

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

DIONES HENRIQUE ARAÚJO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ASFALTO BORRACHA COM O ASFALTO
CONVENCIONAL E O ASFALTO COM ADIÇÃO DE POLÍMEROS**

FORMIGA – MG

2015

Diones Henrique Araújo

ANÁLISE COMPARATIVA DO ASFALTO BORRACHA COM O ASFALTO
CONVENCIONAL E O ASFALTO COM ADIÇÃO DE POLÍMEROS.

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil do UNIFOR –
MG, como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Formiga – MG

2015

A663

Araújo, Diones Henrique.

Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros / Diones Henrique Araújo. – 2015.

88 f.

Orientador: Paulo José Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-
Centro Universitário de Formiga-UNIFOR-MG, Formiga, 2015.

1. Asfalto convencional. 2. Asfalto borracha. 3. Asfalto com adição de polímeros. I. Título.

CDD 625.85

Diones Henrique Araújo

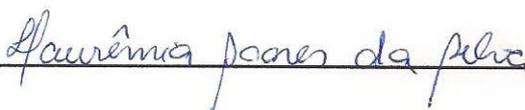
ANÁLISE COMPARATIVA DO ASFALTO BORRACHA COM O ASFALTO
CONVENCIONAL E O ASFALTO COM ADIÇÃO DE POLÍMEROS

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil do UNIFOR-
MG, como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Paulo José Silva
Orientador



Prof.ª Laurêmia Soares da Silva
UNIFOR-MG



Prof.ª Ma. Christiane Pereira Rocha Souza
UNIFOR-MG

Formiga, 11 de Novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço á Deus, por ter me guiado durante toda minha jornada acadêmica, e ter sido fonte de força para vencer todos os obstáculos.

A meus pais, que durante toda minha vida me mostraram os melhores caminhos, sempre com muito apoio, amor, compreensão, e que neste período acadêmico não foi diferente e não mediram esforços para que eu buscasse meus sonhos.

A toda minha família, pelo apoio e paciência de todos os momentos que não pude estar presente pelo fato de estar dedicando ao meu estudo.

A minha namorada, que ajudou muito durante todo esse período, pelo companheirismo, dedicação, compreensão e também pela paciência aos momentos que estive ausente.

A todos meus amigos que sempre me apoiaram da melhor forma. Aos meus amigos de turma que proporcionou bons momentos e grandes histórias. Aos meus amigos de viagem, que transformavam a longa e cansativa viagem diária em momentos de alegria e descontração.

Ao Prof. Dr. Paulo José, orientador, pela atenção fornecida durante todo esse trabalho.

E por fim, a todos que de alguma forma participaram e fizeram parte de toda essa jornada.

RESUMO

Devido ao aumento do tráfego de veículos e do excesso de carga exercida sobre os pavimentos asfálticos, empresas de asfalto e pesquisadores têm buscado cada vez mais novas técnicas para melhorar a qualidade e resistência do asfalto. Dentre várias técnicas de melhoria da qualidade do asfalto, uma vem se destacando pela sua resistência e estabilidade, também conhecido com Asfalto Borracha, essa técnica consiste na adição da borracha moída de pneu inservível ao asfalto, buscando uma melhor característica mecânica além de possuir uma questão ambiental que é a retirada dos pneus inservíveis da natureza.

O presente trabalho tem como objetivo mostrar o desempenho do asfalto modificado com borracha moída de pneu e compará-lo com o asfalto convencional e também com o asfalto modificado por polímeros. Esta análise comparativa se dará através de ensaios feitos em laboratório visando determinar algumas características como penetração, estabilidade e fluência.

Palavras-chave: Asfalto convencional. Asfalto Borracha. Asfalto com adição de polímeros.

ABSTRACT

Due to the increased vehicle traffic and excess load exerted on the asphalt pavements, asphalt companies and researchers have increasingly sought new techniques to improve the quality and asphalt resistance. Among various techniques for improving the asphalt quality, has stood out for its strength and stability, also known as Asphalt Rubber, this technique consists of adding the ground of unserviceable to asphalt tire rubber, seeking a better mechanical characteristics as well as having a question environment that is the removal of scrap tires of nature.

This paper aims to show the performance of modified asphalt tire ground rubber and compares it with conventional asphalt and also with the polymer modified asphalt. This comparative analysis will be through tests made in the laboratory in order to determine some characteristics like penetration, stability and fluency.

Keywords: conventional asphalt. Rubber asphalt. Asphalt with addition polymers.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de várias camadas	18
Figura 2 - Área de contato pneu x pavimento.....	18
Figura 3 - Estrutura de pavimento tipo de concreto.....	19
Figura 4 - Camadas de um pavimento flexível	20
Figura 5 - Tipos de rochas utilizadas como fonte de agregados para pavimentos	24
Figura 6 - Grau de arredondamento e esfericidade.....	26
Figura 7 - Esquema de destilação.....	30
Figura 8 - Penetrômetro	47
Figura 9 - Dimensões da agulha do penetrômetro	48
Figura 10 - Prensa Marshall	51
Figura 11 - Borracha moída de pneu em estado bruto.....	59
Figura 12 - Pré-peneiramento da borracha moída de pneu	60
Figura 13 - Borracha moída de pneu após pré-peneiramento.....	60
Figura 14 - Peneiramento da borracha moída de pneu em peneira granulométrica .	61
Figura 15 - Pó de borracha de pneu após peneiramento	61
Figura 16 - Retirada de limalhas de aço com uso do imã	62
Figura 17 - Verificação de limalhas de aço no pó de borracha	62
Figura 18 - Pó de borracha depois de retirada das limalhas de ferro.....	63
Figura 19 - Coleta das amostras de asfalto.....	64
Figura 20 - Enchimento dos recipientes de amostra com o asfalto	64
Figura 21 - Estufa utilizada para aquecimento dos agregados e asfaltos	65
Figura 22 - Agregados utilizados na mistura	69
Figura 23 - Aquecimento dos agregados em estufa.....	69
Figura 24 - Pesagem do pó de borracha junto ao asfalto.....	70
Figura 25 - Mistura do pó de borracha ao asfalto.....	71
Figura 26 - Preparação dos corpos de prova para ensaio de penetração.....	72
Figura 27 - Realização do ensaio de penetração	73
Figura 28 - Pesagem da mistura betuminosa para confecção dos corpos de prova .	74
Figura 29 - Mistura do material betuminoso para confecção dos corpos de prova ...	75
Figura 30 - Preenchimento do molde de compactação com a mistura betuminosa ..	75
Figura 31 - Compactação do corpo de prova	76
Figura 32 - Corpos de prova após compactação.....	76

Figura 33 - Desforma dos corpos de prova	77
Figura 34 - Corpos de prova prontos para realização dos ensaios	77
Figura 35 - Pesagem do corpo de prova ao ar (Par)	78
Figura 36 - Pesagem do corpo de prova submerso (P_{sub}).....	78
Figura 37 - Corpos de prova em banho-maria.....	79
Gráfico 1 - Curva granulométrica asfalto convencional.....	66
Gráfico 2- Curva granulométrica asfalto polímero	67
Gráfico 3- Curva granulométrica asfalto borracha.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações para asfalto convencional.....	31
Tabela 2 - Composição concreto asfáltico	33
Tabela 3 - Especificações para o asfalto borracha.....	37
Tabela 4 - Especificações para asfalto polímero.....	39
Tabela 5 - Comparativo de custo entre asfalto borracha e asfalto convencional	42
Tabela 6 - Faixa granulometrica "C" para asfalto convencional	45
Tabela 7 - Faixa granulometrica "C" para asfalto polímero	45
Tabela 8 - Faixa Granulometrica "C" para asfalto borracha	46
Tabela 9 - Valores de VV e RBV para asfalto polímero e asfalto convencional	56
Tabela 10 - Valores de VAM para asfalto convencional e asfalto polímero	56
Tabela 11 - Valores de Vv e RBV para asfalto borracha	57
Tabela 12 - Valores de VAM para asfalto borracha.....	57
Tabela 13 - Composição dos agregados na mistura betuminosa.....	65
Tabela 14 - Faixa granulométrica utilizada comparada a norma de especificação do asfalto convencional.....	66
Tabela 15 - Faixa granulométrica utilizada comparada a norma de especificação asfalto polímero.....	67
Tabela 16 - Faixa granulométrica utilizada comparada a norma de especificação asfalto borracha.....	68
Tabela 17 - Relatório de resultados ensaio de penetração	73
Tabela 18 - Resultados ensaio Marshall do asfalto convencional	80
Tabela 19 - Resultados ensaio Marshall do asfalto convencional	81
Tabela 20 - Resultados do ensaio Marshall para o asfalto polímero.....	81
Tabela 21 - Resumo dos resultados ensaio Marshall para o asfalto polímero	82
Tabela 22 - Resultados do ensaio Marshall para o asfalto borracha.....	82
Tabela 23 - Resumo resultados ensaio Marshall para o asfalto borracha.....	83
Tabela 24 - Comparativo de vazios entre os tipos de asfalto analisados	83
Tabela 25 - Comparativo de estabilidade para os três tipos de asfaltos analisados ..	84
Tabela 26 - Comparativo de fluência para os três tipos de asfalto analisados.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilnitrila-butadieno-estireno
AISI	American Iron and Steel Institute
ANIP	Agência Nacional da Indústria de Pneumáticos
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento asfáltico de Petróleo
cm	Centímetros
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
dm	Decímetro
DMT	Densidade máxima teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão asfáltica de petróleo
EVA	Etil Vinil Acetato
g	Grama
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma-força
m	Metro
mL	Mililitro
mm	Milímetro
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
PVC	Policloreto de vinila
SB	Estireno butadieno
SBR	Copolímero butadieno estireno
SBS	Estireno butadieno estireno
SEBS	Estireno estileno butadieno estireno
SIS	Estireno isopreno Estireno
VV	Volume de vazios
VAM	Vazios do agregado mineral
VCB	Volume cheio de Betumes
RBC	Relação Betume vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA	15
3	OBJETIVOS	16
3.1	Objetivo geral	16
3.2	Objetivos específicos	16
4	pavimentos	17
4.1	Pavimentos rígidos	19
4.2	Pavimentos flexíveis	19
4.2.1	Camadas de um pavimento flexível	20
4.2.1.1	Subleito	21
4.2.1.2	Regularização	21
4.2.1.3	Reforço de subleito	21
4.2.1.4	Sub-base	21
4.2.1.5	Base	22
4.2.1.6	Revestimentos	22
5	MISTURAS ASFÁLTICAS	22
5.1	Misturas a quente	23
5.1.1	Agregados	23
5.1.1.1	Agregados naturais	24
5.1.1.2	Agregados artificiais	25
5.1.1.3	Agregados reciclados	25
5.1.1.4	Composição mineralógica	25
5.1.1.5	Forma dos agregados	25
5.1.1.6	Produção de agregados britados	26
5.1.1.7	Características tecnológicas que devem ser analisadas para agregados utilizados em pavimentos	27
5.1.2	Fíler	28
5.1.3	Asfalto de Petróleo	28
5.1.3.1	Asfaltos naturais	28
5.1.3.2	Asfaltos produzidos em refinarias de petróleo	29
5.1.3.3	Produção de Asfalto	29
5.1.3.4	Destilação seca	29
5.1.3.5	Destilação a vapor	29
5.1.3.6	Destilação a vácuo	30

5.1.3.7 Cimento Asfáltico de petróleo (CAP)	31
5.1.4 Tipos de misturas asfálticas a quente.....	32
5.1.4.1 Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).	32
6 Asfáltos modificados.....	34
6.1 Asfalto modificado com adição de borracha de pneu	34
6.1.1 História do Asfalto Borracha.....	35
6.1.2 Obtenção do pó da borracha de pneu	35
6.1.3 Adição da borracha de pneu ao asfalto.....	36
6.1.4 Normas e características técnicas do Asfalto Borracha.....	36
6.2 Asfalto modificado por polímero ou asfalto polímero	37
6.2.1 História	38
6.2.2 Polímeros	38
6.2.3 Tipos de polímeros utilizados em pavimentação	39
6.2.4 Normas e características técnicas do CAP modificado por polímeros.....	39
7 VANTAGENS DO USO DO ASFALTO BORRACHA	39
7.1 Questões Técnicas.....	39
7.2 Questões ambientais	40
7.3 Questões econômicas	41
8 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
8.1 Materiais utilizados na pesquisa	43
8.2 Metodologia	43
8.2.1 Coleta da borracha moída de pneu.....	43
8.2.2 Peneiramento da borracha moída de pneu	43
8.2.3 Adição da borracha moída de pneu ao asfalto	44
8.2.4 Agregados utilizados.....	44
8.2.5 Ensaio laboratoriais.....	46
8.2.5.1 Ensaio de Penetração	46
8.2.5.2 Ensaio Marshall	50
9 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
9.1 Coleta e peneiramento e preparação da borracha moída de pneu	59
9.2 Ensaio laboratoriais	63
9.2.1 Coleta das amostras de asfalto	63
9.2.2 Determinação dos agregados utilizados.....	65
9.2.3 Mistura do pó de borracha de pneu ao asfalto	70
9.2.4 Ensaio de penetração	71

9.2.5	Ensaio Marshall.....	74
9.2.5.1	Resultados obtidos pelo ensaio Marshall para asfalto convencional.	80
9.2.5.2	Resultados obtidos pelo ensaio Marshall para asfalto modificado por polímeros.....	81
9.2.5.3	Resultados obtidos pelo ensaio Marshall para asfalto borracha.....	82
9.2.5.4	Comparação e análise dos resultados.....	83
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a indústria automobilística esteve aquecida, com a facilidade de compra, as baixas taxas de juros e financiamentos com parcelas populares fizeram com que a venda de automóveis, caminhões, motos, aeronaves e muitos outros crescesse de forma exorbitante, e com esse crescimento também se elevou alguns problemas importantes, o primeiro deles é como os pavimentos suportarão um excesso de tráfego e de carga tão grande sem sofrerem patologias pré-maturas, outra questão importante é que com uma frota de veículos muito intensa também serão gerados muitos resíduos e um dos principais e mais degradantes são os pneus descartados.

Como este problema é de questão mundial, surgiu a ideia de aproveitar a borracha dos pneus inservíveis como agregado ou aditivo em revestimento asfáltico, também conhecido como Asfalto Borracha.

Em termos técnicos, as primeiras pesquisas sobre o Asfalto Borracha foram feitas nos anos 40, no Arizona, Estados Unidos, onde o principal foco foi utilizar ligantes asfálticos modificados com borracha moída de pneu, a fim de obter um material com boas características de adesividade, sendo elas a fixação, aderência e boa colagem aos agregados, evitando que as trincas não passem entre as camadas dos pavimentos, prejudicando as camadas mais novas.

Com o passar dos anos, além dos benefícios às características mecânicas do asfalto, o Asfalto Borracha se tornou um grande aliado as questões ambientais, pois quanto mais borracha se utilizava para a fabricação do asfalto, mais pneus eram retirados do meio ambiente.

Em 2014 foram vendidos cerca de 74,9 milhões de pneus no Brasil, ocasionando um aumento em torno de 15% nos últimos oito anos. O Brasil já ocupa o 2º lugar em reaproveitamento de pneus no mundo, desde 1999 já foram destinados de forma adequada cerca de 3 bilhões de pneus inservíveis.(ANIP,2015).

Mesmo com números animadores, outros milhões de pneus são destinados de forma incorreta, sendo jogados em lixões, aterros sanitários, córregos, rios, margem de pista tornando-se um resíduo problemático que afeta o meio ambiente.

Com isso, o uso do asfalto borracha vem crescendo em todo mundo, apesar de não ser popular no Brasil, o asfalto borracha já foi utilizado em muitos trechos de

nossa malha rodoviária com sucesso. O asfalto borracha vem sendo cada vez mais estudado, melhorando suas características para que torne o revestimento asfáltico seguro e duradouro.

