

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

LUANE RICARTE MARTINS

**AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO DE BORRACHA MOÍDA DE PNEU
COMO AGREGADO DE CONCRETO ASFÁLTICO**

MANAUS

2019

LUANE RICARTE MARTINS

**AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO DE BORRACHA MOÍDA DE PNEU
COMO AGREGADO DE CONCRETO ASFÁLTICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Civil da Universidade
Federal do Amazonas, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

MANAUS

2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M386a Martins, Luane Ricarte
Avaliação do uso de resíduo de borracha moída de pneu como agregado de concreto asfáltico / Luane Ricarte Martins . 2019
59 f.: il. color; 31 cm.

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

1. Asfalto. 2. Borracha. 3. Pavimentação. 4. Pneu. I. Campelo, Nilton de Souza. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho não poderia ter sido realizado sem a colaboração, estímulo e apoio de diversas pessoas. A todos que contribuíram direta ou indiretamente, quero manifestar meus sinceros agradecimentos.

A Deus, por realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigada por me permitir errar, aprender e crescer e por manter minha mãe ao meu lado durante esses anos com a saúde que ela tem hoje.

A minha mãe Rosaura e meu pai Ronaldo, meu infinito agradecimento por todas as lições, por todo o suporte oferecido e, principalmente, pelo esforço que fizeram para que eu pudesse chegar aonde cheguei.

A minha família, avós, tios e primos pelo apoio e compreensão ao longo dos últimos anos.

Ao meu noivo Michael que, mesmo de tão longe, nunca duvidou da minha capacidade, me fez acreditar que posso mais do que imagino e não me deixou faltar amizade, paciência, compreensão, apoio e amor. Obrigada por ter feito deste trabalho um objetivo nosso.

Ao Prof. Dr. Nilton Campelo pela condução no trabalho e pelos ensinamentos os quais ainda renderão muitos frutos em minha vida pessoal e profissional nos próximos anos.

Aos técnicos do Laboratório de Pavimentação da UFAM Zeca e Reinaldo pela paciência, pela ajuda em todos os ensaios realizados, pelas sugestões que foram todas consideradas e por todas as vezes que ficaram depois do horário para que pudesse finalizar algum ensaio em andamento.

Aos colegas de laboratório Jociane, Marcos, Abel e Hudson pela amizade, sugestões, ensinamentos, companheirismo e companhia nos trabalhos realizados em laboratório transformando essa caminhada um pouco menos difícil e mais prazerosa.

À empresa Rio Limpo Amazonas Reciclagem pela gentileza e pela doação da borracha de pneu triturada, principal objeto de estudo neste trabalho.

À empresa Britamazon e à empresa Mercês pela doação das britas utilizadas e pela paciência nas vezes que precisei fazer mais de uma viagem para concluir a coleta.

À Companhia Brasileira de Asfalto da Amazônia (CBAA) pelo asfalto doado e por toda a ajuda com relação à logística e por informações cedidas sobre o material. Todos estes materiais foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

À FAPEAM pelo apoio financeiro que foi fundamental na dedicação exclusiva à pesquisa durante quase 2 anos.

Finalmente, gostaria de agradecer à Faculdade de Tecnologia (FT) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFAM por abrirem as portas para que eu pudesse realizar este sonho e me proporcionarem não apenas um título, conhecimento técnico ou científico, mas uma lição de vida. Ninguém vence sozinho... obrigada a todos.

RESUMO

Este trabalho tem objetivo de estudar o potencial da utilização de borracha de pneu triturada em substituição parcial dos agregados em misturas asfálticas por meio do processo seco, obtendo-se um material com propriedades que permitam seu uso na pavimentação. Para que seja possível atingir estes objetivos, primeiramente foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais utilizados e das misturas para que se pudesse conhecer o objeto de estudo. Também foi analisada a influência do efeito da adição de raspa de borracha de pneu sob os vários aspectos que condicionam o bom desempenho de uma mistura em campo através da caracterização mecânica. As conclusões deste trabalho indicam que a amostra escolhida para estudos de 5,58% de CAP e 0,5% de borracha, no geral, obteve resultados positivos quando comparados aos resultados da amostra de referência, com exceção no ensaio de perda de massa, onde a amostra modificada apresentou um desgaste levemente maior, porém menor que 1%. As conclusões também indicaram que a incorporação de borracha de pneus inservíveis em concreto asfáltico pode ser uma alternativa viável para a reciclagem desses resíduos, porém ainda há bastante informação para ser estudada e analisada.

Palavras-chave: Asfalto. Borracha. Pavimentação.

ABSTRACT

The aim of this work is to study the potential of the use of crushed tire rubber in partial replacement of the aggregates in asphalt mixtures by means of the dry process, obtaining a material with properties that allow its use in the paving. In order to achieve these objectives, the characterization tests of the materials used and the mixtures will be carried out first so that the object of study can be known. The influence of tire rubber particle percentages on the mixtures and the effect of the addition of tire rubber shavings under the various aspects that condition the good performance of a field mix through mechanical characterization. The conclusions of this work indicate that the sample chosen for studies of 5.58% of petroleum asphalt concrete and 0.5% of rubber, in general, obtained positive results when compared to the results of the reference sample, except for the mass loss test. where the modified sample had a slightly higher wear, but less than 1%. The findings also indicated that incorporating rubber from waste tires into asphalt concrete may be a viable alternative for recycling these wastes, but there is still plenty of information to be studied and analyzed.

