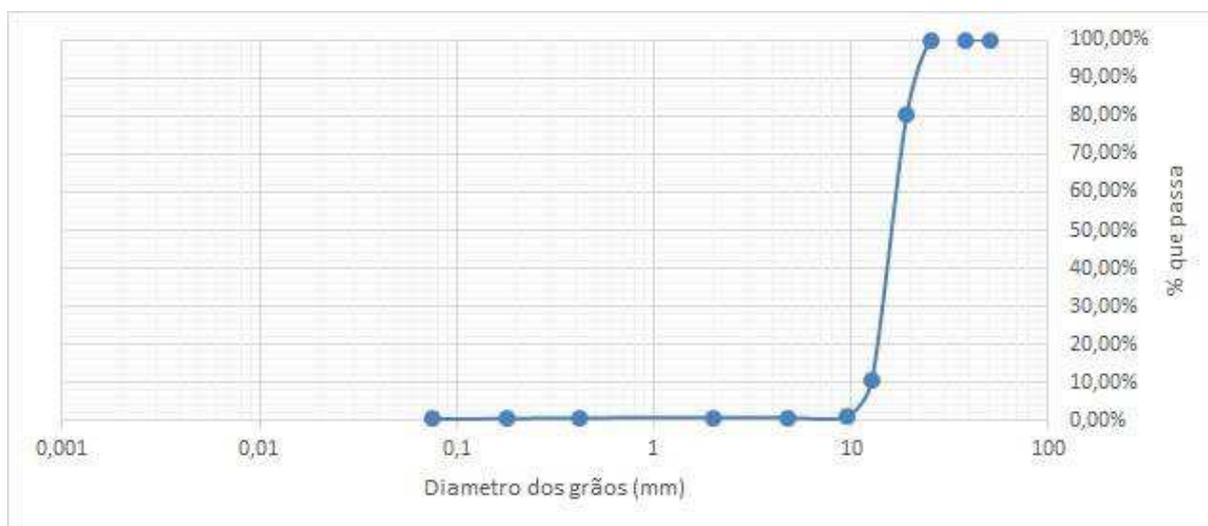
4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios especificados no capítulo anterior, realizados no LSP.

4.1 Ensaio realizados nos agregados utilizados nas misturas Asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B

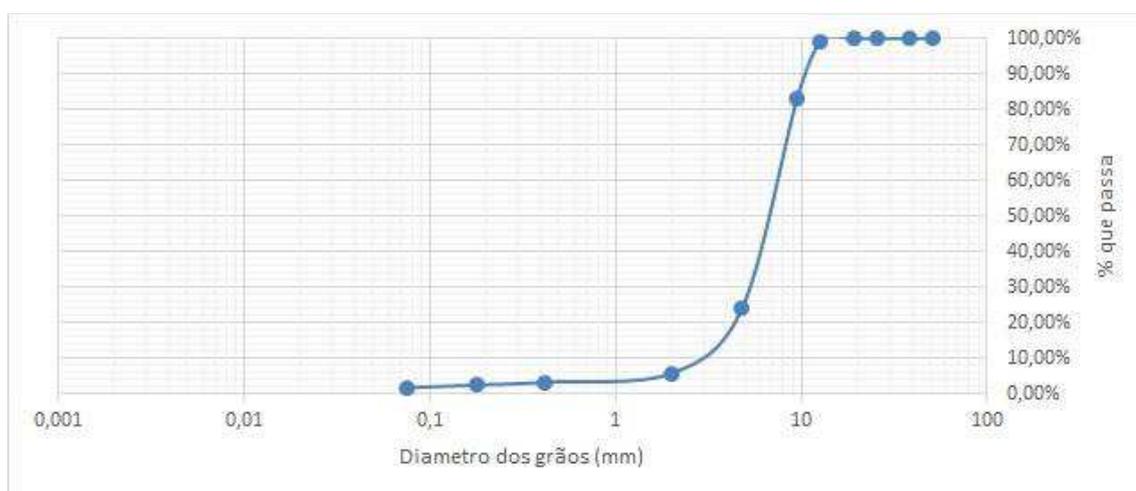
Os agregados utilizados nesta pesquisa tiveram sua granulometria analisada para que fosse possível o enquadramento granulométrico de acordo com a faixa do DNIT adotada. O resultado da granulometria dos agregados é mostrado pelos gráficos a seguir:

Gráfico 1 – Curva granulométrica Brita 1.



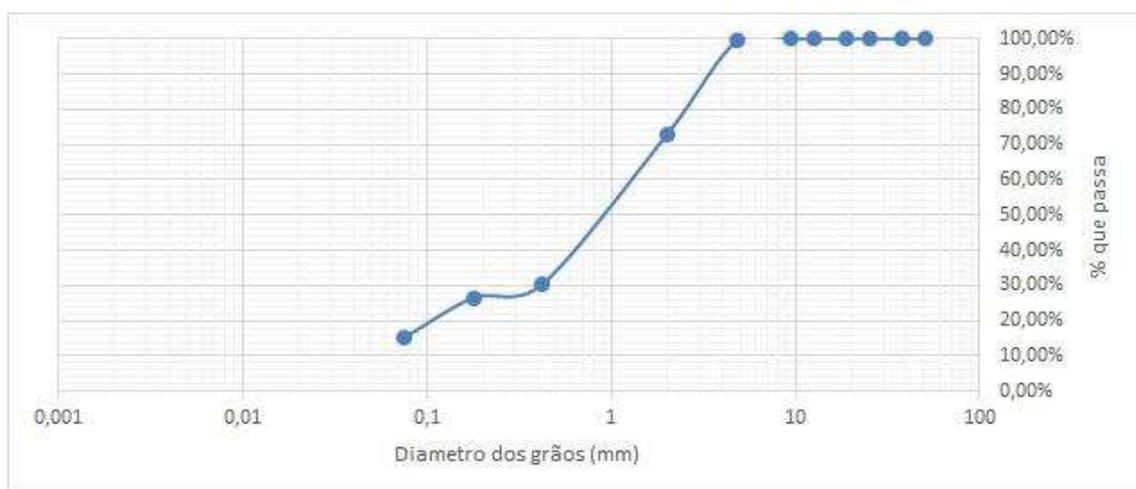
Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 2 – Curva granulométrica brita 0.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 3 – Curva granulométrica pó de brita.



Fonte: Próprio do autor (2016).

Gráfico 4 – Curva granulométrica areia.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 5 – Curva granulométrica fíler.



Fonte: Própria do autor (2016).

Os gráficos 1, 2, 3, 4 e 5 foram gerados a dos resultados contidos no apêndice A, apresentados no final deste trabalho.

Após a análise granulométrica, os agregados estudados passaram por diversos ensaios de caracterização para comprovação de sua utilização na pavimentação. Os agregados graúdos foram testados aos seguintes ensaios: abrasão Los Angeles, absorção, índice de forma, determinação da massa específica e adesividade ao ligante asfáltico. Os resultados obtidos estão representados na tabela a seguir:

Tabela 3 – Caracterização dos agregados graúdos.

Ensaio realizado	Norma do ensaio	Brita 1	Brita 0	Parâmetros das normas DNIT-ES 112/2009 e DNIT-ES 031/2006
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 035/98	17,64%	19,83%	≤50%
Índice de forma	NBR 7809/2006	b/a = 0,78 c/b = 0,69	-	≥0,50
Massa específica (g/cm ³)	-	2,777	2,776	-
Adesividade ao ligante asfáltico	DNER-ME 078/94	Insatisfatório	Insatisfatório	Considera-se satisfatório quando não há desprendimento de ligante após 72 horas
Absorção (%)	DNER-ME 081/98	0,283%	0,74%	-

Fonte: Própria do autor (2016).

Os resultados indicam que os agregados estão condizentes com as normas, entretanto, a adesividade ao ligante asfáltico se mostrou insatisfatória, sendo recomendado pelas normas DNIT-ES 031/2006 e DNIT-ES 112/2009 a utilização de aditivo para o melhoramento da adesividade. De acordo com o índice de forma, foi possível classificar a brita 1 como cúbica, sendo o tipo mais indicado para a pavimentação.

Para os agregados miúdos, foram feitos os seguintes ensaios: equivalente de areia e determinação da massa específica. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 4 – Caracterização dos agregados miúdos.

Ensaio realizado	Norma do ensaio	Areia	Pó de brita	Parâmetros das normas DNIT-ES 112/2009 e DNIT-ES 031/2006
Massa específica (g/cm ³)	DNER-ME 194/98	2,646	2,778	-
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054/97	74,56%	69,70%	≥55%

Fonte: Própria do autor (2016).

Os agregados miúdos apresentaram bons resultados para o ensaio de equivalente de areia, mostrando que possuem pouca quantidade de material orgânico e argila em sua composição. Para o fíler foi feito o ensaio de massa específica, mostrado na tabela a seguir:

Tabela 5 – Caracterização do fíler.

Ensaio realizado	Norma do ensaio	Fíler	Parâmetros das normas DNIT-ES 112/2009 e DNIT-ES 031/2006
Massa específica (g/cm ³)	DNER-ME 085/94	2,927	-

Fonte: Própria do autor (2016).

As tabelas 3, 4 e 5 foram geradas a partir dos resultados expostos no apêndice B, apresentado no final deste trabalho.

4.2 Ensaios realizados nos ligantes asfálticos utilizados nas misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B

Os ligantes estudados neste trabalho foram: o CAP 50/70 e o ECOFLEX B. Os ensaios de caracterização dos mesmos foram descritos no capítulo 3. Os ligantes tiveram suas densidades fornecidas pelos respectivos fabricantes, e os demais resultados dos ensaios são apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 6 – Caracterização do CAP 50/70.

Ensaio realizado	Norma do ensaio	CAP 50/70	Especificação brasileira de CAP (ANP,2005)
Penetração: 100g, 5s à 25°C (0,1mm)	DNIT-ME 155/2010	58	50-70
Viscosidade Saybolt-Furol (SSF)	135°C	206	mín 141
	150°C	64	mín 50
	177°C	45	30 a 150
Ponto de Amolecimento (°C)	DNIT-ME 131/2010	56	mín 46
Densidade relativa (g/cm ³)	DNER-ME 193/96	1,03	-

Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 50 – Caracterização ECOFLEX B.