2 JUSTIFICATIVA

O estudo do Asfalto com adição de borracha moída de pneu ao ligante foi escolhido pelo fato de ser uma técnica que apresenta uma grande solução a melhoria das qualidades mecânicas do asfalto tornando-o mais resistente e estável além de ser uma solução ambiental, devido ao fato de retirar pneus inservíveis da natureza.

A frota de veículo aumentou muito nas ultimas décadas, fazendo com que os antigos asfaltos não suportem esse tráfego intenso, causando patologias que necessitam de constantes reparos gerando custos e transtornos.

Não podendo descartar os problemas ambientais gerados pelo descarte errado de pneus usados, ocasionando sérios problemas ao meio ambiente.

Sendo assim, neste trabalho será feito um estudo de caso, onde será analisado o asfalto convencional, o asfalto borracha e o asfalto com adição de polímeros. Mostrando as características do Asfalto Borracha comparado aos demais.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo mostrar as características técnicas do Asfalto Borracha e compará-las com o asfalto modificado por polímero e o asfalto convencional.

3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo proposto, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as características do Asfalto Borracha, asfalto convencional e asfalto com adição de polímeros através do ensaio de penetração.
- Analisar as características de um determinado traço de CBUQ Faixa C, com asfalto borracha, com asfalto polímero e com asfalto convencional através do ensaio Marshall.
- Fazer uma comparação entre as características dos três tipos de asfalto e dos três tipos de traços.

4 PAVIMENTOS

Os primeiros caminhos datam-se da pré-história, onde eram construídos para facilitar a caminhada de suas moradias até os locais em que se encontravam alimentos e água.

Com o passar dos séculos os caminhos foram se tornando importantes meios de transporte de mercadorias e comércio, e na necessidade de se tornar as viagens mais confortáveis e ágeis os habitantes começaram a pavimentar esses caminhos.

Segundo Bernucci et al. (2008) , as mais antigas estradas pavimentadas foram construídas pelos egípcios, para facilitar o transporte dos materiais para construção das pirâmides, onde eram colocados lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte.

Hoje possuem diversos tipos de pavimentos no mundo, com capacidades variadas e destinadas a diversos tipos de transporte.

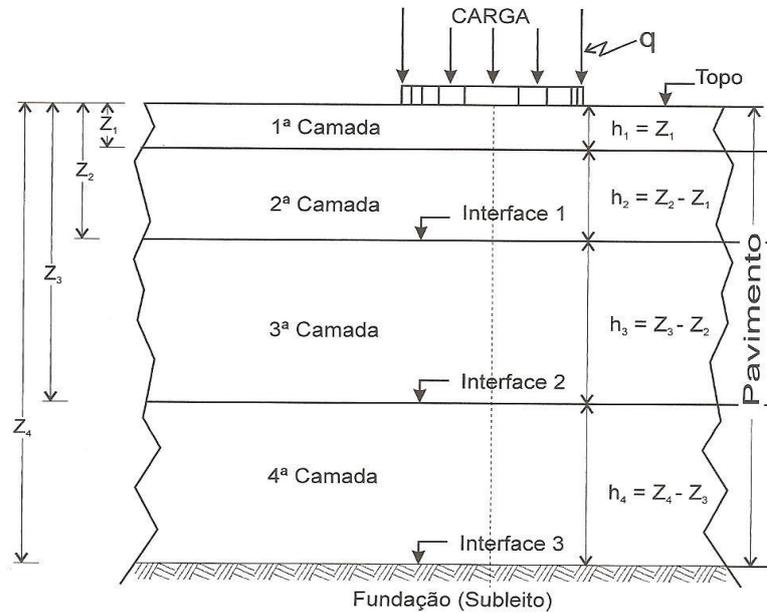
Antes de abordar o tema asfalto se faz necessário a explicação do Pavimento típico em que os asfaltos modificados são empregados.

Senço (2007) define pavimentos como sendo estruturas destinadas a resistir esforços provocados pelo tráfego de veículos, construídas sobre terraplenagem.

Atualmente os pavimentos devem ser construídos seguindo normas e especificações de modo a garantir a qualidade do mesmo. Para Bernucci et al. (2008) os pavimentos também devem propiciar aos usuários boas condições de rolamento com segurança, conforto e economia.

Conforme mostra a FIG.1, os pavimentos constituem em sistemas de várias camadas com finitas espessuras construídas sobre um semi-espaço infinito chamado subleito que possui a função de fundação da estrutura. (SENÇO, 2007).

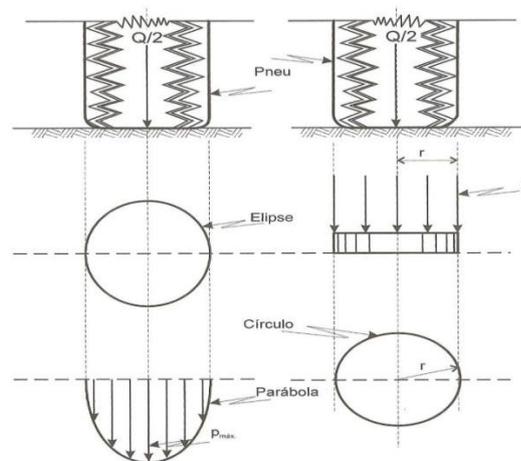
Figura 1 - Sistema de várias camadas



Fonte: Senço (2007)

Os pavimentos sofrem com cargas que são transmitidas pelas rodas dos veículos, essas cargas são utilizadas para definir qual melhor tipo de pavimento para determinado tráfego. Senço (2007) explica que a área de contato entre os pneus e o pavimento possui uma forma elíptica conforme mostra FIG. 2, e a pressão exercida pelos pneus possui uma distribuição parabólica, onde a pressão maior é solicitada no centro da área carregada.

Figura 2 - Área de contato pneu x pavimento



Fonte: Senço (2007)

Os pavimentos são classificados basicamente em três tipos, sendo eles rígidos, semi-flexíveis e flexíveis. No estudo em questão serão abordados os dois tipos mais utilizados, os rígidos e os flexíveis.

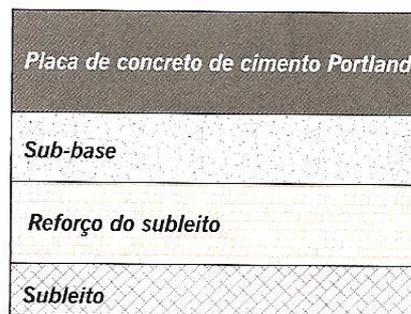
Senço (2007) afirma que os pavimentos rígidos são tipos de pavimentos que possuem pouca deformação, e são basicamente constituídos de concreto de cimento. Já os flexíveis são pavimentos que suportam certa deformação até o limite que levam o seu rompimento.

4.1 Pavimentos rígidos

São pavimentos que apresentam baixa deformação. Quando solicitados por cargas e deformações rompem por tração na flexão. (SENÇO, 2007).

Bernucci et al. (2008) descreve que os pavimentos rígidos são geralmente compostos por uma camada de superficial de cimento Portland, apoiada na maioria das vezes sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento (chamado sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário. A FIG. 3 mostra uma estrutura-tipo de pavimento de concreto de cimento Portland:

Figura 3 - Estrutura de pavimento tipo de concreto



Fonte: Bernucci et al. (2008)

4.2 Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis são os mais utilizados atualmente, Senço (2007) define pavimentos flexíveis como “aqueles em que as deformações, até certo limite, não levam ao rompimento”.

Esses pavimentos são dimensionados a compressão e a tração na flexão, provocadas pelas bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a

deformações permanentes e ao rompimento. (SENÇO, 2007). As cargas se distribuem em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. (BRASIL, 2006).

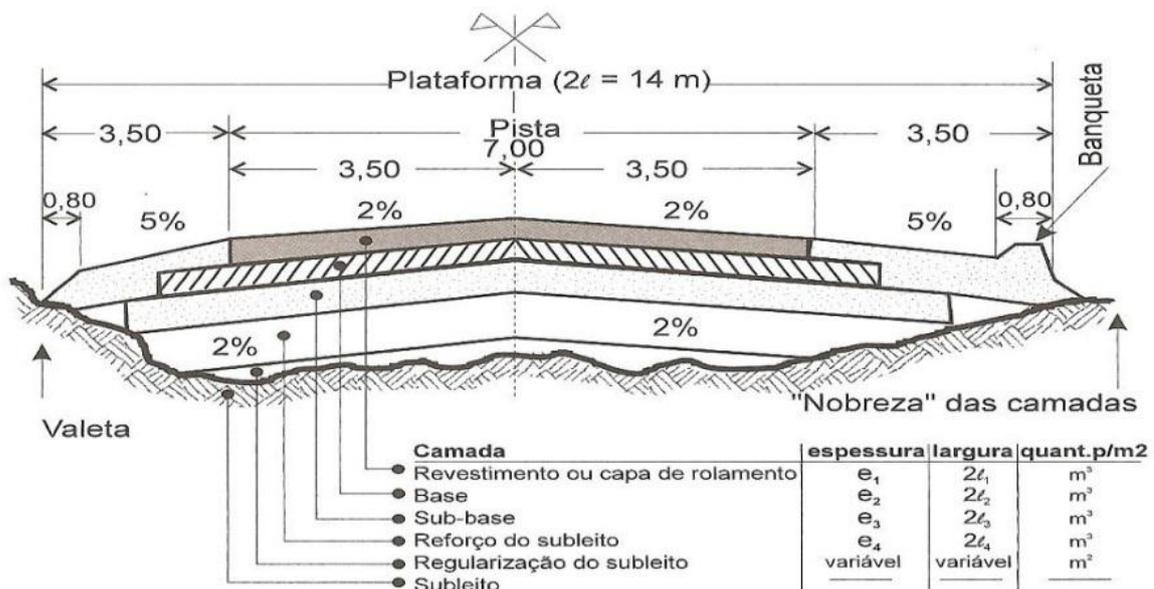
Segundo Bernucci et al., (2008), em geral, os pavimentos flexíveis são associados aos pavimentos asfálticos, compostos geralmente por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço de subleito, constituída por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes.

A determinação e dimensionamento dessas camadas vão depender de vários fatores como volume de tráfego, capacidade de carga do subleito, da rigidez e espessura das camadas dentre outro fatores como condições ambientais e geológicas. (BERNUCCI et al., 2008, p.338).

4.2.1 Camadas de um pavimento flexível

Para Senço (2007) uma seção transversal convencional, contendo todas as camadas possíveis, consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por um dos inúmeros métodos de dimensionamento. Como mostra a FIG. 4, um pavimento flexível convencional é composto por revestimento, base, sub-base, reforço do subleito, regularização de subleito e subleito.

Figura 4 - Camadas de um pavimento flexível



Fonte: Senço (2007)

4.2.1.1 Subleito

De acordo com Senço (2007), subleito “é o terreno de fundação do pavimento”. O subleito é a primeira camada do pavimento, após a realização de corte e aterro. Também é considerado subleito o terreno natural que possui cota natural próximo à cota exigida no projeto.

4.2.1.2 Regularização

É a camada construída acima do subleito com o intuito principal de conformá-lo de acordo com as cotas de projeto, tanto longitudinalmente como transversalmente. (SENÇO, 2007).

Senço (2007), ainda explica que sempre que possível executar essa camada sobre aterro, e quando executada sobre corte, devemos ficar atentos em alguns procedimentos:

- “que a camada compactada naturalmente seja substituída por uma nova camada compactada até o grau exigido em projeto.”
- “que não se sacrifique o equipamento de escarificação desnecessariamente, agindo numa camada compactada.”

4.2.1.3 Reforço de subleito

Reforço de subleito é uma camada que possui uma espessura constante, possui características que complementam a sub-base, pois recebe esforços verticais. No entanto seu material possui uma resistência inferior ao da sub-base, mas superior ao do subleito. Em outras palavras conforme afirma Senço (2007), “o reforço do subleito poderia ser considerado indistintamente camada suplementar do subleito e complementar da sub-base”.

4.2.1.4 Sub-base

Brasil (2006) define sub-base como sendo uma camada que complementa a base, quando por motivos técnicos ou até mesmo econômicos, não for possível executar a base diretamente sobre o reforço de subleito.

4.2.1.5 Base

Segundo Senço (2007), o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.

4.2.1.6 Revestimentos

Também conhecido como capa de rolamento, ou capa, é uma camada de características impermeáveis que recebem diretamente os esforços oriundos do tráfego. (SENÇO, 2007).

De acordo com BRASIL (2006), o revestimento também tem a função de oferecer comodidade, segurança e resistir ao desgaste.

Senço (2007) explica que quando o pavimento possui um subleito mais resistente exige-se um revestimento menos espesso, podendo algumas vezes dispensar a construção de reforço de subleito ou até mesmo sub-base.

A camada de revestimento tem sua espessura dimensionada conforme o tipo da rodovia, levando em consideração principalmente o tipo de tráfego. Senço (2007) explica que para vias simples constituintes de duas faixas de tráfego e duas mãos de direção são utilizados revestimentos de 3 a 5 cm, e para autoestradas, chega-se a revestimentos mais espessos, entre 7,5 e 10 cm.

Os tipos de revestimentos e suas formas de fabricação serão melhores abordados no Item 5 do presente trabalho.

5 MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas são misturas provenientes da junção de agregados e asfalto dando origem ao revestimento desejado. Bernucci et al., (2008) explica que as misturas asfálticas podem ser fabricadas em usinas específicas, fixas ou móveis, e também podem ser fabricadas no próprio local, geralmente em tratamentos superficiais.

Os revestimentos podem ser classificados em função do tipo de ligante, os de mistura a quente, que se utiliza o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), e também os de mistura a frio, com utilização da Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP). (BERNUCCI et al., 2008, p.158).

Nesta pesquisa iremos trabalhar com os revestimentos provenientes de misturas a quente.

5.1 Misturas a quente

As misturas a quente podem distinguir-se em vários tipos de acordo com as exigências de características mecânicas e o padrão granulométrico empregado, isso em função da destinação do revestimento. (BERNUCCI et al., 2008, p.158).

As misturas a quente são compostas normalmente de agregados, Fíler ou material fino e asfalto.

5.1.1 Agregados

O revestimento asfáltico é uma mistura de asfalto e agregados. Assim como o asfalto, também se deve escolher o melhor tipo de agregado para cada tipo de revestimento, visando buscar durabilidade do pavimento e segurança ao usuário.

A norma ABNT NBR 9935/2011, define agregado como "material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e de concreto".

Do ponto de vista da engenharia civil, 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 obras. Aqui, o interesse maior é pelos agregados destinados aos serviços de pavimentação. Seu emprego, então, destina-se a misturas betuminosas, concreto de cimento, bases de calçamentos, lastros de obras e outros. (SENÇO, 2007, p. 265).

Senço (2007) esclarece que os agregados podem possuir diversas formas e dimensões variadas, resultantes de efeitos mecânicos naturais ou dos processos de extração além de suas propriedades intrínsecas, os agregados podem ser classificados sob alguns aspectos, sendo eles quanto à origem, forma, etc.

A FIG. 5 mostra os tipos de rochas mais utilizados para obtenção de agregados para uso em pavimentação.

Figura 5 - Tipos de rochas utilizadas como fonte de agregados para pavimentos

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

Fonte: Bernucci et al. (2007)

5.1.1.1 Agregados naturais

Para Bernucci et al. (2007, p.116), os agregados são provenientes de todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios.

Senço (2007), explica que agregados naturais também podem ser oriundos da erosão, transporte e deposição de detritos provenientes da desagregação das rochas, em virtude de intemperismos.

O transporte dos produtos desagregados pode ser feitos pela água, pelo vento ou pelas geleiras, denominando-se os depósitos resultantes, respectivamente: depósitos aluviais, depósitos eólicos e depósitos glaciais. (SENÇO, 2007).

5.1.1.2 Agregados artificiais

Senço (2007) informa que agregados artificiais são os que necessitam de um trabalho prévio, para assumir a forma, dimensões e qualidades adequadas para o uso.

Já Bernucci et al. (2007, p.119) explica que esse tipos de agregados são resíduos industriais, como escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados conforme a exigência da obra com o objetivo de se ter um alto desempenho, exemplos são a argila calcinada e a argila expandida.

5.1.1.3 Agregados reciclados

Os agregados reciclados são originados de reuso de materiais diversos. Bernucci et al. (2007, p.119)

Um exemplo disso que já esta sendo bastante utilizado nos últimos anos é a reciclagem do próprio revestimento asfáltico e também de materiais da construção civil.

5.1.1.4 Composição mineralógica

Conforme afirma Bernucci et al. (2007, p.116) “ os agregados provenientes de rochas naturais pertencem a um de quatro tipos principais, que são ígneos, sedimentares, metamórficos ou areias e pedregulhos”.

Segundo Senço (2007), rochas ígneas ou magmáticas, são formadas pelo resfriamento da lava. Rochas sedimentares são rochas transportadas, que sofreram ação de intemperismo durante os anos e também de grandes pressões. Rochas metamórficas são rochas que transportadas ou não sofreram modificações em sua composição mineral, devido aos agentes de intemperismo físico.

5.1.1.5 Forma dos agregados

As formas físicas dos agregados são de fator importante a definir suas propriedades e comportamento sob a ação do tráfego, por exemplo, um grão cúbico ou esférico possui um melhor comportamento quando comparado a um grão alongado ou chato. (SENÇO, 2007).

Para classificar e determinar os tipos de agregados, definimos algumas características ligadas ao grau de esfericidade e grau de arredondamento.

O grau de arredondamento conforme explica Senço (2007), está ligado à resistência mecânica e à abrasão da rocha-mãe, são classificados como angulosos e subangulares. O grau de esfericidade define a característica dos grãos de terem formas aproximadas da esfera, são classificadas em esferoidais, achatados, prismáticos e laminares.

A FIG. 6 mostra um desenho esquemático dos grãos.

Figura 6 - Grau de arredondamento e esfericidade

Grau de esfericidade ↓	Grau de arredondamento →			
	Angulosos	Subangulosos	Subarredondados	Arredondados 20
Equidimensionais				
Alongados				 25

Fonte: Senço (2007)

5.1.1.6 Produção de agregados britados

O processo de produção na pedreira é um processo importante na determinação da qualidade dos agregados.

Segundo Roberts et al. (1996) os britadores devem atender alguns objetivos:

- Reduzir os tamanhos de blocos de rocha;
- Produzir formas e tamanhos desejados e agregados;
- Ter a capacidade compatível com as cargas envolvidas para permitir seu manuseio;
- Minimizar a ocorrência de entupimentos e colmatção nas unidades durante a operação;
- Requerer um mínimo de pessoal;
- Satisfazer exigências de britagem sem a necessidade de estágios de britagem adicionais e equipamentos auxiliares;

- Minimizar a demanda de energia por tonelada de agregado produzida;
- Não haver desgaste excessivo dos componentes metálicos;
- Operar economicamente com um mínimo de manutenção; e
- Permitir uma vida de serviço longa.

5.1.1.7 Características tecnológicas que devem ser analisadas para agregados utilizados em pavimentos

Para Bernucci et al. (2007, p.129), os revestimentos asfálticos são formados por agregados de vários tamanhos e proporções mantidos unidos por um ligante asfáltico. Existe uma elaborada série de fatores que atuam conjuntamente para produzir uma estrutura com desempenho adequado. Características estas que devem ser seguidas pelas normas e especificações do DNER/DNIT.

De forma básica estas características se resumem em:

- *Tamanho e graduação*: Define a estabilidade da camada de revestimento asfáltico, devido o entrosamento entre as partículas e conseqüentemente atrito entre elas;
- *Limpeza*: Para a melhor qualidade dos agregados, eles devem estar livres de vegetação, argila entre outros materiais não desejados;
- *Resistencia a abrasão*: Os agregados devem apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração;
- *Textura superficial*: Fator que influencia na trabalhabilidade, da adesividade, e na resistência ao atrito e ao cisalhamento das misturas asfálticas para pavimentação;
- *Forma das Partículas*: a forma influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade;
- *Absorção*: A porosidade pode influenciar na quantidade de ligante asfáltico, pois o agregado absorve parte dele, para compensar deve-se adicionar quantidade adicional de ligante;
- *Adesividade ao ligante asfáltico*: O efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo

inaceitável para uso em mistura asfálticas. Devem-se criar fatores para corrigir isso;

- *Sanidade*: é a resistência do agregado em resistir a processos de desintegração química quando expostos a condições ambientais;
- *Densidade específica/massa específica*: Fator básico de projeto para definir quantidade de matéria e volume.

5.1.2 Fíler

Santana (1995) explica que Fíler é um material constituído de partículas minerais provenientes dos agregados graúdos e/ou miúdos empregados na mistura asfáltica, ou de outras fontes, como por exemplo, pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, etc., podendo melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, desde que obedecidos os limites para granulometria e plasticidade de acordo com a norma (DNER – EM 367/97).

5.1.3 Asfalto de Petróleo

No Brasil existem cerca de 204 mil Km de rodovias pavimentadas e cerca de 97% delas são pavimentadas com revestimento asfáltico, e este número vem crescendo a cada ano, tornando o revestimento asfáltico o mais utilizado no país.

O asfalto origina-se do petróleo, podendo ser por fontes naturais através da evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre ou produzidos em refinarias de petróleo. (REIS et al., 2010, p. 31).

5.1.3.1 Asfaltos naturais

Os asfaltos naturais são extraídos diretamente de depósitos naturais já em sua composição de quase uso. Foi descoberto pelos egípcios e mesopotâmios onde era utilizado principalmente para impermeabilizar e vedar tanto construções como objetos. (SENÇO, 2007).

5.1.3.2 Asfaltos produzidos em refinarias de petróleo

Em torno de 98% do asfalto produzido no mundo é obtido através do refino do petróleo. (REIS et al., 2010, p. 31).

A destilação do petróleo para a obtenção do asfalto iniciou-se nos Estados Unidos, em 1902, mas como pavimentação começou ser utilizada em 1909, de forma informal, sem técnicas de dosagem e os primeiros ensaios para qualificação do asfalto iniciaram em 1920. (SENÇO, 2007).

No Brasil a produção de asfalto iniciou-se em 1944, com petróleo importado da Venezuela. Antes eram utilizados asfaltos naturais importados em tambores de 200 litros. (SENÇO, 2007).

Segundo Reis et al. (2010), a média de consumo de asfalto no Brasil é 1,7 milhão de toneladas/ano, onde cerca de 95 % são utilizados em pavimentos, sendo denominados de cimento asfáltico de petróleo (CAP), para distinguir dos outros tipos de asfaltos.

5.1.3.3 Produção de Asfalto

A produção do asfalto se dá através da destilação do petróleo por uma torre, onde, por diferenças de temperatura do topo até a base, obtêm-se diferentes produtos como gasolina, diesel, querosene entre outros. (SENÇO, 2007).

Conforme Senço (2007) existem diversos processos de destilação de modo a se obter o asfalto, sendo eles: destilação seca, destilação a vapor e destilação a vácuo, que pode ser precedida por destilação atmosférica.

5.1.3.4 Destilação seca

Tipo de destilação usado para se obter combustíveis e gasolina.

5.1.3.5 Destilação a vapor

Também conhecida como destilação fracionada, consiste em introduzir vapor seco do destilador, produzindo a vaporização dos produtos voláteis, diminuindo a decomposição do destilado e do resíduo.

5.1.3.7 Cimento Asfáltico de petróleo (CAP)

Como citado no item 5.1.3.2 o asfalto utilizado em pavimentação pode ser denominado como CAP, onde é um produto semi-sólido em temperaturas baixas, visco elástico em temperatura ambiente e líquido em altas temperaturas. (Bernucci et al. 2007, p. 26).

Reis et al. (2010, p.32) explica que os CAPs apresentam boas propriedades aglutinantes, são flexíveis, impermeabilizantes e resistem a ação da maioria dos produtos inorgânicos e duráveis. O CAP também possui a capacidade de resistir aos esforços de desagregação produzida pelas cargas dos veículos.

Atualmente são cinco tipos de CAP convencionais utilizados no Brasil, segundo Senço (2007), estão divididos de acordo com a sua capacidade de penetração, sendo eles: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100, CAP 100-120 e CAP 150-200.

A norma brasileira que regulamenta o CAP convencional é a norma DNIT 095/2006-EM, na TAB. 1 contem as características dos tipos CAP utilizados no Brasil:

Tabela 1 - Especificações para asfalto convencional

Características	Unidades	Limites				Métodos		
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de amolecimento	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt-Furol								
a 135°C	s	192	141	110	80	NBR 14950	E102	ME 004/94
a 150°C	s	90	50	43	36			
a 177°C	s	40-150	30-150	15-60	15-60			
Viscosidade Brookfield								
a 135°C, SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402	
a 150°C, SP 21, mín.	cP	203	112	97	81			
a 135°C, SP 21, mín.	cP	76-285	57-285	28-114	28-114			
Índice de susceptibilidades térmica		1,5 a 0,7	1,5 a 0,7	1,5 a 0,7	1,5 a 0,7			
Ponto de fulgor mínimo.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloetireno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25°C, mínimo.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163° C, 85 mín.								
Varição em massa, máx.	%massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25°C	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida.	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Norma DNIT 095/2006-EM

5.1.4 Tipos de misturas asfálticas a quente

As misturas asfálticas a quente são divididas de acordo com a graduação dos agregados e Fíler, Bernucci et al. (2007) classifica as misturas a quente como sendo:

- **graduação densa:** curva granulométrica contínua e bem graduada, composto de poucos vazios, os agregados menores preenchem o vazio dos maiores. Exemplo: Concreto Betuminoso usinado a Quente (CBUQ);
- **graduação aberta:** curva granulométrica uniforme com agregados quase do mesmo tamanho, proporcionando muitos vazios. Este tipo de mistura é característica de revestimentos drenantes devido a sua porosidade que permite a percolação de água no meio da mistura asfáltica. Exemplo: Camada Porosa de Atrito (CPA).
- **graduação descontínua:** curva granulométrica com grãos de maiores dimensões em quantidade maior que os de dimensões intermediárias, preenchidos com grãos finos, trazendo um maior contato entre os grãos graúdos e tornando o revestimento mais resistente. Exemplo: matriz pétreo asfáltica (stone matriz asphalt - SMA); mistura sem agregados de certa graduação (gap-graded).

5.1.4.1 Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

Um dos tipos de misturas a quente mais utilizado no Brasil é o concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) ou simplesmente (CA), também comumente chamado de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

Balbo (2007) define CBUQ como sendo um material para construção de revestimentos de pavimentação, obtido através da mistura e homogeneização de agregados minerais em geral bem graduados, de material fino de enchimento – fíler e de cimento asfáltico de petróleo (CAP).

Segundo a Norma DNIT 031/2006-ES, a composição do concreto asfáltico deve atender os requisitos mostrados na TAB. 2, com as seguintes tolerâncias no que se diz respeito à granulometria e também aos percentuais de ligante asfáltico determinados pelo projeto da mistura.

Tabela 2 - Composição concreto asfáltico

Peneira de malha quadrada		% em massa passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	±7%
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
1/2"	12,7	-	-	80-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5%
Nº 10	2	20-40	20-45	22-50	±5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	±3%
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0-7,0 Camada de ligação (Binder).	4,5-7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5-9,0 Camada de Rolamento	±0,3%

Fonte: Norma DNIT 031/2006 - ES

Para a produção do CBUQ, antes da usinagem dos materiais, os agregados deverão ser corretamente dosados por meio de unidades de classificação. A norma DNIT 031/2006-ES regulamenta alguns procedimentos quanto a fabricação e aplicação do CBUQ:

- a) **Materiais:** Os materiais constituintes do concreto asfáltico são respectivamente agregados graúdos, agregados miúdos, material de enchimento Fíler e ligante asfáltico, os quais devem satisfazer às Normas pertinentes, e às Especificações aprovadas pelo DNIT.
- b) **Equipamentos:** Os equipamentos necessários à execução dos serviços serão adequados aos locais de instalação das obras, atendendo ao que dispõem as especificações para os serviços. A norma define os equipamentos mínimos para produção da mistura:
 - Depósito para ligante asfáltico;
 - Silos para agregados;
 - Usina para misturas asfálticas;
 - Caminhões basculantes para transporte da mistura;
 - Equipamento para espalhamento e acabamento;
 - Equipamento para compactação.

- c) **Execução:** Deve-se esperar no mínimo 7 dias após a aplicação da imprimação para início da execução do revestimento. A temperatura do ligante deve estar entre 107° e 177°; Os agregados devem ser aquecidos de 10° a 15° acima da temperatura do ligante não excedendo 177°; a produção da mistura deve ser feito em usinas apropriadas; o transporte do material ate o local deve ser feito em caminhões específicos cobertos com lona; o material deve ser distribuído por pavimentadoras e compactado por rolos pneumáticos e rolo metálico liso, onde os rolos pneumáticos devem estar devidamente calibrados segundo a Norma DNIT 031/2006-ES.

6 ASFÁLTOS MODIFICADOS

De modo geral, muitos pavimentos sofrem desgastes em um curto período de tempo, ocasionando patologias que prejudicam o conforto e segurança de quem trafega por ela.

As trincas por fadiga e a deformação permanente nas trilhas de rodas são os principais problemas encontrados nos revestimentos asfálticos. Para Neves Filho (2004), a baixa resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas é uma das principais causas da deformação permanente das trilhas de rodas.

Uma das soluções para corrigir os problemas relacionados aos revestimentos asfálticos é adicionar elementos ao asfalto para que melhore as características técnicas e conseqüentemente aumente a vida útil do revestimento. Hoje já são usados e testados diversos agentes que melhoram a resistência e a adesividade do revestimento asfáltico, onde se destacam os agentes rejuvenescedores, borracha moída de pneu e polímeros.

6.1 Asfalto modificado com adição de borracha de pneu

O Asfalto Borracha, como conhecido nacionalmente, é um tipo de asfalto com a adição da borracha moída de pneus. São realizadas de duas formas:

- Via seca: Consiste na adição direta da borracha no misturador da usina de asfalto ou na própria obra. Neste caso a borracha entra como agregado,

apesar da melhoria técnica no produto final, neste processo se perde a maior parte das propriedades da borracha.

- Via úmida: Segundo a norma DNIT 112/2009-ES, a borracha de pneu é adicionada ao asfalto a quente em usina própria, tendo uma maior homogeneidade e aproveitando ao máximo as características de elasticidade e resistência da borracha.

6.1.1 História do Asfalto Borracha

Os primeiros estudos da aplicação da borracha de pneu em revestimentos asfálticos se deram na década de 40 nos Estados Unidos. Suas primeiras utilizações foram realizadas na década de 60 no Arizona, nos EUA, em reparos e pequenas aplicações.

No Brasil, os primeiros passos para a utilização do Asfalto Borracha veio junto com a criação do artigo nº 2 da resolução 258/99 do CONAMA-Conselho Nacional de Meio Ambiente, onde proíbe o descarte do pneu no meio ambiente, inclusive sua queima. Com essa resolução veio a necessidade de se encontrar novos meios de utilização para os pneus usados, assim surgiu a ideia de se utilizar a borracha do pneu aplicado ao revestimento asfáltico, como já era realizado em outros países.