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

DATA	14/12/2015		
PRODUTO	ECOFLEX B		
ENSAIO	NORMA	ESPECIFICAÇÃO (*)	RESULTADOS
Penetração (100g, 5s, 25°C), 0,1mm	NBR 6576	30 a 70	49,5
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	55 (mínimo)	57,0
Recuperação Elástica, %	NLT 329 / 91	50 (mínimo)	69,0
Ponto de Fulgor, °C	NBR 11341	235 (mínimo)	> 240
Densidade Relativa, 25°C/25°C	NBR 6296	Anotar	1,031
Visc Brookfield à 175°C, cP, Sp 3, 20 rpm	ASTM D 2196-99	800 - 2000	1505,0
Temperatura de Carregamento. °C	-	Anotar	175

* Esta especificação aprovada no IBP e em fase de publicação pela ANP.

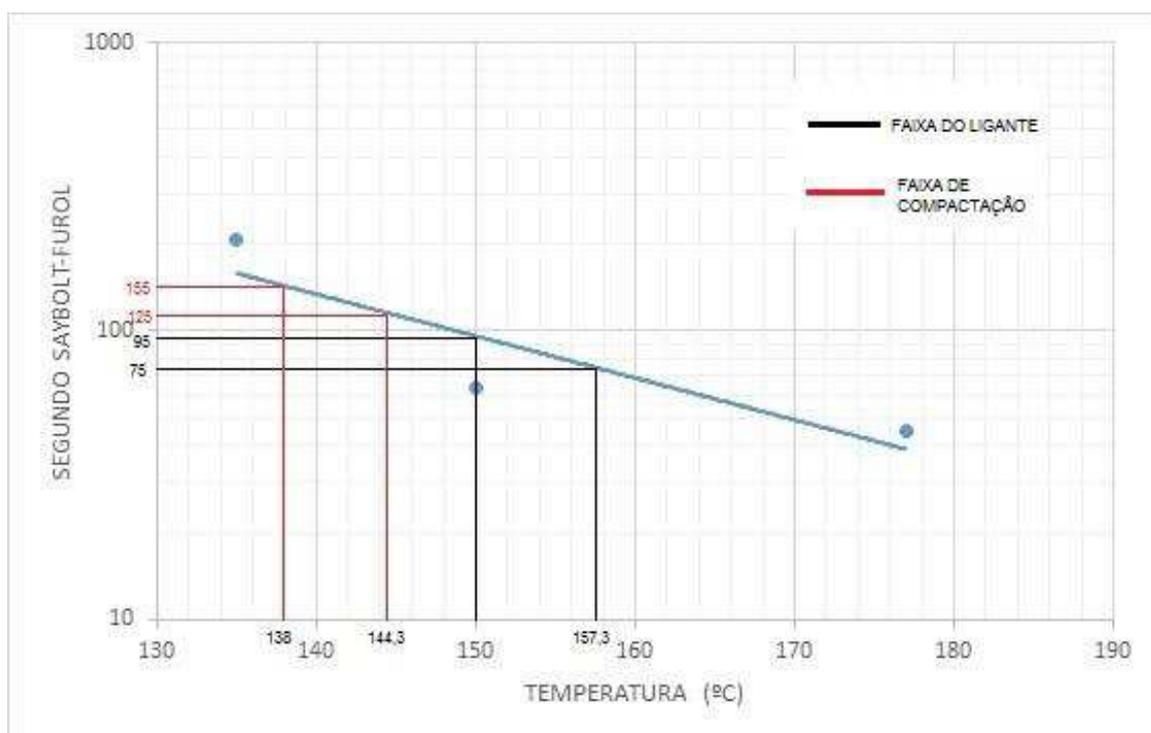
Fonte: GRECA Asfaltos (2015).

A tabela 6 foi gerada a partir dos dados do apêndice C.

4.2.1 Determinação das temperaturas de mistura a partir da viscosidade Saybolt-Furol

Para a determinação das temperaturas da mistura CAUQ-REF foi utilizado o método do viscosímetro Saybolt-Furol, descrito no capítulo anterior. A partir da curva gerada por esse ensaio, são definidas as temperaturas de acordo com intervalos de valores fixos da norma para SSF, são eles: 125 a 155 SSF para temperatura de compactação; 75 a 95 SSF para a temperatura do ligante. Para os agregados adotou-se a temperatura de 10°C acima da temperatura do ligante, o gráfico a seguir exibe o resultado do ensaio:

Gráfico 6 – Resultado do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol.



Fonte: Própria do autor (2016).

Assim foram determinadas as temperaturas de mistura para a mistura CAUQ-REF, sendo elas: 155°C para o ligante; 165°C para os agregados; 140°C para a compactação, conforme apresentado na tabela 2. O gráfico 6 foi gerado a partir dos resultados contidos no apêndice C, que se encontra no final deste trabalho.

Para a mistura CAUQ-B, que utiliza ECOFLEX B, não foi possível a obtenção das temperaturas de mistura, como comentado no capítulo 3. De acordo com o fabricante as temperaturas são: 175°C para o ligante; 183°C para os agregados; 175°C para a compactação. Para mais informações consultar o anexo B.

4.3 Enquadramento Granulométrico das misturas CAUQ-REF e CAUQ-B

Após todos os ensaios de caracterização dos agregados e dos ligantes, foi realizado a mistura desses agregados com traço que enquadrou na faixa B das normas DNIT-ES 031/2006 e DNIT-ES 113/2009. A tabela a seguir mostra os resultados obtidos:

Tabela 7 – Resultado do enquadramento granulométrico dos agregados na faixa B.

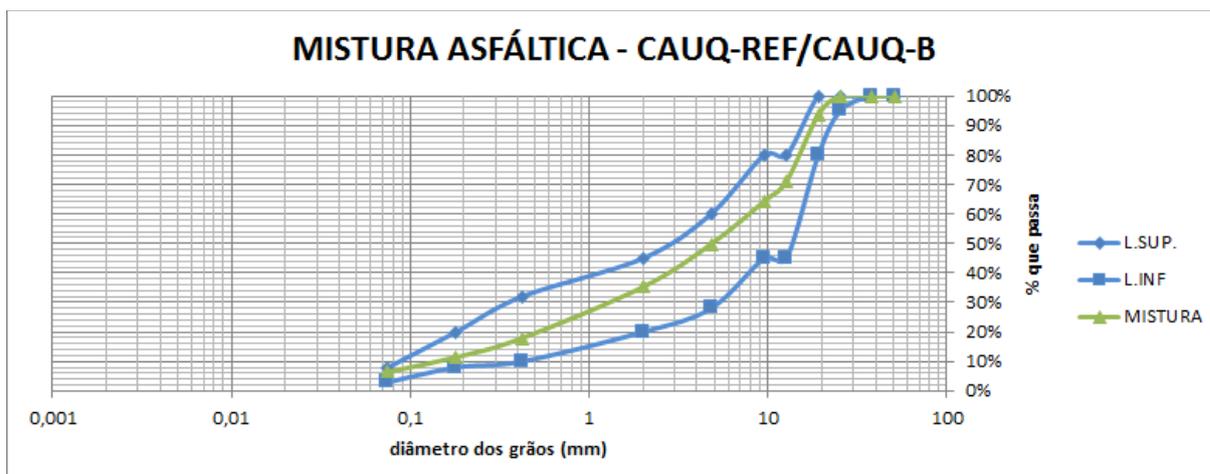
Nº #	PENEIR A (MM)	CAUQ-REF/CAUQ-B							LIMITE DESEJÁVEL	RESULTADO DA MISTURA	
		% QUE PASSA					FAIXA				
		B1	B0	PÓ DE BRITA	AREIA	FILER	LIMITE DA FAIXA				
2"	50,8	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100%	100%	100,00%	100,00%
1 ½"	38,1	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100%	100%	100,00%	100,00%
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	95%	100%	97,50%	100,00%
¾"	19,1	80,24%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	80%	100%	90,00%	93,68%
½"	12,7	10,58%	99,30%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	45%	80%	62,50%	71,22%
3/8"	9,5	1,19%	83,23%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	45%	80%	62,50%	64,36%
Nº 4	4,8	0,81%	24,15%	99,36%	99,93%	100,00%	100,00%	28%	60%	44,00%	49,81%
Nº 10	2	0,80%	5,82%	72,75%	99,61%	100,00%	100,00%	20%	45%	32,50%	35,27%
Nº 40	0,42	0,75%	3,32%	30,30%	88,98%	99,80%	100,00%	10%	32%	21,00%	17,89%
Nº 80	0,18	0,61%	2,55%	26,63%	8,57%	99,55%	100,00%	8%	20%	14,00%	11,44%
Nº 200	0,075	0,42%	1,78%	15,19%	2,21%	99,00%	100,00%	3%	8%	5,50%	6,47%
	TRAÇO	32,00%	24,00%	38,00%	6,00%	0,00%					100,00%

Fonte: Própria do autor (2016).

O enquadramento foi feito através do programa Excel, utilizando a ferramenta *solver*, e o ajustamento manual. O traço final das misturas foi: B1= 32%; B0= 24%; Pó de brita= 38%; Areia= 6%. Não houve a necessidade de utilizar fíler.

O gráfico a seguir mostra a curva granulométrica da mistura final e os limites da faixa B:

Gráfico 7 – Resultado das misturas de acordo com a faixa B do DNIT.



4.4 Resultados das misturas asfálticas CAUQ-REF e CAUQ-B

Nesse item apresentam-se os resultados das misturas asfálticas, para a dosagem Marshall, a estabilidade Marshall, a resistência à tração, o teor de ligante ótimo e o desgaste cântabro, com o intuito de fazer uma comparação entre as misturas asfálticas estudadas.

4.4.1 Dosagem Marshall

A dosagem foi realizada para determinar o teor de ligante ótimo, os parâmetros volumétricos e as características mecânicas das misturas estudadas. Após cumprir todos os procedimentos descritos no capítulo 3, os parâmetros volumétricos obtidos, dos ensaios para as duas misturas, foram organizados em tabelas e gráficos que são mostrados a seguir:

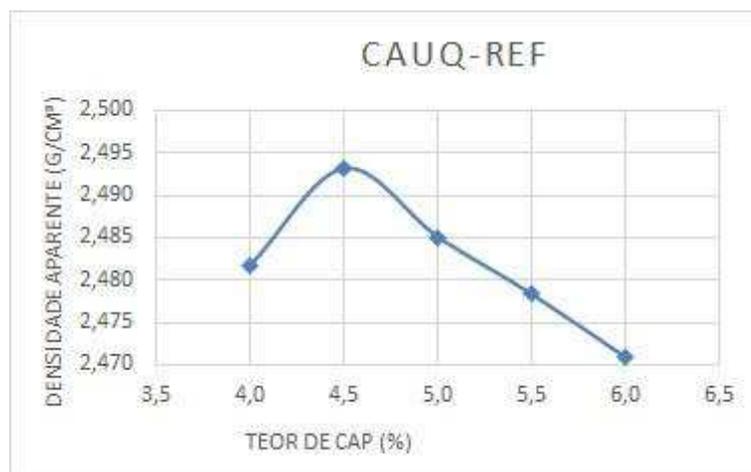
Tabela 8 – Resultado da dosagem Marshall para a mistura CAUQ-REF.