Com o avanço dos estudos, além da viabilidade técnica do produto, vem se estudando principalmente os benefícios desta utilização ao meio ambiente.

6.1.2 Obtenção do pó da borracha de pneu

A obtenção do pó de borracha é realizada através da moagem do pneu em usinas recicladoras, ou mesmo em empresas especializadas em recapagem de pneu. Possuem três tipos de processos para obtenção do pó. (Oda e Fernandes Jr., 2002).

- *Criogenia*: é acrescentado nitrogênio líquido a borracha moída, após seu congelamento é feito um esmagamento até se adquirir a granulometria desejada.
- *Regeneração*: é feita uma extração por solvente onde se separa a borracha dos demais componentes, como metais, tecidos entre outros. As lascas moídas do pneu são submetidas á vapores d'água junto com produtos

químicos, como álcalis e óleos minerais, até se adquirir o produto necessário.

- *Moagem a frio*: tipo de obtenção mais comum e barato, onde o pneu é moído e peneirado, depois é passado por imãs que retiram as partes metálicas restantes.

6.1.3 Adição da borracha de pneu ao asfalto

Quando a borracha de pneu moída é adicionada diretamente ao asfalto, ela o transforma definitivamente, pois há uma maior eficiência na transferência da química dos elementos existentes na borracha, ocasionando assim maior resistência ao envelhecimento e maior elasticidade.

A norma DNIT 111/2009-EM define que o teor de borracha deve ser no mínimo 15% em peso, incorporado ao asfalto. Geralmente são utilizados de 15% a 20% nas usinas de asfalto.

A norma DNIT 111/2009-EM também define que as partículas de pó de borracha utilizada devem ser passantes na peneira de nº 40.

A borracha é misturada ao ligante em um terminal especial, a altas temperaturas, por agitação com alto cisalhamento, processo conhecido com “*Terminal blending*”, onde se obtém um produto estocável e homogêneo.

6.1.4 Normas e características técnicas do Asfalto Borracha

Apesar do uso do Asfalto Borracha ter crescido nos últimos anos no Brasil, as normas que a regulariza não teve grandes avanços. Durante seus primeiros anos se utilizou a norma ASTM 6114-97 como referência para determinação das características do Asfalto Borracha.

A norma ASTM 6114-97 Standard Specification for Asphalt Rubber Binder – Norma de especificação para Asfalto Borracha define as características básicas do ligante modificado.

Em 2009 foram criadas as primeiras normas brasileiras relacionadas ao Asfalto Borracha, sendo elas com base na norma ASTM 6114-97:

- Norma DNIT 111/2009-EM Pavimentação Flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” regulamenta o material utilizado na mistura.
- Norma DNIT 112/2009-ES Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com Asfalto Borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” regulamenta o processo de execução e controle de qualidade do concreto asfáltico.

A TAB. 3 indica as características técnicas do asfalto borracha de acordo com a norma DNIT 111/2009-EM.

Tabela 3 - Especificações para o asfalto borracha

Características	Unid.	Asfalto Borracha		Metodos de ensaio
		Tipo AB 8	Tipo AB 22	
Penetração, 100g, 5s, 25° C	0,1 mm	30-70	30-70	DNER ME 003/99
Ponto de amolecimento, min, °C	°C	55	57	DNER ME-247/94
Viscosidade Brookfield, 175°, 20rpm, Spindle 3	cP	800-2000	2200-4000	NBR 15529
Ponto de Fulgor, min.	°C	235	235	DNER ME148/94
Recuperação esláica, Ductilômetro, 25°, 10 cm, min	%	50	55	NBR 15086:2006
Estabilidade à estocagem, máx	°C	9	9	DNER ME-384/99
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°:				
Varição em massa, máx.	%	1	1	NBR 15235:2006
Varição do ponto de amolecimento, máx.	°C	10	10	DNER ME-247/94
Porcentagem de penetração original, mín.	%	55	55	DNER ME 003/99
Porcentagem de recuperação elástica original. 25°C 10 cm, mín.	%	100	100	NBR 15086:2006

Fonte: Norma DNIT 111/2009-EM

6.2 Asfalto modificado por polímero ou asfalto polímero

O asfalto modificado por polímero já é amplamente utilizado no Brasil, é um tipo de asfalto que apresenta características de estabilidade maiores que o asfalto convencional.

6.2.1 História

Segundo Bernucci et al. (2007, p.64), misturas asfálticas modificadas por polímeros foram introduzidas na Alemanha na década de 1970. E também nesta época foram realizados na Itália revestimentos asfálticos com polietileno adicionado na própria usina misturadora.

No Brasil, os primeiros estudos sobre a adição do polímero em ligantes asfálticos se deu a partir de 1974, sua primeira experiência de utilização foi em um trecho de 275m na BR-116, Rio – São Paulo.

Com o tempo, foram estudados novos tipos de polímeros, e hoje são muito utilizadas nas rodovias brasileiras, inclusive as refinarias de petróleo já fornecem alguns tipos asfalto modificado por polímeros.

6.2.2 Polímeros

Para Bernucci et al. (2007, p.59), polímeros são macromoléculas sintéticas, de estrutura simples, constituída de unidades estruturais repetidas em sua longa cadeia, denominadas monômeros.

De acordo com (Mano (1985,1991) e Leite (1999) apud Bernucci et al., 2007, p.62), os polímeros podem ser classificados em:

- *Termorrígidos*: são polímeros que não se fundem, sofrem degradação até certa temperatura e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Por exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- *Termoplásticos*: são polímeros que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;
- *Elastômeros*: são os polímeros que se decompõem antes de amolecer quando aquecidos, mantendo suas propriedades elásticas. Por exemplo: SBR;
- *Elastômeros termoplásticos*: são polímeros que apresentam comportamento elástico a baixas temperaturas, e comportamento termoplástico a altas temperaturas. Por exemplo: SBS e EVA.

6.2.3 Tipos de polímeros utilizados em pavimentação

Os polímeros mais utilizados em modificação do asfalto são os do tipo elastômeros termoplásticos. Segundo Bernucci et al. (2007, p.64) os mais utilizados são: copolímeros em bloco de estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS), acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e acetado de vinila (EVA).

Algumas refinarias já fornecem o asfalto modificado com o polímero, o mais utilizado é o asfalto polímero SBS estileno-butadieno-estileno.

6.2.4 Normas e características técnicas do CAP modificado por polímeros

Norma brasileira que regulariza as características técnicas do Asfalto modificado por polímeros elastoméricos é a DNIT 129/2011-EM. (TAB. 4)

Tabela 4 - Especificações para asfalto polímero

Características	Unidade	55/75-E	60/85-E	65/90-E	Método de ensaio	
		Limite da especificação			ABNT/NBR	DNIT-ME
Penetração 25°C, 5s, 100g	0,1 mm	45-70	40-70	40-70	-	155/2010
Ponto de amolecimento, mín.	°C	55	60	65	-	131/2010
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	11341	-
Viscosidade Brookfield a 135°, spindle21, 20 rpm, máx.	cP	3000	3000	3000	15184	-
Viscosidade Brookfield a 150°, spindle21, 50 rpm, máx.	cP	2000	2000	2000	15184	-
Viscosidade Brookfield a 177°, spindle21, 100 rpm, máx.	cP	1000	1000	1000	15184	-
Ensaio de separação de fase, máx.	°C	5	5	5	15166	-
Recuperação elalástica a 25°C, 20cm, mín.	%	75	85	90	-	130/2010
Efeito do calor e do ar-RTFOT, 163°C, 85 min.						
Variação da massa, máx.	%massa	1	1	1	15235	
Variação do PA	°C	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7	-	131/2010
Porcentagem de penetração original, mín.	%	60	60	60	-	155/2010
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín.	%	80	80	80	-	130/2010

Fonte: Norma DNIT 129/2011-EM

7 VANTAGENS DO USO DO ASFALTO BORRACHA

A utilização do asfalto borracha traz vantagens em vários segmentos, seja em questões técnicas, questões ambientais e questões econômicas.

7.1 Questões Técnicas

O uso do Asfalto Borracha resulta em revestimentos com maior resistência ao trincamento e as deformações permanentes. (TECHNE, 2007).

O negro-fumo, substância presente na borracha para aumentar a resistência do pneu ao calor e aos raios infravermelhos e ultravioletas, quando misturado ao asfalto torna o revestimento mais resistentes a essas intempéries, reduzindo o envelhecimento precoce do revestimento. (TECHNE, 2007).

Greca (2009), explica o asfalto borracha envelhece menos durante a usinagem diminuindo a reflexão de trincas de fadiga, isso faz com que o pavimento tenha menos manutenções.

Segundo Greca (2008), a utilização do asfalto borracha também traz benefícios como:

- Maior durabilidade;
- Melhor aderência do pneu ao pavimento, trazendo mais estabilidade e segurança;
- Redução do ruído provocado pelo tráfego;
- Maior resistência a formação de trilhas de rodas;
- Reduz o spray causado pelos pneus em dias de chuva, dentre outros;
- Permite redução da espessura do pavimento;
- Melhor adesividade dos agregados.

7.2 Questões ambientais

A destinação dos pneus usados inservíveis sempre foi um grande problema econômico e ambiental, e uso da borracha de pneu em pavimentos veio como uma grande alternativa de destinação destes pneus, onde destina um grande volume de pneus inservíveis.

Para Bertollo (2002 apud Bernucci et al., 2007, p.75) um pneu de passeio típico (Goodyaer P195/75R14), com massa aproximada de 10 kg, contem:

- 2,5 kg de diferentes tipos de borracha sintética;
- 2,0 kg de diferentes tipos de borracha natural;
- 2,5 kg de 8 tipos de negro-de-fumo;
- 0,75 kg de aço para cinturas;
- 0,5 kg de poliéster e náilon;
- 0,25 kg de arames de aço;
- 1,5 kg de diferentes tipos de produtos químicos, óleos e pigmentos.

Todos esses produtos não se degradam facilmente no ambiente, então a solução é reaproveita-lo.

A revista Infraestrutura Urbana (2011), explica que para cada quilometro de asfalto borracha realizado são gastos cerca de 600 pneus.

Até 2011, mais de 8 mil Km de estradas brasileiras já tinham sido revestidos com o asfalto borracha, retirando do meio ambiente cerca de 5 milhões de pneus inservíveis.

Segundo a Revista Infraestrutura urbana (2011), o uso de pneus descartados na produção de asfalto gera uma economia de:

- Petróleo (R\$ 14 milhões/1.000 km em asfaltos);
- Pedras (R\$ 26 milhões/1.000 km);
- Energia (R\$ 10 milhões/1.000 km em transporte);
- Tempo de viagens (25 milhões veículos/ano);
- Aterros sanitários (R\$ 8 milhões/1.000 km).

7.3 Questões econômicas

O asfalto borracha pode possuir um custo mais elevado quando comparado ao asfalto convencional, devido a sua fabricação exigir temperaturas mais elevadas o controle tecnológico para que esse material mantenha-se nas características de projeto são mais trabalhosas aumentando o custo de operação. (GRECA, 2009).

Segundo a Revista Infraestrutura Urbana (2011), o Asfalto Borracha chega a ser até 30% mais caro que o Asfalto convencional.

Em 2009 foi feito um estudo comparativo realizado por uma empresa pioneira no uso do Asfalto Borracha, onde foi analisado um trecho de 30 km revestidos com asfalto borracha com o intuito de mostrar que a utilização do asfalto borracha quando aproveitado suas características técnicas pode tornar o mesmo com um custo menor quando comparado ao asfalto convencional. (GRECA, 2009).

O trecho foi revestido com uma camada de asfalto borracha de 3,5cm de espessura, camada essa que possui a mesma resistência e estabilidade que um trecho de asfalto convencional de 5 cm de espessura. (GRECA, 2009).

Nestas condições pode-se perceber que houve um consumo de 26.250 toneladas de asfalto convencional e 18.375 toneladas de asfalto borracha. O custo

de usinagem e aplicação e também o custo de asfalto no CBUQ do asfalto borracha foram de 15 a 20% mais caros que o asfalto convencional. A TAB. 5 mostra que se gasta menos quantidade de massa de asfalto borracha do que o asfalto convencional para o mesmo trecho de pavimento, tornando o custo final do pavimento revestido com asfalto borracha menor. (GRECA, 2009).

Tabela 5 - Comparativo de custo entre asfalto borracha e asfalto convencional

Grandezas	Cálculo	Unidades	Tipo de Asfalto		Diferença (%)	
			CAP 50/70	AMB		
A	Quantidade de massa Asfáltica no CBUQ Produzido	-	Ton.	26.250,00	18.375,00	-30,0
B	Custo de Usinagem/Aplicação por tonelada de CBUQ aplicado	-	R\$/Ton.	200,00	230,00	15,0
C	Quantidade de massa x custo de usinagem/aplicação	AxB	R\$	R\$ 5.250.000,00	R\$ 4.226.250,00	-19,5
D	Teor de Asfalto	-	% Peso	5,00	5,50	10,0
E	Custo de asfalto por tonelada	-	R\$/Ton.	1.150,00	1.550,00	34,8
F	Custo de Asfalto no CBUQ	AxDxE	R\$	R\$ 1.509.375,00	R\$ 1.566.468,75	3,8
G	Custo Total da Obra	C + F	R\$	R\$ 6.759.375,00	R\$ 5.792.718,75	-14,3

Fonte: GRECA (2009).

GRECA (2009) mostra que o asfalto borracha se torna mais viável do que o asfalto convencional.

8 MATERIAIS E MÉTODOS

Métodos científicos são conjuntos de atividades sistemáticas e racionais com o propósito de se alcançar objetivos de forma segura e econômica, traçando caminhos a serem seguidos, detectando erros e contribuir nas decisões dos cientistas. (MARCONI E LAKATOS, 2003).

Este trabalho buscou comparar amostras de asfalto modificado por polímeros, asfalto convencional e asfalto modificado por borracha moída de pneu.

8.1 Materiais utilizados na pesquisa

Para a realização do estudo foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Borracha moída de pneu proveniente do processo de recapagem.
- b) Asfalto (CAP 50/70)
- c) Asfalto modificado por polímeros SBS (60/85).
- d) Agregados de Gnaisse

8.2 Metodologia

A pesquisa abordada neste trabalho foi dividida em duas etapas:

- 1) Coleta, peneiramento e preparação da borracha moída de pneu.
- 2) Ensaios Laboratoriais.

8.2.1 Coleta da borracha moída de pneu

Para realização da pesquisa foram utilizados raspas de pneus de processo de recapagem. O material foi fornecido por uma empresa especializada em recapagem e reconstrução de pneus de veículos pesados da cidade de Formiga-MG.

8.2.2 Peneiramento da borracha moída de pneu

O peneiramento da borracha moída de pneu foi feita em peneiras conforme norma DNER 035/95. A granulometria da borracha moída foi de acordo com a Norma DNIT 111/2009-EM, onde descreve que as partículas utilizadas são as passantes na peneira de nº 40 (0,425 mm).

8.2.3 Adição da borracha moída de pneu ao asfalto

A norma DNIT NBR 111/2009-EM determina que a porcentagem de borracha moída acrescentada ao asfalto representa cerca de 15% a 20% da massa do asfalto. Neste trabalho foi estabelecido a quantidade de 18%, sendo a média descrita pela norma, de borracha moída em relação à massa do asfalto.

Os equipamentos e ferramentas utilizados para realização da mistura são:

- a) Vasilhame;
- b) Balança;
- c) Fogareiro;
- d) Termômetro.

O asfalto utilizado nesta mistura foi o CAP 50/70, escolhido devido ao fato de ser o tipo de asfalto mais utilizado em pavimentos flexíveis.

A borracha moída deve ser adicionada ao asfalto quando o mesmo estiver a uma temperatura constante de aproximadamente 170°, para o asfalto modificado alcançar a homogeneidade necessária deve ser misturado constantemente por um misturador manual ou mecânico durante 30 minutos. (Oda e Fernandes Jr., 2002).

8.2.4 Agregados utilizados

Como o objetivo do trabalho é mostrar o que cada tipo de asfalto contribui nas características do revestimento, não podemos deixar outros fatores interferir nesses resultados, e um desses fatores é o tipo e traço de agregados utilizados.

Na realização dos ensaios foram utilizados agregados provenientes de rochas de gnaiss. As curvas granulométricas desses agregados devem obedecer às normas específicas para cada tipo de asfalto.

Conforme descrito no item 4.1.4.1 deste trabalho deve-se utilizar como referência a Faixa “C” do DNIT, que se refere a faixa granulométrica do material utilizado em capa de rolamento.

A norma que descreve a granulometria da Faixa “C” do asfalto convencional é a DNIT 031/2006-ES conforme TAB. 6.

Tabela 6 - Faixa granulométrica "C" para asfalto convencional

Faixa "C" DNIT		
PENEIRAS	ASFALTO CONVENCIONAL	
	DNIT 031/2006 - ES	
	MÍNIMO	MÁXIMO
3/4"	100	100
1/2"	80	100
3/8"	70	90
4	44	72
10	22	50
40	8	26
80	4	16
200	2	10

Fonte: Norma DNIT 031/2006 – ES

A norma que descreve a granulometria da Faixa “C” do asfalto modificado por polímero é a DNER – ES 385/99 conforme descrito na TAB. 7.

Tabela 7 - Faixa granulométrica "C" para asfalto polímero

Faixa "C" DNIT		
PENEIRAS	ASFALTO POLÍMERO	
	DNER - ES 385/99	
	MÍNIMO	MÁXIMO
3/4"	100	100
1/2"	85	100
3/8"	75	100
4	50	85
10	30	75
40	15	40
80	8	30
200	5	10

Fonte: Norma DNER – ES 385/99

A TAB.8 mostra a granulometria da Faixa “C” referente ao Asfalto Borracha, de acordo com a norma DNIT 112/2009 – ES.

Tabela 8 - Faixa Granulométrica "C" para asfalto borracha

Faixa "C" DNIT		
PENEIRAS	ASFALTO BORRACHA	
	DNIT - 112/2009 - ES	
	MÍNIMO	MÁXIMO
3/4"	100	100
1/2"	80	100
3/8"	70	90
4	44	72
10	22	50
40	8	26
80	4	16
200	2	10

Fonte: Norma DNIT 112/2009 – ES

O traço utilizado deve obedecer às curvas granulométricas da Faixa "C", dos três tipos de asfalto, para que se mantenha o ensaio dentro das normas.

8.2.5 Ensaio laboratoriais

Para a realização do estudo em questão foram realizados alguns ensaios laboratoriais para a determinação de características determinantes para a comparação do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto modificado por polímeros.

Na execução deste comparativo foram realizados ensaios de penetração e ensaio para determinação de estabilidade e fluência, conhecido como ensaio de Marshall.

8.2.5.1 Ensaio de Penetração

A Norma DNER-ME 003/99, explica que o ensaio de penetração consiste em mostrar qual a distância em decímetros de milímetros que uma agulha padrão consegue penetrar verticalmente em uma amostra sobre condições de temperatura, carga e tempo pré-determinadas.

São definidos os seguintes aparelhos para executar o ensaio de penetração, conforme a norma DNER-ME 003/99:

- Recipiente de metal de forma cilíndrica e fundo plano, com as seguintes dimensões: para materiais de penetração menor que 200, o diâmetro interno do recipiente deve ser de 35 mm e o externo de 55 mm; para materiais de penetração maior que 200 e menor que 300 o diâmetro interno do recipiente deve ser de 55 mm e o externo de 70 mm;
- Penetrômetro que permite o movimento da haste que segura a agulha, sendo a massa da haste de $(47,5 \pm 0,05)$ g, e a massa da haste mais agulha deve ser de $(50,00 \pm 0,05)$ g. Para compor massas totais de 100 g e 200 g devem estar disponíveis massas de $(50,00 \pm 0,05)$ g e $(100,00 \pm 0,05)$ g. (FIG. 8);

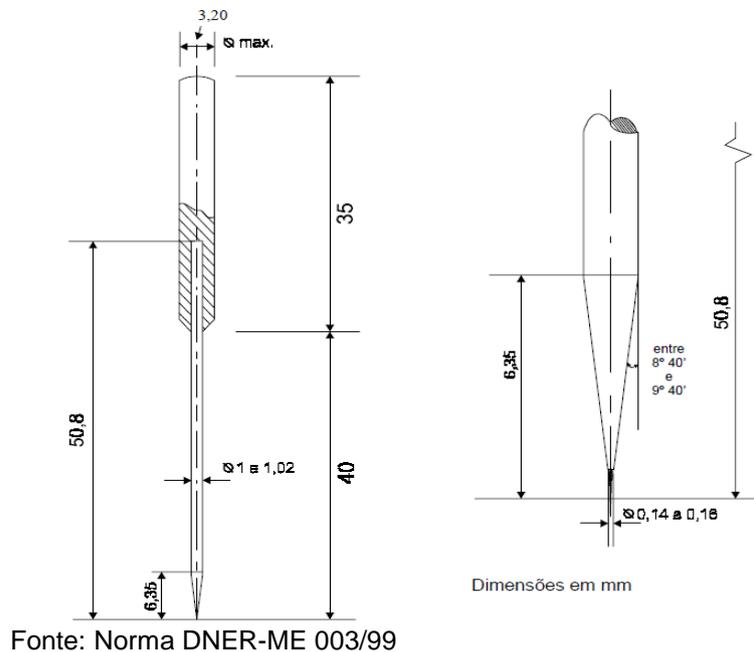
Figura 8 - Penetrômetro



Fonte: Autor (2015).

- Agulha de aço inoxidável tipo AISI 440-C, cujas dimensões são mostradas na FIG. 9;

Figura 9 - Dimensões da agulha do penetrômetro



- Banho d'água com capacidade mínima de 10 litros, com uma prateleira perfurada situada a 50 mm do fundo, e a lamina d'água sobre a amostra não deve ser inferior a 100 mm, e com capacidade de manter a temperatura de ensaio de $\pm 0,1$ C°. Deve se dar preferência ao uso de água destilada para evitar contaminações;
- Cuba de transferência cilíndrica, de vidro, com diâmetro interno livre de 90 mm, e altura livre acima da amostra de 20 mm;
- Termômetros graduados em 0,1 C°, com erro máximo na temperatura de ensaio de 0,1 C°;
- Cronometro graduado em 0,1 segundos, com precisão de $\pm 0,1$ segundos.

Para a realização deste ensaio foram utilizadas amostras do CAP 50/70, amostras de CAP 50/70 modificado pela borracha moída de pneu e amostras de CAP modificado por polímero SBS (60/85).

Os procedimentos de execução do ensaio também são definidos pela norma DNER-ME 003/99.

Primeiramente devem-se aplicar os procedimentos apropriados de segurança, manuseio dos materiais e operação dos equipamentos.

A primeira etapa consistiu na preparação do corpo de prova:

1. Aquecer a amostra em estufa, até que ela se torne fluida.
2. Em seguida sob agitação constante elevar a temperatura do asfalto de, no máximo 90°C acima do ponto de amolecimento (ABNT NBR 6560/85), no tempo máximo de 30 minutos tomando cuidado para não gerar bolhas de ar.
3. Derramar a amostra no recipiente de penetração de modo a ter uma altura de material após o resfriamento de no mínimo 10 mm maior que a penetração esperada.
4. Colocar a tampa no recipiente para proteger a amostra da poeira e deixar esfriar em temperatura ambiente entre 15 e 30°C, durante 60 a 90 minutos para o recipiente menor, e de 90 a 120 minutos para o recipiente maior.
5. Colocar a amostra e a cuba de transferência no banho d'água mantido na temperatura de ensaio $\pm 1^\circ\text{C}$, com os mesmos tempos citados para resfriamento a temperatura ambiente.

Depois de realizada a preparação das amostras, segue para o processo de realização do ensaio:

1. As condições padrões de ensaio são 25°C, 100g e 5 segundos.
2. Examinar suporte da agulha e haste, para verificar ausência de água e outros materiais estranhos, limpar a agulha com solvente específico e inserir no penetrômetro.
3. Colocar peso de 50g acima da agulha, de modo que a carga total seja de 100g para o conjunto de penetração.
4. Colocar o recipiente da amostra dentro da cuba de transferência e enche-la com água do banho d'água até cobrir toda a amostra.
5. Colocar a cuba de transferência sobre o prato e realizar o ensaio imediatamente.
6. Ajustar a agulha à superfície da amostra, fazendo com que a imagem da agulha refletida pela amostra coincida com sua imagem verdadeira, para obter a imagem refletida usa-se uma fonte de luz que a ilumine adequadamente.
7. Trazer o ponteiro para posição zero e ajustar a agulha à superfície da amostra e da leitura do mostrador do penetrômetro.

8. Liberar rapidamente a agulha durante o tempo especificado, ajustar o instrumento para medir a distância penetrada e anotar o valor.
9. Fazer três determinações na superfície da amostra distantes entre si e a 1 cm da borda.
10. Depois de cada penetração, retirar a cuba de transferência e o recipiente da amostra, do penetrômetro.
11. Recoloca-los no banho a temperatura especificada, limpar a agulha com solvente, enxugar com pano seco e limpo e repetir a operação novamente.
12. Para valores de penetração maiores que 200, devem-se utilizar no mínimo três agulhas.

8.2.5.2 Ensaio Marshall

O ensaio Marshall define a estabilidade e fluência de misturas betuminosas. A norma do DNER de regulamentação do ensaio é a DNER-ME 043/95.

A norma DNER-ME 043/95 explica que a estabilidade Marshall é a resistência máxima á compressão radial apresentada pelo corpo de prova, e a fluência Marshall é a deformação total apresentada pelo corpo de prova desde a carga inicial até a carga máxima expressa em décimos de milímetro.

O ensaio Marshall se divide em duas etapas, a primeira consiste na preparação do corpo de prova e determinação de alguns parâmetros como volume de vazios, volume de betume e volume de asfalto. E a segunda etapa consiste na compressão do corpo de prova para determinação da estabilidade e fluência.

A aparelhagem necessária para realização do corpo de prova e do ensaio de estabilidade e fluência determinada pela norma DNER-ME 043/95, é a seguinte:

- Prensa capaz de aplicar carga de até 39,2 KN com erro inferior de 24,5 N, podendo a prensa ser mecânica ou manual, com embolo movimentando-se a uma velocidade de 5 cm/min, equipada com um anel dinamométrico com capacidade de 22,2 KN com as sensibilidades de 44,5 N até 4,45 KN e de 111,2 N entre 4,45 KN e 22,2 KN, equipado com defletômetro, com graduação de 0,0025mm para medir avaliação de carga e encurtamentos. (FIG. 10);

Figura 10 - Prensa Marshall



Fonte: Autor (2015).

- Molde de compactação de aço, consistindo de anéis superior e inferior e de uma placa base. Para realização será necessária três moldes.
- Repartidores de amostra de 1,3 cm e de 2,5 cm de abertura;
- Estufa ou placa elétrica capaz de sofrer temperaturas de até 200°C, com variação de 2°C;
- Balança com capacidade de 5 kg, com precisão de 1g, capaz de permitir pesagem hidrostática;
- Bandeja metálica de cerca de 50 cm x 30 cm x 5 cm;
- Extrator de corpo de prova, de aço, em forma de disco;
- Peneiras de 25-19-9,5-4,8 e de 2,0mm de abertura para análise granulométrica;
- Colher de metal com capacidade de 30-50 ml, e cabo com cerca de 25 cm;
- Aparelhagem para mistura, preferência mecânica para deixar a mistura bem homogênea, com capacidade de cerca de 5 litros;
- Recipiente de aço estampado, cilíndrico com asa lateral isolante térmico e vertedouro, com capacidade de meio litro;
- Termômetro graduado em 2°C, de (10 a 200)°C;

- Termômetro graduado em 0,5°C, de (50-70)°C, para medir temperatura em banho d'água ou no ar;
- Espátula de aço com ponta redonda, com lamina de 18 cm de comprimento por 3 cm de largura;
- Base de compactação, perfeitamente estável, sem vibrações.
- Soquete de compactação de aço, com 4540g de massa e altura de queda livre de 45,72 cm,
- Medidor de fluência, com graduação de 0,25 mm;
- Paquímetro com exatidão de 1 mm;
- Banho d'água com capacidade para 9 corpos de prova, com prateleira de fundo plana e perfurada a 50 mm acima do fundo, onde o nível d'água deve ficar cerca de 3 cm acima dos corpos-de-prova, com aquecimento preferivelmente elétrico;
- Molde de compressão de aço;
- Luva de amianto;
- Relógio de alarme para intervalos de tempo de até 60 minutos, com resolução de 1 minuto.
- Parafina, pincel e papel de filtro de diâmetro 101,6 mm;
- Pinça de aço inoxidável ou de alumínio, para colocar e retirar os corpos-de-prova do banho d'água;

Após conferir toda aparelhagem necessária para a realização dos ensaios, começa-se a primeira etapa, que consiste na preparação dos corpos-de-prova.

O primeiro passo é a determinação das temperaturas de mistura e compactação. A norma DNER-ME 043/95, define alguns requisitos para determinação das temperaturas:

- a) A temperatura que o asfalto deve ser aquecido para ser misturado aos agregados, é aquela na qual apresenta uma viscosidade de (170 ± 20) cST ou (85 ± 10) Ssf para o cimento asfáltico;
- b) A temperatura para compactação da mistura é a qual o asfalto apresenta uma viscosidade de (280 ± 30) cSt ou (140 ± 15) Ssf para o cimento asfáltico;

O segundo passo é a preparação das misturas:

- a) Devem ser preparados no mínimo três corpos-de-prova para cada dosagem de mistura betuminosa;
- b) Secar os agregados em estufa a (105 a 110)°C, e separá-los de acordo com as seguintes frações:
 - I. 25 a 19 mm
 - II. 19 a 9,5 mm
 - III. 9,5 a 4,8 mm
 - IV. 4,8 a 2 mm
 - V. Passando na peneira de 2 mm;
- c) Pesar os agregados para um corpo-de-prova de cada vez, em recipientes separados, nas quantidades de cada fração, que após mistura com asfalto produza corpos-de-prova de 1200 g e (63,5 ± 1,3) mm de altura;
- d) Repetir o procedimento para os outros corpos-de-prova;
- e) Logo após, colocar os recipientes em placa quente ou em estufa e aquecer a temperatura de aproximadamente 10 a 15°C acima da temperatura de aquecimento do asfalto, conforme descrito anteriormente, a temperatura não deve ultrapassar 177° C.
- f) Misturar os agregados de cada recipiente, e em cada um deles abrir uma cratera para recebimento do ligante que deve ser aí pesado. Obedecendo as temperaturas descritas nesta norma;
- g) Efetuar uma rápida mistura de 2 a 3 minutos, até coberta a cobertura dos agregados.

O terceiro passo é a compactação das misturas:

- a) O molde de compactação e a base do soquete devem estar limpos e aquecidos em água fervente em estufa ou placa a (90 a 150)°C.
- b) Colocar o molde em posição no suporte de compactação e introduzir nele uma folha de papel-filtro cortado de acordo com a seção do molde. Colocar no molde a mistura de uma só vez (2 min). Acomodar a mistura quente com 15 golpes vigorosos de espátula no interior e ao redor do molde e 10 no centro da massa, remover o anel superior e alisar a mistura com uma colher ligeiramente aquecida;

- c) Recolocar o anel superior e aplicar com soquete com determinado número de golpes sobre a mistura, com altura de queda-livre de 45,72 cm. Remover o anel superior e inverter o anel inferior e forçar com o soquete a mistura até atingir a placa-base, e depois aplicar o mesmo número de golpes no corpo-de-prova invertido.
- d) Após a compactação, o corpo-de-prova é retirado do anel inferior e colocado em repouso durante no mínimo 12 h, à temperatura ambiente. A altura do corpo-de-prova deverá ser de $(63,5 \pm 1,3)$ mm, medida com o paquímetro em quatro posições opostas.