CAUQ-REF						
TEOR DE CAP (%)	Dap (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,0%	2,482	2,594	4,31%	9,64%	13,95%	69,09%
4,5%	2,493	2,574	3,11%	10,89%	14,00%	77,78%
5,0%	2,485	2,554	2,67%	12,06%	15,41%	81,88%

5,5%	2,478	2,534	2,18%	13,23%	15,41%	85,87%
6,0%	2,471	2,514	1,72%	14,39%	16,11%	89,33%
Limites da norma 031/2006	-		3 a 5	-	>13	75 a 82

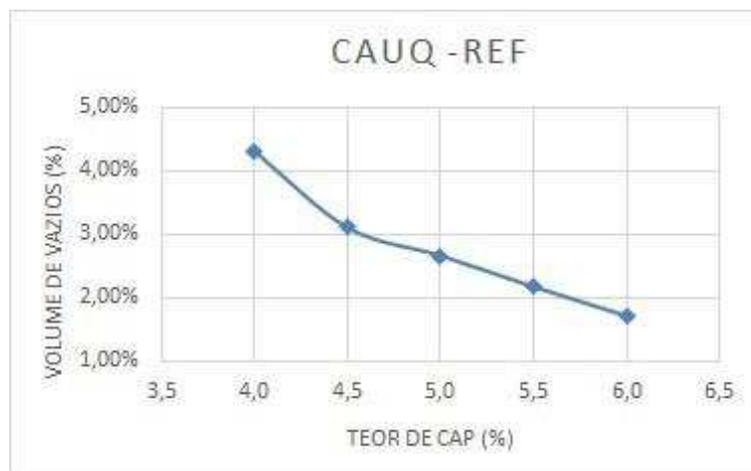
Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 8 – Densidade aparente x teor de CAP: CAUQ-REF.



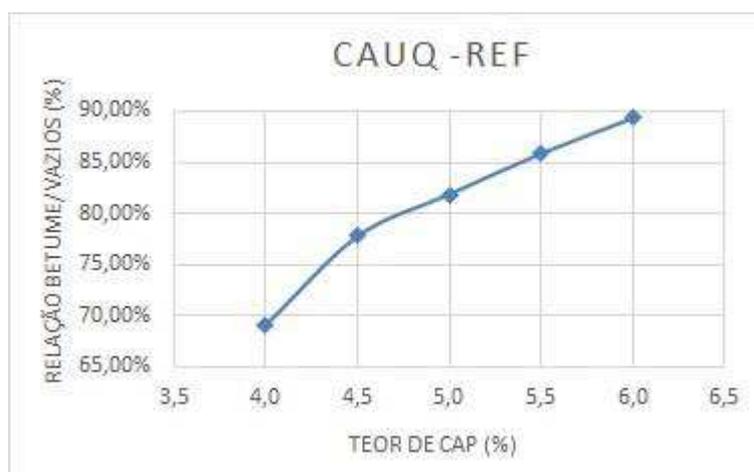
Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 9 – Volume de vazios x teor de CAP: CAUQ-REF.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 10 – Relação betume/vazios x teor de CAP: CAUQ-REF.



Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 9 – Resultado da dosagem Marshall para a mistura CAUQ-B.

CAUQ-B						
TEOR DE CAP (%)	Dap (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,0%	2,474	2,594	4,63%	9,60%	14,23%	67,47%
4,5%	2,488	2,573	3,32%	10,86%	14,18%	76,59%
5,0%	2,487	2,553	2,62%	12,06%	14,68%	82,15%
5,5%	2,471	2,534	2,47%	13,18%	15,66%	84,21%
6,0%	2,461	2,514	2,11%	14,32%	16,44%	87,14%
Limites da norma 112/2009	-		3 a 5	-	>10	65 a 78

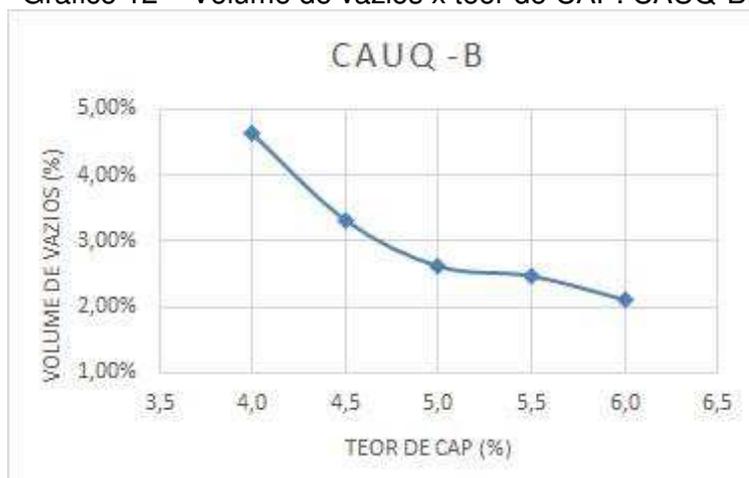
Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 11 – Densidade aparente x teor de CAP: CAUQ-B.



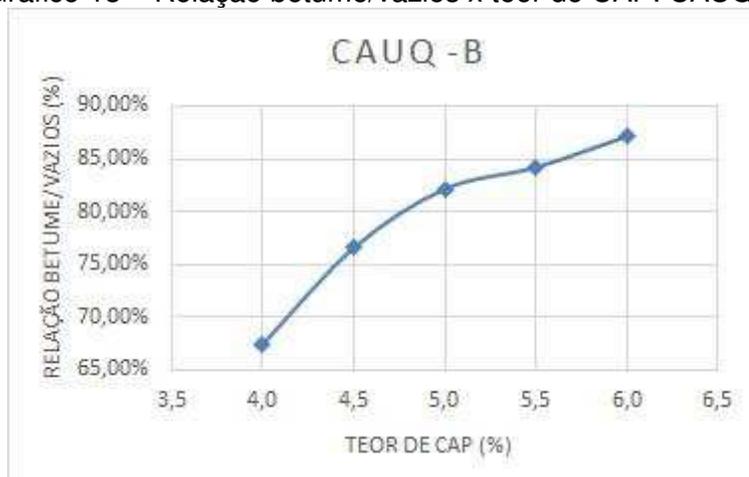
Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 12 – Volume de vazios x teor de CAP: CAUQ-B.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 13 – Relação betume/vazios x teor de CAP: CAUQ-B.



Fonte: Própria do autor (2016).

A partir dos resultados das duas misturas (CAUQ-REF e CAUQ-B), percebe-se que há pouca diferença nos seus parâmetros volumétricos e nas suas densidades. As tabelas 8 e 9 foram geradas a partir do apêndice E, que encontra-se no final deste trabalho.

Ressalta-se que os dados apresentados anteriormente correspondem a média dos resultados obtidos para cada teor de CAP.

4.4.2 Estabilidade Marshall

Os resultados foram obtidos a partir de 30 CP's, sendo 15 da mistura CAUQ-REF e 15 da mistura CAUQ-B. Para a realização dos ensaios, os CP's

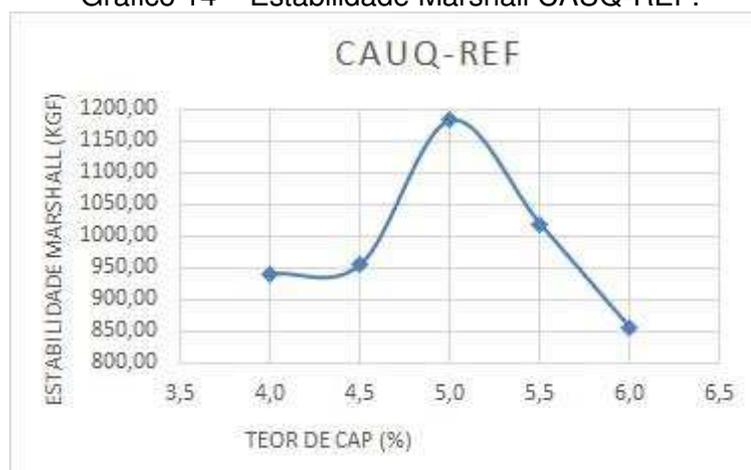
seguiram os procedimentos descritos no capítulo 3. Os resultados estão apresentados em formas de tabelas e gráficos, a seguir:

Tabela 10 – Estabilidade Marshall para as misturas asfálticas.

TEOR DE CAP (%)	ESTABILIDADE MARSHALL (kgf)		Parâmetros das normas DNIT-ES 112/2009 e DNIT-ES 031/2006
	CAUQ-REF	CAUQ-B	
4,00%	941,66	890,26	>500 Para CAUQ-REF e >800 Para CAUQ-B
4,50%	956,59	932,87	
5,00%	1183,41	964,71	
5,50%	1020,11	1028,13	
6,00%	856,67	1019,69	

Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 14 – Estabilidade Marshall CAUQ-REF.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 15 – Estabilidade Marshall CAUQ-B.



Fonte: Própria do autor (2016).

Para ambas as misturas, os valores de estabilidade Marshall ficaram acima do que é exigido pela norma. Vale ressaltar, que a mistura CAUQ-REF, que utilizou o CAP 50/70, apresentou valor mais elevados que a mistura CAUQ-B, que usou o ECOFLEX B.

4.4.3 Resistência à Tração

Os resultados foram obtidos a partir de 30 CP's, sendo 15 da mistura CAUQ-REF e 15 da mistura CAUQ-B. Para a realização dos ensaios, os CP's seguiram os procedimentos descritos no capítulo 3. Os resultados estão apresentados em formas de tabelas e gráficos, a seguir:

Tabela 11 – Resistência à tração para as misturas asfálticas.