Nota 1: Deve se ficar atento durante todo o ensaio a temperatura dos materiais e do corpo-de-prova, atendendo a temperaturas descritas nesta norma.

Após obter três corpos de prova para cada tipo de ligante utilizado, deixa-o resfria-los e posteriormente dá-se início à realização dos ensaios.

Primeiramente devem-se pesar os corpos de prova, obtendo o peso no ar (Par) de cada um. Feito isso, deixa-se os corpos de prova submersos em um tanque de água para preencher os vazios e realiza uma nova pesagem dos corpos de prova submersos (Psub). Como a densidade específica da água é conhecida ($\rho_a=1,0$ g/cm³), obtemos o volume do corpo de prova moldado através da equação:

$$V = \frac{(P_{ar} - P_{sub})}{\rho_a} \quad (1)$$

Onde:

V= volume do corpo de prova [cm³];

Par= peso do corpo de prova ao ar [g];

Psub= peso do corpo de prova submerso [g];

ρ_a = densidade específica da água [g/cm³].

Após obtermos o volume do corpo de prova, obtemos a densidade aparente (ρ_{ap}) conforme equação:

$$\rho_{ap} = \frac{P_{ar}}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente (g/cm³);

Na realização deste ensaio também temos que encontrar a densidade máxima teórica (DMT) do CBUQ, para obter o percentual de material de cada material utilizado na mistura, é determinada pela equação:

$$DMT = \frac{100}{\left(\% \frac{CAP}{\rho_{CAP}}\right) + \left(\frac{100 - \%CAP}{\rho_{real\ dos\ agregados}}\right)} \quad (3)$$

Onde:

DMT = densidade máxima teórica [g/cm³];

% CAP = percentual de CAP, em relação à massa total da mistura asfáltica;

ρ_{CAP} = densidade do CAP-20 [g/cm³];

$\rho_{real\ agregado}$ = densidade real de todos os agregados componentes da mistura betuminosa [g/cm³].

Conhecido as densidades aparentes e teóricas podemos obter o volume de vazios (VV), que são vazios de ar na mistura asfáltica, dado pela equação:

$$VV = 100 - \left(\left(\frac{\rho_{ap}}{DMT} \right) \times 100 \right) \quad (4)$$

Onde:

V.v = volume de vazios, em porcentagem.

Obtemos também o volume cheio de betume (VCB), obtidos na equação:

$$VCB = \left(\% \frac{CAP}{\rho_{CAP}} \right) \times \rho_{ap} \quad (5)$$

Onde:

VCB = volume cheio de betume, em porcentagem.

Devemos calcular também o volume de vazios no agregado mineral (VAM) que são os vazios preenchidos por ar e asfalto, dados pela equação:

$$VAM = VV + VCB \quad (6)$$

Onde:

VAM=volume de vazios no agregado mineral, em porcentagem.

Por fim obtemos a relação betume vazios (RBV), através da equação:

$$RBV = \left(\frac{VCB}{VAM} \right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

RBV=relação betume vazios, em porcentagem.

Os valores de VV, RBV e VAM, devem estar dentro da norma para cada tipo de asfalto utilizado.

Os valores de VV e RBV para asfalto convencional CAP 50/70 e asfalto modificado por polímeros, devem estar dentro do limitado conforme TAB. 9.

Tabela 9 - Valores de VV e RBV para asfalto polímero e asfalto convencional

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento
Volume de Vazios (%)	DNER-043	3 a 5
R.B.V (%)	DNER-043	75 a 82

Fonte: Norma DNIT 031/2006 – ES

O valor de VAM do asfalto convencional CAP 50/70 e asfalto modificado por polímeros devem estar de acordo com a TAB. 10.

Tabela 10 - Valores de VAM para asfalto convencional e asfalto polímero

VAM - Vazios de agregado mineral		
Tamanho nominal máximo do agregado		VAM mínimo (%)
#	mm	
1 1/2"	38,1	13
1"	25,4	14
3/4"	19,1	15
1/2"	12,7	16
3/8"	9,5	18

Fonte: Norma DNIT 031/2006 - ES

Para o asfalto borracha os valores de VV e RBV devem estar dentro do especificado. (TAB. 11).

Tabela 11 - Valores de VV e RBV para asfalto borracha

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento
Volume de Vazios (%)	DNER-043	3 a 5
RBV (%)	DNER-043	65-78

Fonte: Norma DNIT 112/2009 – ES

O valor de VAM do asfalto borracha deve seguir as especificações conforme TAB. 12.

Tabela 12 - Valores de VAM para asfalto borracha

VAM - Vazios de agregado mineral		
Tamanho nominal máximo do agregado		VAM mínimo (%)
#	mm	
1 1/2"	38,1	13
1"	25,4	14
3/4"	19,1	15
1/2"	12,7	16
3/8"	9,5	17

Fonte: Norma DNIT 112/2009 – ES

Após a obtenção dos parâmetros anteriores se inicia os procedimentos para realização do ensaio de estabilidade e fluência, conforme descrito nos itens abaixo:

- a) Os corpos-de-prova são imersos em banho-maria a $(60 \pm 1)^\circ \text{C}$, por um período de 30 a 40 minutos;
- b) Em seguida o corpo-de-prova é colocado no molde de compressão que deve estar nas temperaturas de $(21 \text{ a } 38)^\circ \text{C}$, limpos e com pinos-guia lubrificados;
- c) O molde de compressão é posicionado na prensa segundo a geratriz e o medidor de fluência é colocado e ajustado na posição de ensaio;
- d) O êmbolo da prensa deve ser elevado a uma velocidade de 5 cm por minuto até o rompimento do corpo-de-prova, o que é indicado no defletômetro pela indicação de um máximo. Anota-se a leitura desse máximo e é convertido em N (kgf), pelo gráfico de calibração do anel dinamométrico;

- e) A carga, em N (kgf), necessária para produzir o rompimento do corpo de prova à temperatura de norma é anotada como “estabilidade de lida”. Este valor deverá ser corrigido para temperatura do corpo-de-prova ensaiado, multiplicando-se por um fator que é a função da espessura do corpo-de-prova ou através da seguinte fórmula:

$$f = 927,23 (h^{\wedge} - 1,64) \quad (8)$$

Onde:

f=fator

h=espessura do corpo de prova

O resultado obtido através disso é o valor da estabilidade Marshall.

- f) O valor de fluência se obtém junto ao da estabilidade. Durante a aplicação de carga, a luva-guia do medidor de fluência será firmada, com a mão, contra o topo do segmento superior do molde de compressão, diretamente sobre um dos pinos-guias. A pressão da mão sobre a luva do medidor de fluência será relaxada, no momento em que o corpo de prova se romper, momento em que será lido e anotado o valor de fluência;
- g) O valor de fluência também pode ser obtido através da substituição do medidor de fluência por uma defletômetro;
- h) Os valores de estabilidade e fluência se dão através da média obtida nos três corpos-de-prova, sendo a estabilidade expressa em N (kgf), e a fluência expressa em 0,25 mm.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa do trabalho serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais realizados pelo autor. Conforme descrito no item 7.2 deste trabalho a realização das análises foram divididas em etapas, que serão descritas nos próximos itens.

9.1 Coleta e peneiramento e preparação da borracha moída de pneu

Conforme descrito no item 7.2.1 do presente trabalho, a borracha moída de pneu foi obtida através do processo de recapagem de pneus de veículos pesados, foram coletados cerca de 40 litros do material bruto, conforme mostra a FIG. 11.

Os pneus de veículos pesados sofrem muitos danos devido aos desgastes excessivos de rodagem, logo são fabricados com materiais resistentes e substâncias que aumentam a vida útil dos mesmos, substâncias essas que irão contribuir para a resistência e qualidade do asfalto.

Figura 11 - Borracha moída de pneu em estado bruto



Fonte: Autor (2015).

A borracha de pneu foi coletada diretamente da máquina de raspagem de pneu, esse material bruto continha muita sujeira e raspas grandes de pneu, onde foi necessário um pré-peneiramento para retirada de materiais indesejados. O peneiramento deste material bruto foi feito utilizando uma peneira tradicional do tipo “café”, conforme mostra a FIG.12.

Figura 12 - Pré-peneiramento da borracha moída de pneu



Fonte: Autor (2015).

Após o peneiramento obteve-se um material mais homogêneo e livre de materiais indesejados. (FIG.13).

Figura 13 - Borracha moída de pneu após pré-peneiramento



Fonte: Autor (2015).

Com um material mais homogêneo em mãos seguiu-se para próxima etapa do peneiramento, que foi realizado em laboratório a fim de se obter um material na granulometria exigida pela norma DNIT 111/2009-EM onde o material utilizado deve ser passante na peneira de nº 40, conforme ilustra a FIG. 14(A).

Figura 14 - Peneiramento da borracha moída de pneu em peneira granulométrica



Fonte: Autor (2015).

Também foi obtido um material reserva passante na peneira nº20 e retida na peneira de nº40, material esse que não houve necessidade de ser utilizado. Após o peneiramento foram obtidos 350g de material passante na peneira de nº 40(A) e 800g de material passante na peneira de nº20(B). (FIG. 15).

Figura 15 - Pó de borracha de pneu após peneiramento



Fonte: Autor (2015).

Na raspagem dos pneus, a raspadora acaba atingindo a parte metálica do pneu onde a borracha moída acaba contendo algumas limalhas de aço, estas

limalhas podem influenciar nos resultados dos ensaios. Para retirar essas limalhas de aço foi utilizado um imã, conforme mostra FIG. 16 sendo passado no pó de borracha entre 3 a 5 vezes até obter um material livre de elementos metálicos. (FIG.17).

Figura 16 - Retirada de limalhas de aço com uso do imã



Fonte: Autor (2015).

Figura 17 - Verificação de limalhas de aço no pó de borracha



Fonte: Autor (2015).

Depois de realizado todo o peneiramento necessário e retirada de materiais indesejados, obteve-se um material limpo e homogêneo pronto para utilização nos ensaios, conforme ilustra a FIG.18.

Figura 18 - Pó de borracha depois de retirada as limalhas de ferro



Fonte: Autor (2015).

9.2 Ensaio laboratoriais

Com o pó de borracha de pneus em mãos foi dado início aos procedimentos laboratoriais. Os ensaios foram realizados em uma Usina de Asfalto no município de Carmo do Cajuru-Mg. Para obtenção dos resultados, os procedimentos laboratoriais foram divididos em sub etapas, sendo elas:

- Coleta das amostras de asfalto;
- Determinação dos agregados utilizados na mistura;
- Mistura do pó de borracha de pneu ao asfalto;
- Ensaio de penetração;
- Ensaio Marshall.

9.2.1 Coleta das amostras de asfalto

Para a realização dos ensaios foram coletados cerca de 1800g de asfalto CAP 50/70 utilizados nas misturas do asfalto convencional e do asfalto borracha, e cerca de 900g do asfalto modificado por polímero SBS (60/85) utilizado na mistura do asfalto modificado por polímeros. (FIG.19), (FIG.20).

Figura 19 - Coleta das amostras de asfalto



Fonte: Autor (2015).

Figura 20 - Enchimento dos recipientes de amostra com o asfalto



Fonte: Autor (2015).

Após coletados os asfaltos, as amostras dos mesmos foram levadas para uma estufa mantendo-os a 160°C , de acordo com FIG.21, de modo a manter uma temperatura próxima da ideal para realização dos ensaios.

Figura 21 - Estufa utilizada para aquecimento dos agregados e asfaltos



Fonte: Autor (2015).

9.2.2 Determinação dos agregados utilizados

Na realização dos ensaios foi utilizado um traço de agregados provenientes de rocha de gnaiss já utilizado pela usina de asfalto, onde se enquadra na Faixa “C” DNIT 031/2006 – ES. A TAB.13 mostra detalhadamente o traço utilizado nas misturas.

Tabela 13 - Composição dos agregados na mistura betuminosa

Composição da mistura utilizada							
%	50			50			GRANULOMERIA DA MISTURA
Peneiras	PEDRISCO			PÓ DE PEDRA			
3/4"	100	50	50	100	50	50	100
1/2"	90,653	50	45,3	100	50	50	95,33
3/8"	55,364	50	27,7	100	50	50	77,68
4	32,3	50	16,2	94,65	50	47,33	63,48
10	21,14	50	10,6	62,65	50	31,32	41,9
40	11,85	50	5,9	31,39	50	15,69	21,62
80	1,66	50	0,8	19,7	50	9,85	10,68
200	0	50	0,4	9,68	50	4,84	5,22

Fonte: Autor (2015).

Conforme descrito no item 7.2.4 deste trabalho a curva granulométrica utilizada deve atender as especificações de norma para cada tipo de asfalto, e

comparando a curva granulométrica utilizada com as especificações de norma para cada tipo de asfalto obtivemos os seguintes resultados:

- 1) Faixa granulométrica utilizada comparada com a faixa "C" da norma DNIT 031/2006 – ES, para asfalto convencional conforme demonstra TAB. 14

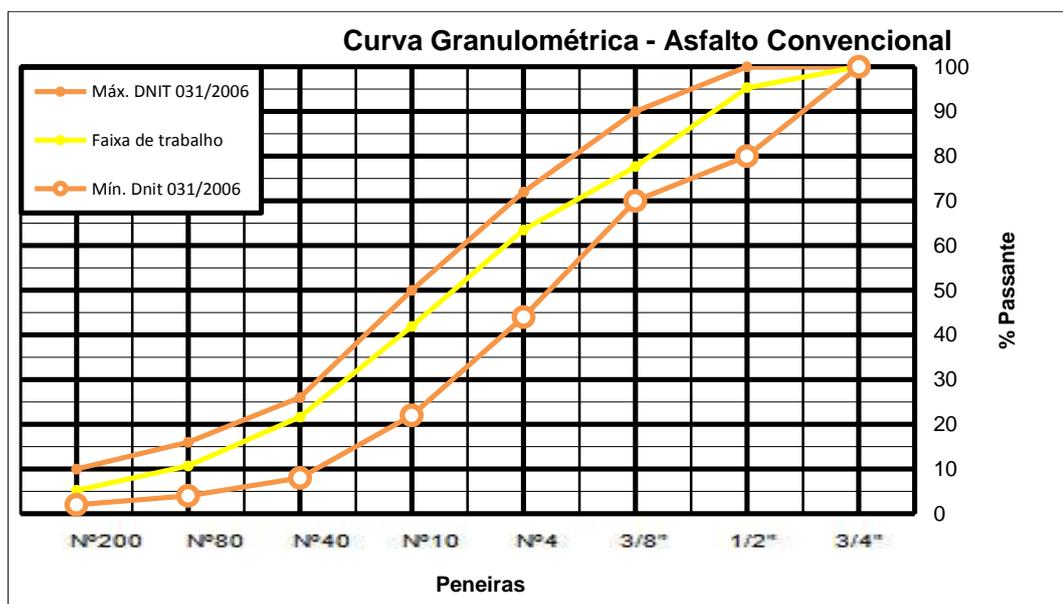
Tabela 14 - Faixa granulométrica utilizada comparada a norma de especificação do asfalto convencional

FAIXA GRANULOMÉTRICA UTILIZADA	Faixa "C" DNIT	
	ASFALTO CONVENCIONAL	
	DNIT 031/2006 - ES	
	MÍNIMO	MÁXIMO
100	100	100
95,33	80	100
77,68	70	90
63,48	44	72
41,9	22	50
21,62	8	26
10,68	4	16
5,22	2	10

Fonte: Autor (2015).

Em números pode-se notar que a faixa utilizada enquadra na faixa especificada pela norma, o GRAF.1 demonstra mais claramente que a faixa de trabalho escolhida se mantém entre o mínimo e o máximo estabelecido pela norma.

Gráfico 1 - Curva granulométrica asfalto convencional



Fonte: Autor (2015).

- 2) Faixa granulométrica utilizada comparada com a faixa “C” da norma DNER – ES 385/99 para asfalto modificado por polímero. (TAB. 15).

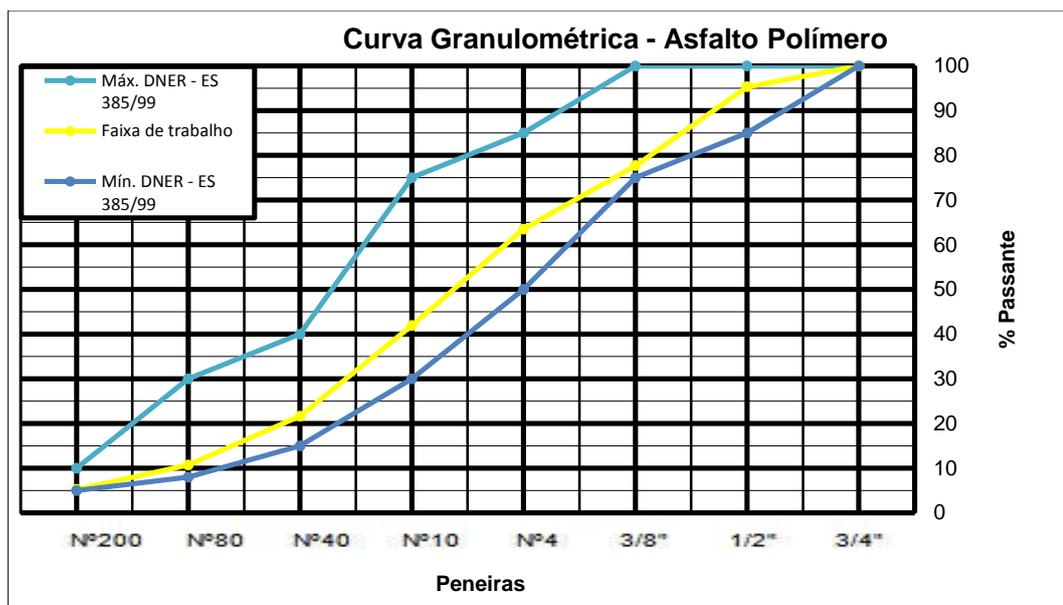
Tabela 15 - Faixa granulométrica utilizada comparada a norma de especificação asfalto polímero

Faixa "C" DNIT		
FAIXA GRANULOMÉTRICA UTILIZADA	ASFALTO POLÍMERO	
	DNER - ES 385/99	
	MÍNIMO	MÁXIMO
100	100	100
95,33	85	100
77,68	75	100
63,48	50	85
41,9	30	75
21,62	15	40
10,68	8	30
5,22	5	10

Fonte: Autor (2015).

A faixa utilizada também ficou dentro do estabelecido pela norma para asfalto modificado por polímero, o GRAF. 2 demonstra melhor estes resultados.

Gráfico 2- Curva granulométrica asfalto polímero



Fonte: Autor (2015).

- 3) Faixa granulométrica utilizada comparada com a faixa "C" DNIT 112/2009 – ES para asfalto borracha. (TAB. 16).

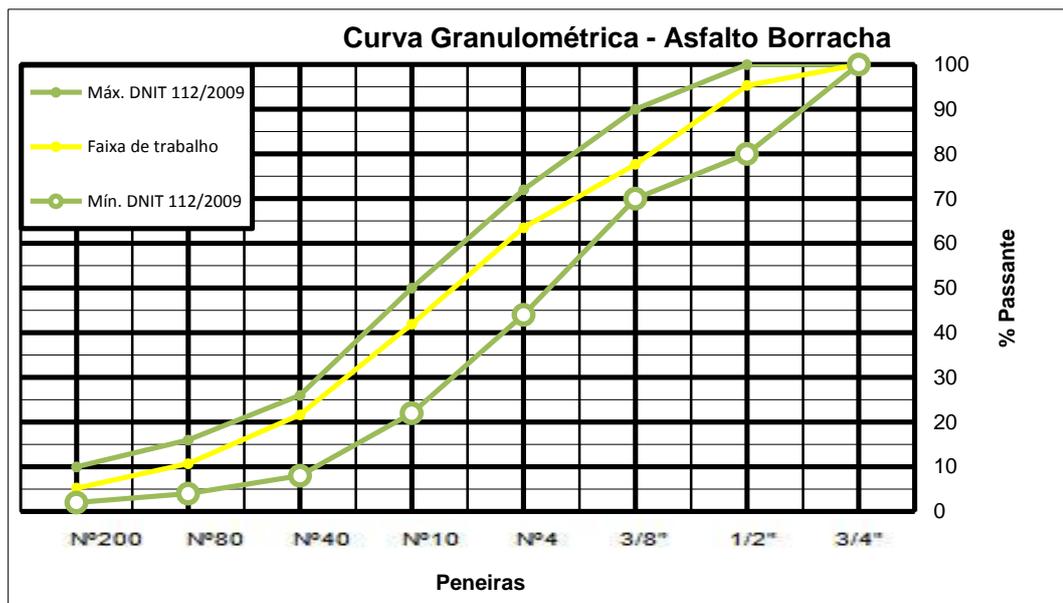
Tabela 16 - Faixa granulométrica utilizada comparada a norma de especificação asfalto borracha

CURVA GRANULOMÉTRICA UTILIZADA	Faixa "C" DNIT	
	ASFALTO BORRACHA	
	DNIT - 112/2009 - ES	
	MÍNIMO	MÁXIMO
100	100	100
95,33	80	100
77,68	70	90
63,48	44	72
41,9	22	50
21,62	8	26
10,68	4	16
5,22	2	10

Fonte: Autor (2015).

A faixa utilizada também atendeu as especificações da norma referente ao asfalto borracha, como ficou mais bem compreendido no GRAF. 3.

Gráfico 3- Curva granulométrica asfalto borracha



Fonte: Autor (2015).

Como os resultados da comparação entre a granulometria da faixa utilizada e a granulometria exigida pela norma foram satisfatórios para os três tipos de asfaltos, pode-se então dar sequência aos experimentos.

Definido o traço dos agregados a ser utilizado, separou-se o material necessário para realização dos ensaios acordo com a curva granulométrica, mostrado na FIG.22, e os colocou em estufa a 150°C para manter os agregados livre de umidade e próximos a temperatura de trabalho. (FIG. 23).

Figura 22 - Agregados utilizados na mistura



Fonte: Autor (2015).

Figura 23 - Aquecimento dos agregados em estufa



Fonte: Autor (2015).

9.2.3 Mistura do pó de borracha de pneu ao asfalto

Para a mistura do pó de borracha ao asfalto, foram utilizados 900g do asfalto CAP 50/70 e 162g de pó de borracha representando 18% do peso do asfalto dentro da faixa de 15 a 20% descritos em norma.

Primeiramente aqueceu o asfalto CAP 50/70 até atingir a temperatura de 170°C, após isso levou o recipiente para a balança de precisão, já corrigida a tara do recipiente de mistura, e acrescentou-se o pó de borracha até adquirir o peso desejado. (FIG.24).

Figura 24 - Pesagem do pó de borracha junto ao asfalto



Fonte: Autor (2015).

Após pesado os materiais iniciou-se o processo de mistura do asfalto ao pó de borracha conforme ilustra a FIG. 25, misturando manualmente com uma espátula durante 30 minutos a uma temperatura constante de 170°C.

Figura 25 - Mistura do pó de borracha ao asfalto



Fonte: Autor (2015).

Durante a mistura do asfalto verificou-se a dificuldade de manter a temperatura constante de 170°C, necessitando de um controle mais rigoroso utilizando o termômetro de mercúrio durante todo o tempo.

Após 30 minutos obteve-se uma mistura homogênea, bem viscosa e com grande capacidade de perda de calor, então assim que retirada do fogareiro foi rapidamente levada a estufa a 170°C, para mantê-la em uma temperatura ideal até a sua utilização.

9.2.4 Ensaio de penetração

Com todos os materiais coletados, sendo eles, asfalto CAP 50/70, asfalto modificado por polímero SBS (60/85) e asfalto CAP 50/70 modificado por borracha moída de pneu, deu-se início ao ensaio de penetração.

Após aquecimento a 160°C do asfalto CAP 50/70, e 170°C do asfalto modificado por polímero e asfalto modificado por borracha de pneu, foram moldados os corpos de prova, FIG. 26, para realização deste ensaio foram moldados dois corpos de prova para cada tipo de ligante.

Figura 26 - Preparação dos corpos de prova para ensaio de penetração



Fonte: Autor (2015).

Após preencher os recipientes de penetração, os mesmos foram deixados em temperatura ambiente (25°C) para resfriamento durante noventa minutos.

Posteriormente deu-se inicio a preparação do penetrômetro colocando recipientes de penetração (corpos de prova), em uma cuba de transferência com água a 25°C, verificou-se o equipamento, ajustando o peso e agulha de acordo com a norma descrita no item 7.2.5.1 deste trabalho. Com o equipamento ajustado deu-se inicio ao ensaio.

Para cada corpo de prova foi aplicado uma carga de 100g durante 5 segundos, medidos com um cronometro calibrado. Após 5 segundos foi feito a leitura no indicador do penetrômetro de modo a verificar a distância em décimo de milímetros que a agulha penetrou verticalmente no material. (FIG. 27).

Figura 27 - Realização do ensaio de penetração



Fonte: Autor (2015).

Após realizado a leitura de todos os recipientes, obteve-se os seguintes resultados, conforme mostra TAB. 17.

Tabela 17 - Relatório de resultados ensaio de penetração

Relatório Ensaio de Penetração						
	Asfalto Convencional		Asfalto Polímero		Asfalto Borracha	
	1° Amostra	2° Amostra	1° Amostra	2° Amostra	1° Amostra	2° Amostra
Leitura (mm)	58	59	57	54	57	52
Média	58,5		55,5		54,5	
Especificações	50 - 70		40 - 70		30 - 70	

Fonte: Autor (2015).

Observou-se que o asfalto modificado por borracha de pneu obteve uma maior resistência quando comparado com os outros dois tipos de asfaltos, onde o asfalto modificado por borracha apresentou uma leitura de 54,5 décimos de milímetros, o asfalto modificado por polímeros apresentou uma média de 55,5 décimos de milímetros e o asfalto convencional apresentou uma leitura de 58,5 décimos de milímetro, sendo que quanto menor o valor lido, mais resistente é o material.

O asfalto modificado por borracha apresentou uma maior resistência devido as suas moléculas estarem mais juntas entre si, possuindo uma maior viscosidade e também uma maior resistência.

Todos os valores obtidos mantiveram-se dentro da norma especificada para cada tipo de asfalto.

9.2.5 Ensaio Marshall

Para realização do ensaio Marshall, foi necessária a confecção de nove corpos de prova, sendo três corpos de prova para o asfalto convencional, três para o asfalto modificado por polímero e três para o asfalto borracha. Sendo que são três para cada tipo de asfalto para que se possa obter a média dos resultados.

Para a realização de cada corpo de prova foram utilizados 1200g de mistura betuminosa, mistura essa composta de 1143,6g de agregados, divididos em 571,8g de Brita 0 e 571,8g de pó de pedra, conforme curva granulométrica mostrada no item 8.2.2 deste trabalho, e 56,4g de asfalto representando 4,7% do peso da amostra. A amostra foi pesada em balança de precisão conforme FIG. 28 e logo após foi levado ao fogareiro a 160°C para asfalto convencional e 170°C para asfalto modificado por polímero e asfalto borracha, onde os componentes são misturados até obter uma mistura homogênea. (FIG. 29).

Figura 28 - Pesagem da mistura betuminosa para confecção dos corpos de prova



Fonte: Autor (2015).

Figura 29 - Mistura do material betuminoso para confecção dos corpos de prova



Fonte: Autor (2015).

A FIG. 30 mostra que assim que a mistura estiver totalmente homogeneizada é verificado a temperatura de trabalho e logo após é levada para o molde compressão devidamente preparado e aquecido.

Figura 30 - Preenchimento do molde de compactação com a mistura betuminosa



Fonte: Autor (2015).

Logo em seguida dá-se início a compactação da mistura, são aplicados 75 golpes de cada lado da amostra, conforme FIG.31, de forma constante e sem vibrações.

Figura 31 - Compactação do corpo de prova



Fonte: Autor (2015).

Depois de compactado a mistura o corpo de prova é retirado da base de compactação e levado para um ambiente arejado para que possa resfriar. (FIG. 32).

Figura 32 - Corpos de prova após compactação



Fonte: Autor (2015).

Após realizar os procedimentos descritos anteriormente para todos os corpos de prova, deixando-os esfriar por cerca de 12 horas realizou-se a desforma dos corpos de prova. (FIG. 33).

Figura 33 - Desforma dos corpos de prova



Fonte: Autor (2015).

Feito a desforma, os corpos de prova foram separados de acordo com o tipo de asfalto. (FIG. 34).

Figura 34 - Corpos de prova prontos para realização dos ensaios



Fonte: Autor (2015).

Primeiro procedimento para realização dos ensaios foi a pesagem do Corpo de prova ao ar (Par) conforme mostra FIG. 35, e depois a pesagem dos corpos de prova submersos (Psub).(FIG.36).

Com esses valores calculou-se o volume de cada corpo de prova, logo após são calculados os valores de VV, VAM e RBV conforme procedimentos descritos no item 7.2.5.2 do presente trabalho.

Figura 35 - Pesagem do corpo de prova ao ar (Par)



Fonte: Autor (2015).

Figura 36 - Pesagem do corpo de prova submerso (Psub)



Fonte: Autor (2015).

Após encontrar todas as medidas volumétricas os corpos de prova foram submersos em banho-maria a 60°C durante 30 minutos. (FIG. 37).

Figura 37 - Corpos de prova em banho-maria



Fonte: Autor (2015).

Assim que passados os 30 minutos os corpos de prova foram retirados do banho maria e levados diretamente para a prensa Marshall, não excedendo um intervalo de 20 segundos. Iniciou-se o rompimento e foi anotada a carga (kgf) necessária para romper o corpo de prova, denominada como “estabilidade lida”.

Este valor é corrigido para a espessura do corpo de prova ensaiado através da equação (8) do presente trabalho, obtendo a “estabilidade corrigida” ou Estabilidade Marshall, que é a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo de prova.

Simultaneamente, obtivemos a Fluência Marshall, definida como a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação de carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em milímetros (equivalentes em centésimos de polegada).

Após feito a leitura de estabilidade e fluência de todos os corpos de prova, obteve-se os resultados desejados.

Todos os resultados obtidos através do ensaio Marshall foram divididos de acordo o tipo de asfalto estudado.

9.2.5.1 Resultados obtidos pelo ensaio Marshall para asfalto convencional.

A TAB. 18 nos mostra os resultados do Ensaio Marshall para asfalto convencional.