TEOR DE CAP (%)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)		Parâmetros das normas DNIT-ES 112/2009 e DNIT-ES 031/2006
	CAUQ-REF	CAUQ-B	
4,00%	0,80	0,63	>0,65 Para CAUQ-REF e >0,75 Para CAUQ-B
4,50%	0,81	0,76	
5,00%	0,84	0,79	
5,50%	0,76	0,76	
6,00%	0,58	0,62	

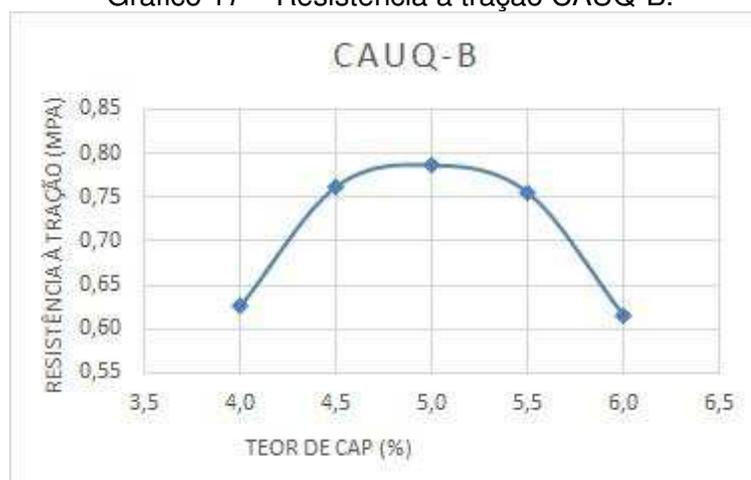
Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 16 – Resistência à tração CAUQ-REF.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 17 – Resistência à tração CAUQ-B.



Fonte: Própria do autor (2016).

As tabelas 10 e 11 foram geradas a partir do apêndice F, que se encontra no fim deste trabalho.

Para a mistura CAUQ-REF, apenas os CP's com 6% de CAP 50/70 não conseguiu atingir o valor mínimo exigido por norma. Já para a mistura CAUQ-B, os CP'S com 4 e 6% de ECOFLEX B não conseguiram atingir o valor mínimo da norma. Vale ressaltar, que, no geral, a mistura CAUQ-REF apresentou valor mais elevados que a mistura CAUQ-B.

4.4.4 Determinação do teor ótimo de ligante para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B e análise dos seus resultados

De acordo com Bernucci et al (2006), a determinação do teor ótimo de ligante pode ser obtida a partir de 3 métodos distintos:

1. A partir do Vv 4%;
2. A partir das médias de Vv 4%, estabilidade máxima e densidade aparente máxima;
3. A partir de gráficos contendo Vv e RBV.

Inicialmente tentou-se o método em que se adota o teor de ligante equivalente a 4% de volume de vazios. Entretanto, para as duas misturas o teor ótimo ficou abaixo do recomendado pelas normas DNIT-ES 031/2006 e DNIT-ES

112/2009. Então, nesse trabalho, foi utilizado o método que leva em conta a média dos três teores correspondentes, respectivamente, ao volume de vazios 4%, estabilidade Marshall máxima e densidade aparente máxima.

4.4.4.1 Resultados para mistura CAUQ-REF

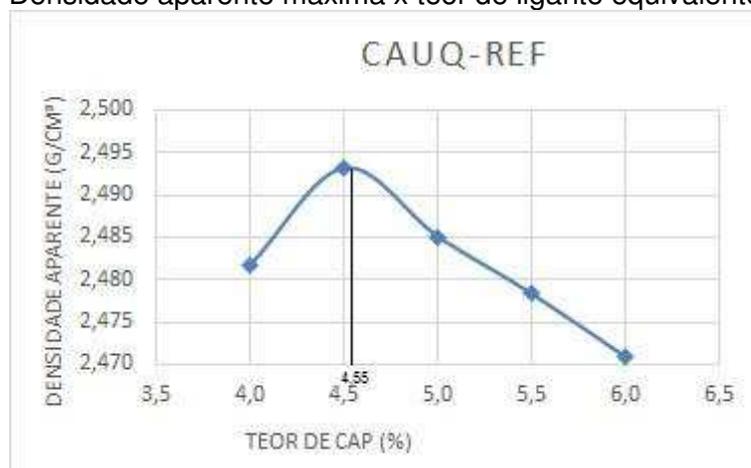
O teor ótimo para a mistura CAUQ-REF, foi obtido a partir da média dos teores correspondentes à volume de vazios 4%, estabilidade Marshall máxima e densidade aparente máxima. Os gráficos a seguir apresentam os teores correspondentes:

Gráfico 18 – Volume de vazios 4% x teor de ligante equivalente: CAUQ-REF.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 19 – Densidade aparente máxima x teor de ligante equivalente: CAUQ-REF.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 20 – Estabilidade Marshall máxima x teor de ligante equivalente: CAUQ-REF.



Fonte: Própria do autor (2016).

Assim o teor de ligante ótimo para a mistura CAUQ-REF foi de aproximadamente 4,6%, ficando acima do que é recomendado pela norma. Para esse teor de CAP, foram confeccionados novos CP's para a mistura de CAUQ-REF. Os resultados obtidos para os parâmetros volumétricos, estabilidade Marshall e resistência à tração são expressos nas tabelas a seguir:

Tabela 12 – Resultados da mistura CAUQ-REF.

RESULTADOS MISTURA CAUQ-REF		
	MISTURA CAUQ-REF	Parâmetros da norma DNIT-ES 031/2006
TEOR DE LIGANTE (%)	4,60	4,5 a 7,0
ESTABILIDADE MARSHALL (kgf)	1002,18	>500
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)	0,82	>0,65
Dap (g/cm³)	2,483	-
Vv (%)	3,35%	3 a 5
VCB (%)	11,09%	-
VAM (%)	14,44%	>13
RBV (%)	76,80%	75 a 82

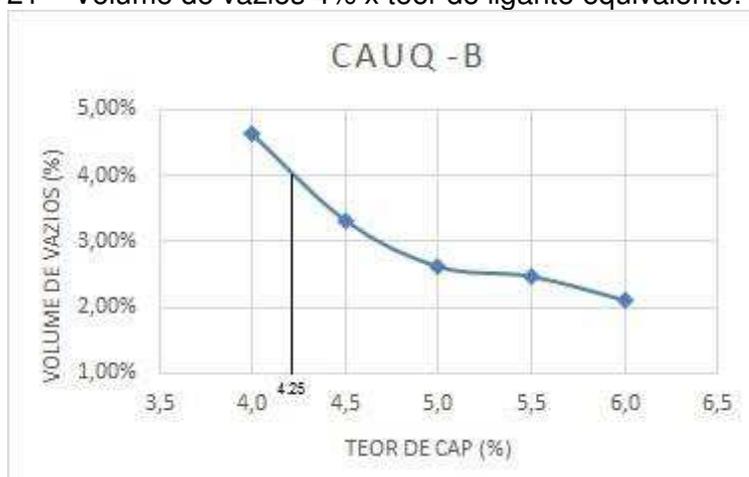
Fonte: Própria do autor (2016).

A mistura apresentou bons resultados, ou seja, todos os parâmetros exigidos por norma foram atendidos.

4.4.4.2 Resultados para mistura CAUQ-B

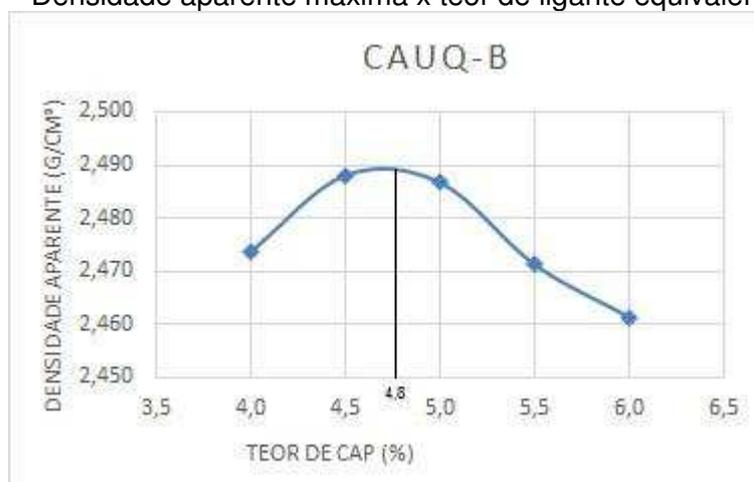
De forma semelhante à mistura CAUQ-REF, o teor ótimo para a mistura CAUQ-B, foi obtido a partir da média dos teores correspondentes à volume de vazios 4%, estabilidade Marshall máxima e densidade aparente máxima. Os gráficos a seguir apresentam os teores correspondentes:

Gráfico 21 – Volume de vazios 4% x teor de ligante equivalente: CAUQ-B.



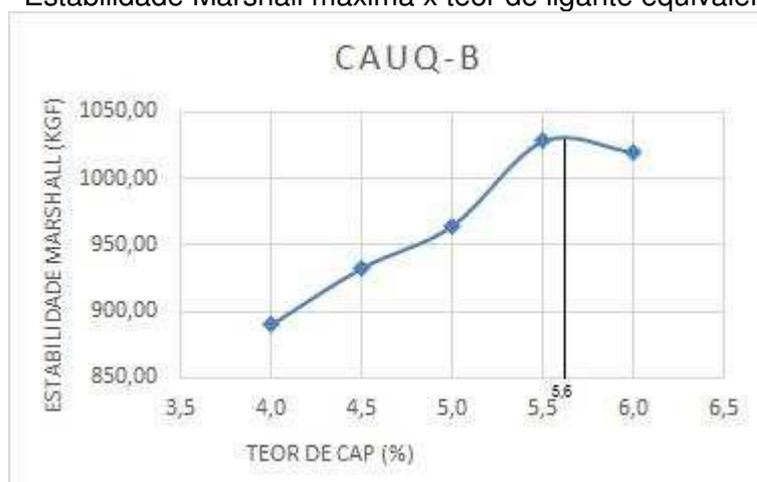
Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 22 – Densidade aparente máxima x teor de ligante equivalente: CAUQ-B.



Fonte: Própria do autor (2016).

Gráfico 23 – Estabilidade Marshall máxima x teor de ligante equivalente: CAUQ-B.



Fonte: Própria do autor (2016).

Assim o teor de ligante ótimo para a mistura CAUQ-B foi de aproximadamente 4,9%, ficando acima do que é recomendado pela norma. Também foram confeccionados novos CP's para esse teor de CAP. Os resultados obtidos para os parâmetros volumétricos, estabilidade Marshall e resistência à tração são expressos nas tabelas a seguir:

Tabela 13 – Resultados da mistura CAUQ-B.

RESULTADOS MISTURA CAUQ-B		
	MISTURA CAUQ-B	Parâmetros da norma DNIT-ES 112/2009
TEOR DE LIGANTE (%)	4,90	4,5 a 7,0
ESTABILIDADE MARSHALL (kgf)	959,99	>800
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)	0,78	>0,75
Dap (g/cm³)	2,471	-
Vv (%)	3,39%	3 a 5
VCB (%)	11,74%	-
VAM (%)	15,13%	>10
RBV (%)	77,62%	65 a 78

Fonte: Própria do autor (2016).

As tabelas 12 e 13 foram geradas a partir dos apêndices E e F, que se encontram no final deste trabalho. A mistura apresentou bons resultados, ou seja, todos os parâmetros exigidos por norma foram atendidos.

4.4.5 Desgaste cântabro

O desgaste cântabro foi realizado para os teores ótimos das misturas CAUQ-REF e CAUQ-B. Os resultados estão apresentados na tabela e na figura a seguir:

Tabela 14 – Resultados do desgaste cântabro para as misturas asfálticas.

DESGASTE CÂNTABRO			
	PROCESSO DA NORMA	PROCESSO DE ENVELHECIMENTO	
CAUQ-REF			
	CP-1	CP-2	CP-3
DESGASTE CÂNTABRO (%)	4,47%	9,54%	7,49%
CAUQ-B			
	CP-1	CP-2	CP-3
DESGASTE CÂNTABRO (%)	3,48%	4,59%	4,84%

Fonte: Própria do autor (2016).

Figura 51 – Resultado desgaste cântabro.



Fonte: Própria do autor (2016).

Como pode-se notar, os CP's que foram ensaiados de acordo com a norma apresentaram desgaste muito parecido, mesmo assim a mistura CAUQ-B se mostrou mais resistente. Já para os CP's que sofrem os processos de envelhecimentos descritos neste trabalho, no capítulo 3, mostraram que a mistura CAUQ-B é mais resistente do que a mistura CAUQ-REF, isso se deu pelo fato da utilização do ECOFLEX B (asfalto borracha) substituindo o CAP 50/70. A tabela 14 foi elaborada de acordo com os dados do apêndice F, que se encontra no final deste trabalho.

Após os resultados obtidos para as misturas asfálticas, pode-se notar que a mistura CAUQ-REF apresentou características mecânicas um pouco superior a mistura CAUQ-B. Quanto ao teor ótimo, a mistura CAUQ-REF apresentou quantidade inferior, o que significa menor custo. Tem-se pela bibliografia pesquisada o alto desempenho e durabilidade que o asfalto borracha proporciona a mistura asfáltica, o que fica demonstrado pelo resultado do desgaste Cântabro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos pouco mais de 1,7 milhões de quilômetros de rodovias por todo nosso país, apenas 12,4% são pavimentadas, o que nos remete a uma grande carência de investimentos para alcançar números melhores. Devido aos fatos, faz-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas de pavimentação, e o aprimoramento das existentes com o objetivo de construir rodovias que apresentem maior durabilidade e qualidade.

O asfalto borracha vem como uma ótima solução, formado a partir da incorporação de borracha triturada de pneus inservíveis, apresentando virtudes como a reutilização de pneus, redução da emissão de poluentes e maior durabilidade do revestimento.

Os materiais utilizados na pesquisa foram devidamente caracterizados, apresentando ótimos resultados para sua utilização na pavimentação asfáltica. Salvo a adesividade do ligante asfáltico aos agregados graúdos que se mostrou insatisfatória, sendo recomendado a utilização de aditivo com função de melhorar essa adesividade.

A granulometria das misturas utilizadas ficou enquadrada na faixa B do DNIT de forma correta, entretanto houve um pouco de dificuldade para conseguir o enquadramento nas peneiras menores, o que resultou numa grande quantidade de pó de brita utilizado.

A caracterização do CAP 50/70 foi toda feita no LSP, podendo então obter-se parâmetros importantes como as temperaturas de mistura e o ponto de amolecimento do ligante. Para o ECOFLEX B não se realizou a caracterização, tendo em vista que o próprio fabricante a fez e emitiu seu relatório com todas as suas informações necessárias. Infelizmente, não foi possível a determinação das temperaturas de mistura para o ECOFLEX B no LSP, devido à falta de condições para a utilização do viscosímetro Brookfield, então essas temperaturas foram obtidas com o fabricante.

A dosagem Marshall dos CP's possibilitou a determinação de todos os parâmetros volumétricos da mistura, o teor de ligante ótimo e as propriedades mecânicas das misturas. Para a determinação do teor ótimo, ressalta-se a utilização

do método que leva em conta o volume de vazios, a estabilidade Marshall e a densidade aparente.

Ambas as misturas apresentaram ótimos resultados, todos dentro da faixa que é estabelecido por norma, desde os parâmetros volumétricos até a estabilidade Marshall e a resistência à tração.

O ponto mais importante, na concepção do autor, foi o desgaste cântabro, pois a partir dos procedimentos realizados para a obtenção dos resultados pode-se comprovar que a mistura que utilizou o asfalto borracha teve melhores resultados, comprovando que revestimentos que utilizam o asfalto borracha são mais resistentes e duráveis.

O estudo comparou dois tipos de misturas, com ligante diferentes, com o objetivo de mostrar que o asfalto borracha deve ser mais utilizado no país, e principalmente no nosso estado, tendo em vista que a qualidade das nossas estradas são precárias e necessitam de uma alternativa melhor.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

1. Utilização da dosagem SUPERPAVE e realização de novas comparações entre as misturas;
2. Realização de ensaios de envelhecimento de ligante, no CAP 50/70 e no ECOFLEX B;
3. Desenvolvimento e aprimoramento do método de envelhecimento dos CP's antes do ensaio de desgaste cântabro.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TÉCNICAS. **NBR 14950**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

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

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

BALBO, J. T. **Pavimentos Asfálticos**: patologias e manutenção. 1. ed. São Paulo: Editora Plêiade, São Paulo, 1997.

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. **Portaria DNC nº. 5**. Brasília: ANP, 1993.

_____. **Resolução ANP nº. 19**. Brasília: ANP, 2005.

_____. **Resolução ANP nº. 39**. Brasília: ANP, 2008.

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

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

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

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

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 193:** Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e da massa específica. Rio de Janeiro, DNER, 1996.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, DNER, 1997.

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

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

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

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 194:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, DNER, 1998.

_____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 383:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero–ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, DNER, 1999.

_____. Departamento Nacional de Infra-Estrutura 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, 2006a.

_____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031/2006 - ES:** Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

_____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 112**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2009.

_____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 131**: Ponto de amolecimento: método anel e bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

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

_____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 155**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Ensaio de penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

_____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Transporte Rodoviário**. 2014. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/transporte-rodoviario-relevancia.html>>. Acesso em: 09 dez. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 258/99**, de 26 de agosto de 1999. In: Resoluções, 1999. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Relatório técnico 30**: Perfil de brita para construção civil. Distrito Federal, 2009.

FATOS & Asfaltos. Araucária: Greca Asfaltos, v. 11, n. 26, abr. 2014. Quadrimestral. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_26.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2016.

_____. Araucária: Greca Asfaltos, v. 6, n. 19, dez. 2009. Trimestral. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_19.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.

FAXINA, Adalberto Leandro. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante do tipo asfalto-borracha**. 2002. 338f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho/universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

GIULIO, Gabriela di. **Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto**. 2007. Disponível em: <http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942007000300008&lng;=&nrm=iso>. Acesso em: 16 jan. 2016.

GRECA Asfaltos. **Conheça a história de pioneirismo do Asfalto-Borracha no Brasil**. 2012. Disponível em: <<http://www.asfaltoborracha.com.br/index.php/1-art-historia-asfalto-borracha-brasil>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

_____. **Descubra quais são as vantagens dos pavimentos com o Asfalto Ecológico: 3ª Geração ECOFLEX**. 2012. Disponível em: <<http://www.asfaltoborracha.com.br/index.php/3-art-vantagens-pavimentos-asfalto-borracha-ecologico>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

GRECO, J. A, S. **Notas de aula: conceitos básicos sobre pavimentação**. UFMG, 2012.

MASSARANDUBA, João Carlos. **Asfalto Ecológico na Usina Hidrelétrica de Itaipu**. 2009. Disponível em: <<http://www.grecaasfaltos.com.br/blogtecnico/index.php/9-blog-tec-artigos/18-blog-tec-asfalto-ecologico-usina-hidreletrica-hidroeletrica-de-itaipu>>. Acesso em: 09 jan. 2016.

ODA, Sandra. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2000. 251f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PAIM, Moacyr. **Reciclagem de pneus – Asfalto-Borracha**. 2012. Disponível em: <<http://stellaportal.com/wp/index.php/2012/07/24/reciclagem-de-pneus-asfalto-borracha/>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

PILATI, Fernanda. **Análise dos Efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de mistura asfálticas densas**. 2008. 637 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SANTOS, Gisele do R. C. Mugnol; MOLINA, Nilcemara Leal; DIAS, Vanda Fattori. **Orientações e dicas práticas para trabalhos acadêmicos**. Curitiba: Ibpex, 2007.

SENÇO, Wlastermiler de. 1929. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume 1 /Wlastermiler de Senço. 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 279 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SPT Sondagens. **DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS**. 2015. Disponível em: <<http://www.sptsondagens.com.br/servicos?servico=dimensionamento>>. Acesso em: 13 jan. 2016.

APÊNCIDE A – RESULTADO DAS GRANULOMETRIAS DOS AGREGADOS

Tabela 15 – Granulometria brita 1.

BRITA 1		AMOSTRA = 1898,2g	
Nº #	PENEIRA (MM)	PESO RETIDO ACUMULADO (g)	% QUE PASSA
2"	50,8	0	100,00%
1 ½"	38,1	0	100,00%
1"	25,4	0	100,00%
¾"	19,1	375,1	80,24%
½"	12,7	1697,3	10,58%
⅜"	9,5	1875,6	1,19%
Nº 4	4,8	1882,8	0,81%
Nº 10	2	1883	0,80%
Nº 40	0,42	1884	0,75%
Nº 80	0,18	1886,7	0,61%
Nº 200	0,075	1890,2	0,42%
FUNDO		1895,9	

Fonte: Própria do autor (2016)

Tabela 16 – Granulometria brita 0.

BRITA 0		AMOSTRA = 1590,5g	
Nº #	PENEIRA (MM)	PESO RETIDO ACUMULADO (g)	% QUE PASSA
2"	50,8	0	100,00%
1 ½"	38,1	0	100,00%
1"	25,4	0	100,00%
¾"	19,1	0	100,00%
½"	12,7	11,1	99,30%
⅜"	9,5	266,7	83,23%
Nº 4	4,8	1206,4	24,15%
Nº 10	2	1498,0	5,82%
Nº 40	0,42	1537,7	3,32%
Nº 80	0,18	1550,0	2,55%
Nº 200	0,075	1562,2	1,78%
FUNDO		1583,5	

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 17 – Granulometria pó de brita.