Tabela 18 - Resultados ensaio Marshall do asfalto convencional

Ensaio Marshall - Método DNER 043/95							
Asfalto Convencional - CAP 50/70							
Resultados do ensaio							
Número do corpo de prova			1	2	3	Média	
Altura do corpo de prova			6,40	6,43	6,46		
a	Densidades	Peso ao ar (g)		1196,00	1194,60	1197,00	1195,87
b		Peso imerso (g)		693,20	689,70	690,00	690,97
c		Volume (cm ³)	a-b	502,80	504,90	507,00	504,90
d		Aparente (g/cm ³)	a/c	2,379	2,366	2,361	2,37
e		D.M.T. (g/cm ³)		2,459	2,459	2,459	2,46
f	Vazios	Vazio (%)	(e-d)*100/e	3,3	3,8	4,0	3,67
g		V.C.B. (%)	d*r/s	11,1	11,0	11,0	11,02
h		V.A.M.(%)	f+g	14,3	14,8	15,0	14,69
i		R.B.V.(%)	g/h	77,3	74,5	73,4	75,04
j	Estabilidade	Leitura		680,00	500,00	700,00	626,67
k		Fator de correção		1,04	1,03	1,02	1,03
l		Leitura corrigida	j*k	705,93	515,32	716,27	645,84
m		Estabilidade (kgf)	l*u	1081,48	789,47	1097,32	989,42
n	Fluência	Leitura Inicial (mm)					
o		Leitura final (mm)		9,30	9,10	9,30	9,23
p		Fluência	n+o/2,54	3,66	3,58	3,66	3,64
q	Resultados adicionais						
r	Teor de Betume Utilizado	4,7	t	Densidade Agregados (g/cm ³)		2,646	
s	Densidade CAP (g/cm ³)	1,01	u	Fator de Correção da Prensa		1,532	

Fonte: Autor (2015).

A média dos resultados obtidos em VV 3,67%, VAM 14,69%, RBV 75,04%, Estabilidade 989,42 Kgf e Fluência 3,64mm, estão todos dentro da norma DNIT 031/2006 – ES, conforme apresentado em resumo na TAB. 19.

Tabela 19 - Resultados ensaio Marshall do asfalto convencional

Resumo – Asfalto Convencional					
	VV (%)	VAM.(%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
Norma DNIT 031/2006 - ES	3,0 - 5,0	>14	75 - 82	>500	2,0 - 4,6
Resultados obtidos	3,67	14,69	75,04	989,42	3,64

Fonte: Autor (2015).

9.2.5.2 Resultados obtidos pelo ensaio Marshall para asfalto modificado por polímeros.

Os resultados obtidos através do Ensaio Marshall para asfalto modificado por polímero estão descritos na TAB. 20.

Tabela 20 - Resultados do ensaio Marshall para o asfalto polímero

Ensaio Marshall - Método DNER 043/95							
Asfalto Polímero - CAP 60/85							
Resultados do ensaio							
Número do corpo de prova		1	2	3	Média		
Altura do corpo de prova		6,35	6,46	6,49			
a	Densidades	Peso ao ar (g)	1194,00	1197,00	1199,00	1196,67	
b		Peso imerso (g)	695,20	689,80	689,00	691,33	
c		Volume (cm ³)	a-b	498,80	507,20	510,00	505,33
d		Aparente (g/cm ³)	a/c	2,394	2,360	2,351	2,37
e		D.M.T. (g/cm ³)		2,459	2,459	2,459	2,46
f	Vazios	Vazio (%)	(e-d)*100/e	2,7	4,0	4,4	3,70
g		V.C.B. (%)	d*r/s	11,1	11,0	10,9	11,00
h		V.A.M.(%)	f+g	13,8	15,0	15,3	14,70
i		R.B.V.(%)	g/h	80,6	73,1	71,2	75,0
j	Estabilidade	Leitura	800,00	780,00	800,00	793,33	
k		Fator de correção	1,05	1,02	1,01	1,03	
l		Leitura corrigida	j*k	842,14	797,58	810,27	816,66
m		Estabilidade (kgf)	l*u	1290,16	1221,89	1241,33	1251,13
n	Fluência						
o		Leitura final (mm)	9,40	9,40	9,40	9,40	
p		Fluência	n+o/2,54	3,70	3,70	3,70	3,70
q	Resultados adicionais						
r	Teor de Betume Utilizado	4,7	t	Densidade Agregados (g/cm ³)		2,646	
s	Densidade CAP (g/cm ³)	1,012	u	Fator de Correção da Prensa		1,532	

Fonte: Autor (2015).

A média dos resultados obtidos em VV 3,7%, VAM 14,70%, RBV 75,00%, Estabilidade 1251,13 Kgf e Fluência 3,7mm, estão todos dentro da norma DNER – ES 385/99, conforme apresentado em resumo na TAB. 21.

Tabela 21 - Resumo dos resultados ensaio Marshall para o asfalto polímero

Resumo Ensaio Marshall – Asfalto Polímero					
	VV (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
Norma DNER - ES 385/99	3,0 - 5,0	>14	75 - 82	>500	2,0 - 4,5
Resultados obtidos	3,70	14,70	75,0	1251,13	3,70

Fonte: Autor (2015).

9.2.5.3 Resultados obtidos pelo ensaio Marshall para asfalto borracha

Os resultados obtidos através do Ensaio Marshall para o asfalto borracha segue na TAB. 22.

Tabela 22 - Resultados do ensaio Marshall para o asfalto borracha

Ensaio Marshall - Método DNER 043/95 Asfalto Borracha - CAP 50/70							
Resultados do ensaio							
Número do corpo de prova		1	2	3	Média		
Altura do corpo de prova		6,55	6,42	6,55			
a	Densidades	Peso ao ar (g)	1197,40	1195,00	1199,40	1197,27	
b		Peso imerso (g)	683,00	690,80	685,00	686,27	
c		Volume (cm ³)	a-b	514,40	504,20	514,40	511,00
d		Aparente (g/cm ³)	a/c	2,328	2,370	2,332	2,34
e		D.M.T. (g/cm ³)		2,464	2,464	2,464	2,46
f	Vazios	Vazio (%)	(e-d)*100/e	5,5	3,8	5,4	4,91
g		V.C.B. (%)	d*r/s	10,6	10,8	10,6	10,69
h		V.A.M.(%)	f+g	16,2	14,6	16,0	15,61
i		R.B.V.(%)	g/h	65,7	73,9	66,4	68,67
j	Estabilidade	Leitura	820,00	940,00	880,00	880,00	
k		Fator de correção	1,00	1,03	1,00	1,01	
l		Leitura corrigida	j*k	818,31	971,13	878,19	889,21
m		Estabilidade (kgf)	l*u	1253,65	1487,78	1345,38	1362,27
n	Fluência	Leitura Inicial (mm)					
o		Leitura final (mm)		9,40	9,50	9,50	9,47
p		Fluência	n+o/2,54	3,70	3,74	3,74	3,73
q	Resultados adicionais						
r	Teor de Betume Utilizado	4,7	t	Densidade Agregados (g/cm ³)	2,646		
s	Densidade CAP (g/cm ³)	1,03	u	Fator de Correção da Prensa	1,532		

Fonte: Autor (2015).

A média dos resultados obtidos em VV 4,91%, VAM 15,61%, RBV 66,67%, Estabilidade 1362,27 Kgf e Fluência 3,73mm, estão todos dentro da norma DNIT 112/2009 - ES, conforme apresentado em resumo na TAB. 23.

Tabela 23 - Resumo resultados ensaio Marshall para o asfalto borracha

Resumo Ensaio Marshall – Asfalto Borracha					
	VV (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
Norma DNIT 112/2009 - ES	3,0 - 5,0	>15	65 - 78	>800	2,0 - 4,6
Resultados obtidos	4,91	15,61	68,67	1362,27	3,73

Fonte: Autor (2015).

Depois de obtidos todos os resultados desejados, a próxima etapa foi comparar os resultados entre os três tipos de asfalto.

9.2.5.4 Comparação e análise dos resultados

Depois de realizados os ensaios e obtidos os resultados segue o estudo comparativo entre os três tipos de asfaltos utilizados. Primeiramente foram analisadas as porcentagens de vazios dos asfaltos, conforme mostra a TAB. 24.

Tabela 24 - Comparativo de vazios entre os tipos de asfalto analisados

Comparativo - Vazios			
	Asfalto Convencional	Asfalto Polímero	Asfalto Borracha
Volume de Vazio (%)	3,67	3,70	4,91
V.C.B. (%)	11,02	11,00	10,69
V.A.M.(%)	14,69	14,70	15,61
R.B.V.(%)	75,04	75	68,67

Fonte: Autor (2015).

Com relação ao volume de vazios pode-se perceber que o teor de vazios no asfalto borracha é bem maior quando comparado com o asfalto convencional e o asfalto polímero, sendo que o asfalto borracha teve 4,91% de volume de vazios e os outros dois obtiveram em torno de 3,7 % de volume de vazios, isso se da pelo fato da borracha empregada na mistura expandir-se, tornando uma mistura porosa, mas sem perder sua resistência característica essa que contribui para a diminuição do spray provocado pelas rodas dos carros em dia de chuva.

Também foi percebido que o volume cheio de betume (VCB), foi menor no asfalto borracha, obtendo 10,69%, isso mostra que o asfalto ocupa menos vazios na mistura, pelo fato da borracha tornar a mistura mais porosa.

Como a borracha tem a característica de se expandir na mistura as partículas dos agregados se separam aumentando os vazios do agregado mineral, o asfalto borracha obteve 15,61% de VAM, enquanto o asfalto convencional e o asfalto polímero tiveram em torno de 14,7%.

Quando maior o VAM menor vai ser a relação betume vazios (RBV), o asfalto borracha obteve um resultado de 68,67% de RBV, enquanto o asfalto convencional e o asfalto polímero obtiveram 75%, bem próximo ao limite mínimo exigido pela norma.

Outro resultado importante na comparação entre o asfalto borracha, asfalto polímero e asfalto convencional foi a estabilidade, que é a resistência máxima que o asfalto possui até seu rompimento, a TAB.25 nos mostra os resultados de estabilidade em modo comparativo para os três tipos de asfalto.

Tabela 25 - Comparativo de estabilidade para os três tipos de asfaltos analisados

Comparativo - Estabilidade			
	Asfalto Convencional	Asfalto Polímero	Asfalto Borracha
Leitura	626,67	793,33	880,00
Fator de correção	1,03	1,03	1,01
Leitura corrigida	645,84	816,66	889,21
Estabilidade (kgf)	989,42	1251,13	1362,27

Fonte: Autor (2015).

Através dos resultados obtidos nos ensaios verificou-se que o asfalto borracha possui resistência 28 % maior que o asfalto convencional e 8,5% maior que o asfalto polímero, isso se deu pelo fato da borracha adicionada ao ligante possuir características elásticas além de partículas em sua composição que aumentam a resistência do asfalto após a junção desses elementos aos elementos já existentes no ligante convencional.

Para os resultados de fluência o asfalto borracha também obteve resultados satisfatórios quando comparado com o asfalto convencional e asfalto modificado por polímero. (TAB. 26).

Tabela 26 - Comparativo de fluência para os três tipos de asfalto analisados

Comparativo - Fluência			
	Asfalto Convencional	Asfalto Polímero	Asfalto Borracha
Fluência	3,64	3,70	3,73

Fonte: Autor (2015).

O asfalto borracha deformou-se cerca de 3% a mais até seu rompimento quando comparado com o asfalto convencional, isso se dá pela característica de recuperação elástica do asfalto borracha, fator importante para diminuição dos trilhos de rodas provocados pelo excesso de carga e tráfego das rodovias.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos estudos realizados neste trabalho pode-se comprovar que o uso do asfalto borracha é viável em todos os aspectos abordados, sendo eles ambientais, econômicos e técnicos.

No aspecto ambiental o asfalto borracha é um grande aliado quando se diz respeito a retirada dos pneus inservíveis do meio ambiente. Como foi descrito neste trabalho, milhões de pneus são descartados na natureza todo ano causando danos ambientais, e o uso dos pneus como elemento para fabricação do asfalto faz com que tenha uma destinação correta dos mesmos e evite problemas ambientais.

No que se diz respeito ao aspecto econômico, como foi mostrado no trabalho, o custo final de uma obra com a utilização do asfalto borracha é menor quando comparado ao asfalto convencional, devido as características técnicas do mesmo faz com que se use menos quantidade de material para o mesmo trecho pavimentado, reduzindo o custo. Além do fato do asfalto borracha ser mais durável, reduzindo custos com manutenção em longo prazo.

E através do estudo de caso realizado em laboratório para analisar as características técnicas do asfalto borracha, foi comprovado que ele possui uma maior estabilidade quando comparado com o asfalto polímero e asfalto convencional, onde ele foi capaz de resistir a uma maior carga e ter uma maior deformação até seu rompimento, características que tornam o asfalto borracha viável para aplicação em pavimentos devido ao volume de tráfego e cargas existentes no dia de hoje. Outra característica obtida nos ensaios foi certa porosidade encontrada no asfalto borracha, isso faz com que ele se torne um pouco mais permeável diminuindo as lâminas d'água em dias de chuva, reduzindo riscos de aquaplanagem e acidentes.

Uma das desvantagens notadas no estudo de caso foi a dificuldade de manter a temperatura ideal de trabalho, sendo preciso um maior controle de qualidade, o que faz com que aumente o custo de produção quando produzido em escala real, comprovando o que foi estudado na literatura pesquisada.

Por fim, pode-se concluir que o asfalto borracha é uma grande alternativa para uso em pavimentação, o que falta é uma maior divulgação de suas vantagens, promovido através de estudos efetuados por mais órgãos públicos e privados para convencer mais setores a utilizá-lo.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. ABNT MB 326: Método de Ensaio para a Determinação Viscosidade Saybolt de Produtos de Petróleo. P.01/04.

_____. ABNT NBR 6560/85: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. P. 01/06.

_____. ABNT NBR 9935/2011: Agregados – Terminologia. P. 01/04.

_____. ASTM 6114-97: Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder. P. 01/04.

_____. DNER 003/99: Material betuminoso – determinação de penetração. P. 01/07.

_____. DNER 035/95: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. P. 01/06.

_____. DNER 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. P. 01/11.

_____. DNER–ES 385/99: Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero. P. 01/15.

_____. DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico. P. 01/15.

_____. DNIT 095/2006 – EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. P. 01/06.

_____. DNIT 111/2009 – EM: Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material. P. 01/06.

_____. DNIT 112/2009 – EM: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço. P. 01/13.

_____. DNIT 129/2011 – EM: Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. P. 01/04.

ABEDA, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de asfalto. Manual básico de emulsões asfálticas.

ANIP Agencia Nacional da indústria de pneumáticos. **Pneus destinados**. Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/v3/>>. Acesso em: 30 mai. 2015.

BERNUCCI et al., **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 504 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura (sic) de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de

Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p (IRP.Publ., 719).

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO N° 258, de 26 de Agosto de 1999**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>>. Acesso em: 30 de Abr. de 2015.

GRECA Asfaltos. **Artigo Greca sustentável**. Disponível em: <<http://www.grecaasfaltos.com.br/artigos-e-links>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

GRECA Asfaltos. **Artigo Linha ecoflexpave**. Disponível em: <http://www.flexpave.com.br/leiamais_ecoflex/13_estudo_ecoflex_2009.pdf>. Acesso em: 10 out. 2015.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

NEVES FILHO, C. L. D. (2004) – **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto-Borracha**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

ODA, S.; FERNANDES Jr., J.L (2002). **Utilização de borracha de pneus como material para pavimentação asfáltica**.

PINI Infraestrutura urbana. **Artigo Asfalto Borracha**. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/11/asfalto-borracha-a-adicao-de-po-de-borracha-extraido-de-245173-1.aspx>>. Acesso em: 28 mai. 2015.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y.; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. 2.ed. Lanham, Maryland: Napa Research and Education Fundation, 1996.

SANTANA, H. Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de fíler em misturas asfálticas. In: **Reunião Anual de Pavimentação**, 29., 1995, Cuiabá. Anais... Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume 1 . 2. Ed. São Paulo: Pini, 2007. 761 p.