PÓ DE BRITA		AMOSTRA = 1568g	
Nº #	PENEIRA (MM)	PESO RETIDO ACUMULADO (g)	% QUE PASSA
2"	50,8	0	100,00%
1 1/2"	38,1	0	100,00%
1"	25,4	0	100,00%
3/4"	19,1	0	100,00%
1/2"	12,7	0	100,00%
3/8"	9,5	0	100,00%
Nº 4	4,8	10,1	99,36%
Nº 10	2	427,3	72,75%
Nº 40	0,42	1092,9	30,30%
Nº 80	0,18	1150,5	26,63%
Nº 200	0,075	1329,8	15,19%
FUNDO		1563,7	

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 18 – Granulometria areia.

AREIA		AMOSTRA = 1448,6g	
Nº #	PENEIRA (MM)	PESO RETIDO ACUMULADO (g)	% QUE PASSA
2"	50,8	0	100,00%
1 1/2"	38,1	0	100,00%
1"	25,4	0	100,00%
3/4"	19,1	0	100,00%
1/2"	12,7	0	100,00%
3/8"	9,5	0	100,00%
Nº 4	4,8	1,0	99,93%
Nº 10	2	5,7	99,61%
Nº 40	0,42	159,7	88,98%
Nº 80	0,18	1324,4	8,57%
Nº 200	0,075	1416,6	2,21%
FUNDO		1445,0	

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 19 – Granulometria fíler.

FÍLER		AMOSTRA = 200,1g	
Nº #	PENEIRA (MM)	PESO RETIDO ACUMULADO (g)	% QUE PASSA
2"	50,8	0	100,00%
1 1/2"	38,1	0	100,00%
1"	25,4	0	100,00%
3/4"	19,1	0	100,00%
1/2"	12,7	0	100,00%
3/8"	9,5	0	100,00%
Nº 4	4,8	0	100,00%
Nº 10	2	0	100,00%
Nº 40	0,42	0,4	99,80%
Nº 80	0,18	0,9	99,55%
Nº 200	0,075	2,0	99,00%
FUNDO		195,3	

Fonte: Própria do autor (2016).

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Tabela 20 – Equivalente de areia para agregados miúdos.

EQUIVALENTE AREIA	
AREIA	
H1 (cm)	8,45
H2 (cm)	6,30
EA (%)	74,56%
PÓ DE BRITA	
H1 (cm)	8,25
H2 (cm)	5,75
EA (%)	69,70%

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 21 – Absorção agregados graúdos.

ABSORÇÃO AGREGADOS	
BRITA 1	
Ms (g)	1519,3
Mh (g)	1523,6
a1	0,283%
BRITA 0	
Ms (g)	1507,8
Mh (g)	1519
a0	0,743%

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 22 – Abrasão Los Angeles agregados graúdos.

ABRASÃO LOS ANGELES	
BRITA 1	
GRADUAÇÃO	A
M1	5000
M2	4117,8
RESULTADO	17,64%
BRITA 0	
GRADUAÇÃO	B
M1	5000
M2	4008,5
RESULTADO	19,83%

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 23 – Índice de forma brita 1.

ÍNDICE DE FORMA											
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	b/a	c/b	a (mm)	b (mm)	c (mm)	b/a	c/b	
1	27	18,7	16,6	0,69	0,89	101	32	19	9	0,59	0,47
2	36	22,3	12,1	0,62	0,54	102	28	17	15	0,61	0,88
3	33	21,1	19	0,64	0,90	103	24	17	20	0,71	1,18
4	35	25	19	0,71	0,76	104	20	21	20	1,05	0,95
5	29	19	17	0,66	0,89	105	27	22	14	0,81	0,64
6	29	25	21	0,86	0,84	106	33	19	14	0,58	0,74
7	40	25	15	0,63	0,60	107	34	20	13	0,59	0,65
8	29	18	15	0,62	0,83	108	35	23	11	0,66	0,48
9	28	20	14	0,71	0,70	109	25	19	14	0,76	0,74
10	29	20	18	0,69	0,90	110	26	16	9	0,62	0,56
11	34	24	14	0,71	0,58	111	22	17	9	5,32	0,08
12	27	18	14	0,67	0,78	112	28	23	15	0,82	0,65
13	25	20	15	0,80	0,75	113	23	18	15	0,78	0,83
14	28	20	18	0,71	0,90	114	21	16	15	0,76	0,94
15	24	17	16	0,71	0,94	115	29	17	8	0,59	0,47
16	24	20	14	0,83	0,70	116	21	18	15	0,86	0,83
17	25	18	13	0,72	0,72	117	23	18	15	0,78	0,83
18	28	18	10	0,64	0,56	118	25	26	15	1,04	0,58
19	26	17	8	0,65	0,47	119	31	17	19	0,55	1,12
20	24	20	16	0,83	0,80	120	23	16	14	0,70	0,88
21	25	20	16	0,80	0,80	121	22	18	16	0,82	0,89
22	27	20	8	0,74	0,40	122	30	21	9	0,70	0,43
23	33	22	11	0,67	0,50	123	31	24	18	0,77	0,75
24	28	28	18	1,00	0,64	124	24	22	5	0,92	0,23
25	25	23	15	0,92	0,65	125	35	23	9	0,66	0,39
26	25	23	13	0,92	0,57	126	22	16	14	0,73	0,88
27	34	25	18	0,74	0,72	127	31	28	5	0,90	0,18
28	27	17	14	0,63	0,82	128	27	20	13	0,74	0,65
29	30	15	11	0,50	0,73	129	27	21	19	0,78	0,90
30	28	22	15	0,79	0,68	130	28	18	14	0,64	0,78
31	27	25	18	0,93	0,72	131	28	21	15	0,75	0,71
32	28	18	11	0,64	0,61	132	21	19	12	0,90	0,63
33	29	27	17	0,93	0,63	133	31	19	20	0,61	1,05
34	36	18	7	0,50	0,39	134	34	22	22	0,65	1,00
35	25	19	17	0,76	0,89	135	37	23	9	0,62	0,39
36	25	20	17	0,80	0,85	136	32	15	23	0,47	1,53
37	33	27	15	0,82	0,56	137	30	23	11	0,77	0,48
38	22	20	11	0,91	0,55	138	27	18	7	0,67	0,39
39	25	15	14	0,60	0,93	139	26	18	11	0,69	0,61
40	40	13	8	0,33	0,62	140	28	17	9	0,61	0,53
41	38	13	11	0,34	0,85	141	27	20	13	0,74	0,65
42	27	21	13	0,78	0,62	142	34	14	8	0,41	0,57
43	28	18	17	0,64	0,94	143	20	20	16	1,00	0,80
44	32	23	17	0,72	0,74	144	27	23	17	0,85	0,74
45	29	19	16	0,66	0,84	145	30	17	13	0,57	0,76
46	24	17	10	0,71	0,59	146	22	20	11	0,91	0,55
47	26	17	11	0,65	0,65	147	25	20	7	0,80	0,35
48	19	16	15	0,84	0,94	148	25	18	13	0,72	0,72
49	26	19	11	0,73	0,58	149	27	18	10	0,67	0,56
50	25	22	12	12,00	0,55	150	29	24	17	0,83	0,71
51	28	22	15	0,79	0,68	151	21	15	13	0,71	0,87
52	33	20	12	0,61	0,60	152	29	19	19	0,66	1,00
53	25	23	12	0,92	0,52	153	30	20	10	0,67	0,50
54	29	25	15	0,86	0,60	154	20	16	14	0,80	0,88
55	35	17	11	0,49	0,65	155	30	15	5	0,50	0,33
56	27	22	18	0,81	0,82	156	22	15	13	0,68	0,87
57	27	18	15	0,67	0,83	157	20	17	15	0,85	0,88
58	22	20	19	0,91	0,95	158	28	21	5	0,75	0,24
59	33	20	13	0,61	0,65	159	25	21	12	0,84	0,57
60	27	17	13	0,63	0,76	160	29	23	14	0,79	0,61
61	25	20	16	0,80	0,80	161	29	21	13	0,72	0,62
62	28	25	11	0,89	0,44	162	22	21	13	0,95	0,62
63	26	16	14	0,62	0,88	163	22	20	18	0,91	0,90
64	31	27	10	0,87	0,37	164	26	20	15	0,77	0,75
65	23	20	19	0,87	0,95	165	32	17	13	0,53	0,76
66	31	16	11	0,52	0,69	166	23	16	13	0,70	0,81
67	30	27	16	0,90	0,59	167	35	15	8	0,43	0,53
68	32	22	7	0,69	0,32	168	35	18	14	0,51	0,78
69	28	20	10	0,71	0,50	169	30	17	11	0,57	0,65
70	29	20	15	0,69	0,75	170	26	25	21	0,96	0,84
71	27	18	13	0,67	0,72	171	31	20	7	0,65	0,35
72	24	18	14	0,75	0,78	172	29	19	9	0,66	0,47
73	28	23	9	0,82	0,39	173	27	21	9	0,78	0,43
74	24	14	10	0,58	0,71	174	30	20	17	0,67	0,85
75	21	21	20	1,00	0,95	175	27	21	10	0,78	0,48
76	25	16	11	0,64	0,69	176	30	20	17	0,67	0,85
77	28	18	16	0,64	0,89	177	22	24	14	1,09	0,58
78	21	20	10	0,95	0,50	178	30	18	18	0,60	1,00
79	23	16	13	0,70	0,81	179	21	19	15	0,90	0,79
80	22	20	13	0,91	0,65	180	28	15	6	0,54	0,40
81	25	20	18	0,80	0,90	181	21	20	20	0,95	1,00
82	32	21	6	0,66	0,29	182	26	23	19	0,88	0,83
83	28	20	15	0,71	0,75	183	24	18	11	0,75	0,61
84	25	14	11	0,56	0,79	184	29	18	11	0,62	0,61
85	25	20	7	0,80	0,35	185	30	19	10	0,63	0,53
86	25	20	6	0,80	0,30	186	26	20	7	0,77	0,35
87	26	15	11	0,58	0,73	187	24	13	13	0,54	1,00
88	28	15	11	0,54	0,73	188	31	22	13	0,71	0,59
89	23	17	14	0,74	0,82	189	37	16	8	0,43	0,50
90	21	15	15	0,71	1,00	190	32	32	7	1,00	0,22
91	38	26	11	0,68	0,42	191	32	19	7	0,59	0,37
92	23	20	14	0,87	0,70	192	28	17	11	0,61	0,65
93	29	23	10	0,79	0,43	193	19	17	15	0,89	0,88
94	22	13	11	0,59	0,85	194	31	23	16	0,74	0,70
95	23	17	8	0,74	0,47	195	31	23	16	0,74	0,70
96	34	15	9	0,44	0,60	196	35	18	16	0,51	0,89
97	32	18	14	0,56	0,78	197	28	22	6	0,79	0,27
98	29	24	17	0,83	0,71	198	31	16	15	0,58	0,83
99	27	16	18	0,59	1,13	199	32	14	14	0,44	1,00
100	24	22	8	0,92	0,36	200	25	20	13	0,80	0,65
RESULTADOS											
MÉDIA b/a		0,78									
MÉDIA c/b		0,69									

Fonte: Própria do autor (2016).

APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Tabela 24 – Penetração ligantes asfálticos.

PENETRAÇÃO	
CAP 50/70	
1º ENSAIO	
Li (0,1mm)	108
Lf (0,1mm)	165
RESULTADO	56
2º ENSAIO	
Li (0,1mm)	227
Lf (0,1mm)	287
RESULTADO	60
3º ENSAIO	
Li (0,1mm)	204
Lf (0,1mm)	262
RESULTADO	58
RESULTADO FINAL	58
ASFALTO BORRACHA	
RESULTADO	49,5

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 25 – Ponto de amolecimento ligantes asfálticos.

PONTO DE AMOLECIMENTO	
CAP 50/70	
T (°C)	56
ASFALTO BORRACHA	
T (°C)	57

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 26 – Viscosidade Saybolt-Furol CAP 50/70.

VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL	
TEMPERATURA (°C)	SEGUNDO SAYBOLT-FUROL (SSF)
135	206
150	64
177	45

Fonte: Própria do autor (2016).

APÊNDICE D – MASSA ESPECÍFICA DOS MATERIAIS

Tabela 27 – Massa específica dos materiais da pesquisa.

AREIA	
FRASCO CHAPMAN	
L (mm)	389
D.A (g/cm ³)	2,646
PÓ DE BRITA	
FRASCO CHAPMAN	
L (mm)	380
D.PO (g/cm ³)	2,778
BRITA 1	
PESAGEM HIDROSTÁTICA	
Ps (g)	1115
V (cm ³)	401,5
D.B1 (g/cm ³)	2,777
BRITA 0	
PESAGEM HIDROSTÁTICA	
Ps (g)	1081,7
V (cm ³)	389,7
D.B0 (g/cm ³)	2,776
FÍLER	
FRASCO LE CHATELIER	
Ps (g)	60
Vi (cm ³)	0,4
Vf (cm ³)	20,9
D.F (g/cm ³)	2,927
CAP 50/70	
D.CAP (g/cm ³)	1,03
ASFALTO BORRACHA	
D.AB (g/cm ³)	1,031

Fonte: Própria do autor (2016).

APÊNDICE E – RESULTADOS DA DOSAGEM MARSHALL

Tabela 28 – Correção do traço das misturas de acordo com a % de ligante.

CORREÇÃO DO TRAÇO DE ACORDO COM A % DE LIGANTE					PESO DOS COMPONENTES DA MISTURA (g)					
% DE LIGANTE	B1	B0	PÓ DE BRITA	AREIA	LIGANTE	B1	B0	PÓ DE BRITA	AREIA	PESO DO CP
4,00%	30,72%	23,04%	36,48%	5,76%	48	368,64	276,48	437,76	69,12	1200
4,50%	30,56%	22,92%	36,29%	5,73%	54	366,72	275,04	435,48	68,76	1200
5,00%	30,40%	22,80%	36,10%	5,70%	60	364,8	273,6	433,2	68,4	1200
5,50%	30,24%	22,68%	35,91%	5,67%	66	362,88	272,16	430,92	68,04	1200
6,00%	30,08%	22,56%	35,72%	5,64%	72	360,96	270,72	428,64	67,68	1200
4,60%	30,53%	22,90%	36,25%	5,72%	55,2	366,34	274,75	435,02	68,688	1200
4,90%	30,43%	22,82%	36,14%	5,71%	58,8	365,18	273,89	433,66	68,472	1200

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 29 – Dosagem Marshall para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B.

DOSAGEM MARSHALL CAUQ-REF/CAUQ-B						
CAP 4%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
Ps (g)	1192,1	1190	1185,5	1171	1181,5	1157,1
V (cm³)	488,2	475,8	473,6	473,1	472,4	473,2
Dap (g/cm³)	2,442	2,500	2,503	2,475	2,501	2,445
Dap (g/cm³)	2,482			2,474		
DTM (g/cm³)	2,59			2,59		
Vv (%)	0,04			0,05		
VCB (%)	0,10			0,10		
VAM (%)	0,14			0,14		
RBV (%)	0,69			0,67		
CAP 4,5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
Ps (g)	1182,5	1185	1190,9	1189,8	1179,3	1192,1
V (cm³)	479,7	470,9	476,8	478,5	477,8	475
Dap (g/cm³)	2,465	2,517	2,498	2,487	2,468	2,510
Dap (g/cm³)	2,493			2,488		
DTM (g/cm³)	2,57			2,57		
Vv (%)	0,03			0,03		
VCB (%)	0,11			0,11		
VAM (%)	0,14			0,14		
RBV (%)	0,78			0,77		
CAP 5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
Ps (g)	1185,7	1189	1182,8	1186,1	1186,7	1189,8
V (cm³)	480	471,2	480,6	479,2	477,2	476,3
Dap (g/cm³)	2,470	2,524	2,461	2,475	2,487	2,498
Dap (g/cm³)	2,485			2,487		
DTM (g/cm³)	2,55			2,55		
Vv (%)	0,03			0,03		
VCB (%)	0,12			0,12		
VAM (%)	0,15			0,15		
RBV (%)	0,82			0,82		
CAP 5,5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
Ps (g)	1188	1186	1176,5	1170,7	1180,1	1173,6
V (cm³)	476,4	478,6	477,7	475,8	473,6	476,8
Dap (g/cm³)	2,494	2,478	2,463	2,460	2,492	2,461
Dap (g/cm³)	2,478			2,471		
DTM (g/cm³)	2,53			2,53		
Vv (%)	0,02			0,02		
VCB (%)	0,13			0,13		
VAM (%)	0,15			0,16		
RBV (%)	0,86			0,84		
CAP 6%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
Ps (g)	1181,7	1182	1180,5	1186	1184	1189
V (cm³)	478,2	479,4	476,8	479,4	484,6	482
Dap (g/cm³)	2,471	2,466	2,476	2,474	2,443	2,467
Dap (g/cm³)	2,471			2,461		
DTM (g/cm³)	2,51			2,51		
Vv (%)	0,02			0,02		
VCB (%)	0,14			0,14		
VAM (%)	0,16			0,16		
RBV (%)	0,89			0,87		
TEOR ÓTIMO DE LIGANTE						
	CAUQ-REF (4,6%)			CAUQ-B (4,9%)		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
Ps (g)	1184,2	1186	1184,8	1188,2	1184,8	1183,7
V (cm³)	475,7	479,8	476,2	480,3	479,8	479,3
Dap (g/cm³)	2,489	2,472	2,488	2,474	2,469	2,470
Dap (g/cm³)	2,483			2,471		
DTM (g/cm³)	2,57			2,56		
Vv (%)	0,03			0,03		
VCB (%)	0,11			0,12		
VAM (%)	0,14			0,15		
RBV (%)	0,77			0,78		

Fonte: Própria do autor (2016).

APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESTABILIDADE MARSHALL, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DESGASTE CANTABRO

Tabela 30 – Estabilidade Marshall para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B.

CAP 4%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (mm)	59,6	61,6	60,5	63,7	64,1	65,2
h2 (mm)	59,9	61	59,6	66,9	64,1	65,6
h3 (mm)	61	61,3	59,8	65,8	62	66,3
h4 (mm)	60,2	61,4	60,2	61,4	63	67,7
hmed (mm)	60,175	61,325	60,025	64,45	63,3	66,2
F PRENSA	1	1	1	1	1	1
Fh	1,12	1,09	1,12	1,00	1,03	0,96
EM (kgf)	1052	893	1014	908	873	902
EM.C (kgf)	917,00	968,98	939,00	908,13	899,29	863,35
CAP 4,5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (mm)	63,1	60,6	61,7	61,4	61,9	62
h2 (mm)	64	60,9	62,2	61,6	63,4	62
h3 (mm)	64,3	61,3	61,5	62,3	65	62,1
h4 (mm)	63,7	61,2	61,8	63,2	63,3	60
hmed (mm)	63,775	61	61,8	62,125	63,4	61,525
F PRENSA	1	1	1	1	1	1
Fh	1,02	1,09	1,07	1,06	1,03	1,08
EM (kgf)	848	976	876	897	788	960
EM.C (kgf)	862,89	1068,31	938,58	952,85	809,63	1036,13
CAP 5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (mm)	62,9	62,9	60,4	59,2	62,4	61,5
h2 (mm)	62,4	63	60,4	60	61,7	60
h3 (mm)	62,7	62,7	62,3	61,1	62	61,1
h4 (mm)	64	63,1	62,5	59,1	61,9	59,1
hmed (mm)	63	62,925	61,4	59,85	62	60,425
F PRENSA	1	1	1	1	1	1
Fh	1,04	1,04	1,08	1,13	1,07	1,11
EM (kgf)	1117	1076	1174	945	814	863
EM.C (kgf)	1159,64	1119,26	1271,33	1067,17	867,54	959,41
CAP 5,5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (mm)	61,8	61,6	63,5	63,2	60,2	62
h2 (mm)	62,4	60,7	63,6	62,2	62,3	63
h3 (mm)	62,8	59,9	63,1	62,4	62,9	63,2
h4 (mm)	62	60,4	64,3	62,8	61,8	62,1
hmed (mm)	62,25	60,65	63,625	62,65	61,8	62,575
F PRENSA	1	1	1	1	1	1
Fh	1,06	1,10	1,02	1,05	1,07	1,05
EM (kgf)	934	1063	878	927	969	1024
EM.C (kgf)	988,89	1174,57	896,88	971,22	1038,22	1074,95
CAP 6%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (mm)	60,3	60,1	60,9	66	63,3	61,8
h2 (mm)	60,4	59,8	61,5	67,8	63,5	62,8
h3 (mm)	60,3	60	61,4	65,1	64,1	60,1
h4 (mm)	60,5	59,6	61,1	63,8	64,2	61,6
hmed (mm)	60,375	59,875	61,225	65,675	63,775	61,575
F PRENSA	1	1	1	1	1	1
Fh	1,11	1,13	1,09	0,97	1,02	1,08
EM (kgf)	826	670	1007	1001	974	1018
EM.C (kgf)	819,00	856,00	895,00	970,70	991,10	1097,27
TEOR ÓTIMO DE LIGANTE						
	CAUQ-REF (4,6%)			CAUQ-B (4,9%)		
	CP4	CP5	CP6	CP4	CP5	CP6
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (mm)	61,6	65,9	59,2	59,6	59,4	62,3
h2 (mm)	63,4	64,8	62,5	59,6	61,6	62,4
h3 (mm)	63,8	64,7	63,1	62,5	61,8	64,9
h4 (mm)	61,8	64,1	62,6	62,8	60,1	64,2
hmed (mm)	62,65	64,875	61,85	61,125	60,725	63,45
F PRENSA	1	1	1	1	1	1
Fh	1,0477	0,9894	1,07	1,0909	1,1027	1,0261
EM (kgf)	935	1005	965	894	887	903
EM.C (kgf)	979,6	994,37	1032,6	975,27	978,11	926,59

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 31 – Resistência à para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B.

CAP 4%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (cm)	6,04	6,24	6,35	6,38	6,25	6,45
h2 (cm)	6,06	6,4	6,3	6,35	6,36	6,51
h3 (cm)	6,39	5,95	6,27	6,3	6,51	6,56
h4 (cm)	6,1	5,97	6,31	6,46	6,28	6,41
hmed (cm)	6,1475	6,14	6,3075	6,3725	6,35	6,4825
F (kg)	714	825	886	678	660	626
F (N)	7001,5	8090	8688,1	6648,5	6472	6138,6
RT (Mpa)	0,71	0,82	0,86	0,65	0,64	0,59
CAP 4,5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (cm)	6,19	6,28	6,34	6,35	6,05	6,34
h2 (cm)	6,36	6,3	6,28	6,53	6,26	6,06
h3 (cm)	6,42	6,26	6,31	6,54	6,52	6,24
h4 (cm)	6,21	6,21	6,41	6,43	6,25	6,54
hmed (cm)	6,295	6,2625	6,335	6,4625	6,27	6,295
F (kg)	719	902	883	804	818	748
F (N)	7050,5	8845	8658,7	7884	8021,3	7334,9
RT (Mpa)	0,70	0,88	0,85	0,76	0,80	0,73
CAP 5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (cm)	6,34	6,26	6,02	6,36	6,64	6,06
h2 (cm)	6,22	6,2	6,18	6,16	6,31	6,24
h3 (cm)	6,2	6,1	6,12	6,24	6,15	6,24
h4 (cm)	6,27	6,15	6,03	6,43	6,46	6
hmed (cm)	6,2575	6,1775	6,0875	6,2975	6,39	6,135
F (kg)	899	737	910	757	786	874
F (N)	8815,6	7227	8923,5	7423,1	7707,5	8570,4
RT (Mpa)	0,88	0,73	0,91	0,74	0,75	0,87
CAP 5,5%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (cm)	6,02	5,85	5,96	5,97	6,24	6,48
h2 (cm)	6,03	5,86	6,04	6,33	6,3	6,4
h3 (cm)	5,95	5,97	6,08	6,23	6,47	6,36
h4 (cm)	5,99	6,02	5,91	5,99	6,32	6,32
hmed (cm)	5,9975	5,925	5,9975	6,13	6,3325	6,39
F (kg)	815	680	740	751	733	843
F (N)	7991,9	6668,1	7256,4	7364,3	7187,8	8266,5
RT (Mpa)	0,83	0,70	0,76	0,75	0,71	0,81
CAP 6%						
	CAUQ-REF			CAUQ-B		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (cm)	6,09	6,11	6,1	6,1	6,2	6,02
h2 (cm)	6,1	6,14	6,1	6,13	6,06	6,01
h3 (cm)	6,02	6,11	6,01	6,3	6,17	6,3
h4 (cm)	6,06	6,14	6,06	6,12	6,28	6,34
hmed (cm)	6,0675	6,125	6,0675	6,1625	6,1775	6,1675
F (kg)	578	520	629	643	610	607
F (N)	5667,9	5099,1	6168	6305,3	5981,7	5952,2
RT (Mpa)	0,58	0,52	0,63	0,64	0,60	0,60
TEOR ÓTIMO DE LIGANTE						
	CAUQ-REF (4,6%)			CAUQ-B (4,9%)		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
d (cm)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
h1 (cm)	6,01	6,12	6,29	6,49	6,02	6,2
h2 (cm)	5,81	6,12	6,24	6,4	6,1	6,16
h3 (cm)	6,04	6,16	6,24	6,51	6,3	5,93
h4 (cm)	6,12	6,18	6,26	6,61	6,3	5,9
hmed (cm)	5,995	6,145	6,2575	6,5025	6,18	6,0475
F (kg)	816	826	809	797	802	785
F (N)	8001,7	8099,8	7933,1	7815,4	7864,4	7697,7
RT (Mpa)	0,83	0,82	0,79	0,75	0,79	0,79

Fonte: Própria do autor (2016).

Tabela 32 – Desgaste cântabro para as misturas CAUQ-REF e CAUQ-B.

DESGASTE CÂNTABRO			
	PROCESSO DA NORMA	PROCESSO DE ENVELHECIMENTO	
CAUQ-REF			
	CP-1	CP-2	CP-3
P (g)	1194,5	1187,2	1185,3
P'(g)	1141,1	1073,9	1096,5
DESGASTE CÂNTABRO (%)	4,47%	9,54%	7,49%
CAUQ-B			
	CP-1	CP-2	CP-3
P (g)	1190,8	1190,1	1193,1
P'(g)	1149,4	1135,5	1135,4
DESGASTE CÂNTABRO (%)	3,48%	4,59%	4,84%

Fonte: Própria do autor (2016).

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DO ECOFLEX B



ASFALTO BORRACHA - ECOFLEX B

CUIDADOS DE APLICAÇÃO DO PRODUTO

O ligante ECOFLEX B não deverá ser aquecido acima de 180°C, o objetivo é minimizar qualquer aumento de consistência que possa ocorrer. O aquecimento deverá ser efetuado até obter-se a consistência adequada à sua aplicação, sendo a temperatura ideal de usinagem equivalente a 175°C. O produto está sendo entregue a uma temperatura entre 165 e 175°C e deverá ser descarregado em tanques isentos de lastro de outros produtos. Recomenda-se durante o armazenamento até 5 dias que a temperatura seja mantida em torno de 165°C e que haja agitação e circulação do produto por duas horas a cada período de 12 horas (não deve ser feita agitação e circulação do produto a temperaturas inferiores a 165°C), já em períodos superiores a 5 dias é recomendável estocar o produto a temperaturas mais baixas em torno de 100 a 120°C. Já para períodos mais prolongados, superior a 10 dias, o ideal é estocar a temperatura ambiente.

A temperatura durante o armazenamento deverá ser uniforme e a distribuição de calor deverá ocorrer de forma homogênea através da utilização da bomba de recirculação e dos agitadores mecânicos. A forma de aquecimento dos tanques de armazenamento deve ser por serpentinhas de óleo térmico.

O produto não deve ser aplicado em dias de chuva, em superfícies molhadas e em temperaturas ambiente inferiores a 10°C.

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

DATA	14/12/2015
PRODUTO	ECOFLEX B

ENSAIO	NORMA	ESPECIFICAÇÃO (*)	RESULTADOS
Penetração (100g, 5s, 25°C), 0,1mm	NBR 6576	30 a 70	49,5
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	55 (mínimo)	57,0
Recuperação Elástica, %	NLT 329 / 91	50 (mínimo)	69,0
Ponto de Fulgor, °C	NBR 11341	235 (mínimo)	> 240
Densidade Relativa, 25°C/25°C	NBR 6296	Anotar	1,031
Visc Brookfield à 175°C, cP, Sp 3, 20 rpm	ASTM D 2196-99	800 - 2000	1505,0
Temperatura de Carregamento, °C	-	Anotar	175

Após a determinação do teor de asfalto na mistura betuminosa com Rotarex, Refluxo ou Soxhlet, o resultado encontrado deverá ser multiplicado por um fator (1,07).

Fator correspondente a presença de partes insolúveis de pó de pneu nos filtros do equipamento.

* Esta especificação aprovada no IBP e em fase de publicação pela ANP.

WANDER OMENA
RESPONSÁVEL ANÁLISES

JOSÉ ANTONIO ANTOSCZEZEM JUNIOR
RESPONSÁVEL PRODUÇÃO

ANEXO B – TEMPERATURAS DE MISTURA ECOFLEX B



MISTURAS ASFALTICAS MORNAS
TEMPERATURAS DE LABORATÓRIO

Temperaturas Convencionais de Misturas e Compactação - Ligantes Asfálticos sem GW-MIX ou tecnologia 3G

Temperaturas (°C)	CAP 50/70	CAP 30/45	FLEXPAVE ST	FLEXPAVE 50/65	FLEXPAVE 55/75	FLEXPAVE 60/85	FLEXPAVE 65/90	ECOFLEX B	ECOFLEX A
Ligante asfáltico	153	158	153	158	162	165	170	175	178
Agregado	163	168	163	168	172	175	180	183	185
Compactação Marshall	140	145	140	147	150	155	160	175	177

Temperaturas de Misturas e Compactação - Ligantes Asfálticos com GW-MIX

Temperaturas (°C)	CAP 50/70 + GW-MIX	CAP 30/45 + GW-MIX	FLEXPAVE ST + GW-MIX	FLEXPAVE 50/65 + GW-MIX	FLEXPAVE 55/75 + GW-MIX	FLEXPAVE 60/85 + GW-MIX	FLEXPAVE 65/90 + GW-MIX
Ligante asfáltico	150	155	150	155	160	165	170
Agregado	130	135	130	140	145	150	150
Compactação Marshall	115	120	115	120	130	130	135

Linha ECOFLEX 3G

Temperaturas (°C)	ECOFLEX B 3G	ECOFLEX A 3G
Ligante asfáltico	175	178
Agregado	155	160
Compactação Marshall	155 (CAUQ)	-
	150 (Cap Gradad, SMA e CPA)	155 (Cap Gradad, SMA e CPA)


 Jose Antonio Antoszczem Jr.
 Engenheiro Químico
 Greca Asfaltos