Keywords: Asphalt. Rubber. Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas do pavimento	15
Figura 2 - Construção do pneu	16
Figura 3 - Partes que compõem o pneu	17
Figura 4 - Pneus inservíveis recolhidos em Usina de Tratamento Ecológico de Pneus	18
Figura 5 - Cadeia de reposição de pneus	19
Figura 6 - Fissura em revestimento asfáltico	21
Figura 7 - Detalhes do ensaio de umidade induzida (Lottman modificado).....	27
Figura 8 - Detalhes da prensa de ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	29
Figura 9 - Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência.....	30
Figura 10 - Moinho de da máquina de Abrasão Los Angeles da UFAM	31
Figura 11 - Metodologia utilizada no trabalho	32
Figura 12 - Curva granulométrica da brita	33
Figura 13 - Raspa de borracha utilizada no trabalho	34
Figura 14 - Curva granulométrica da borracha.....	34
Figura 15 - Equipamento de análise termogravimétrica.....	35
Figura 16 - Gráfico da amostra submetida à análise TG	36
Figura 17 - Ensaio de impurezas orgânicas na areia	37
Figura 18 - Curva granulométrica da areia	37
Figura 19 - Detalhamento da dosagem dos CPs	40
Figura 20 - Curva granulométrica da mistura.....	42
Figura 21 - Corpos de prova moldados	42
Figura 22 - Resultados dos parâmetros volumétricos de cada mistura para diferentes teores de CAP (a) RBV; (b) Vv; (c) VAM	44
Figura 23 -- Resultados dos parâmetros volumétricos de cada mistura para diferentes teores de borracha (a) RBV; (b) Vv; (c) VAM	45
Figura 24 - Corpo de prova após ensaio cântabro em diferentes perspectivas	47
Figura 25 – Gráfico da perda de massa do ensaio cântabro	47
Figura 26 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral em perspectivas diferentes	48
Figura 27 - Gráfico da resistência à tração por compressão diametral.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos materiais utilizados nos pneus de passeio e carga	16
Tabela 2 - Processos de recapagem de pneus	20
Tabela 3 - Tecnologias de incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas	24
Tabela 4 - Propriedades dos agregados pétreos	33
Tabela 5 - Caracterização do CAP fornecida pela empresa	38
Tabela 6 - Composição granulométrica da mistura asfáltica utilizada no trabalho	41
Tabela 7 - Resultado da resistência da mistura a danos por umidade induzida.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANIP** – Associação Nacional da Indústria de Pneumático
- ANTT** – Agência Nacional de Transportes Terrestres
- ASTM** – *American Society for Testing and Materials*
- CAP** – Cimento Asfáltico de Petróleo
- CBAA** – Companhia Brasileira de Asfaltos da Amazônia
- CP** – Corpo de Prova
- CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COPPE** - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
- CNT** – Confederação Nacional dos Transportes
- DNIT** – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DMT** – Densidade Máxima Teórica
- DNER** – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
- E** – Estabilidade
- F** – Fluência
- FHWA** – *Federal Highway Administration*
- Hz** - Hertz
- GEOTEC** – Grupo de Geotecnia
- IBAMA** – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis
- LAPAV** – Laboratório de Pavimentação
- NBR** – Normas Brasileiras
- Petrobras** – Petróleo Brasileiro S.A.
- RBV** – Relação Betume Vazios
- RT** – Resistência à Tração
- SHRP** – *Strategic Highway Research Program*
- SUPERPAVE** – *Superior Performing Asphalt Pavement System*
- TGA** - Termogravimetria
- UFAM** – Universidade Federal do Amazonas
- UFRJ** – Universidade Federal do Rio de Janeiro
- VAM** – Vazios do Agregado Mineral
- Vv** – Volume de Vazios

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. PAVIMENTOS	14
2.2. PNEUS.....	15
2.2.1. Estrutura e Composição dos Pneus	15
2.2.2. Pneus Inservíveis	17
2.3. DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS	20
2.4. APLICAÇÕES DE BORRACHA DE PNEU EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	22
2.4.1 Processo Úmido	23
2.4.2 Processo Seco	23
2.5. DOSAGEM DE MISTURA ASFÁLTICA.....	25
2.6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	27
2.6.1. Dano por Umidade Induzida	27
2.6.2. Resistência à Tração	28
2.6.3. Módulo de Resiliência	29
2.6.4. Resistência à Fadiga	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1. MATERIAIS	32
3.1.1. Agregado Pétreo (Brita 0, 1 e pó)	32
3.1.2. Borracha de Pneu	33
3.1.3 Areia	36
3.1.4. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	38
3.1.5. Cimento	39
3.2. MÉTODOS	39
3.2.1. Preparação dos CP's Utilizados nos Ensaios Mecânicos	41
3.2.2. Composição Granulométrica das Misturas Asfálticas	41
4. RESULTADOS	43
4.1. DOSAGEM DA MISTURA DE REFERÊNCIA	43
4.2. DOSAGEM DO TEOR DE BORRACHA	44
4.3. UMIDADE INDUZIDA	46
4.4. ENSAIO CÂNTABRO	46
4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	48

5. CONCLUSÕES.....	50
6. REFERÊNCIAS.....	52
ANEXO A – Valores limites para parâmetros Marshall.....	57
ANEXO B – Valores mínimos de vazios de agregados mineral	58

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o sistema de transporte terrestre no Brasil é baseado essencialmente em rodovias. A malha rodoviária é composta de 1.720.700 km de rodovias, das quais apenas 213.453 km são pavimentados (12,4%) num país onde mais de 60% do transporte de cargas e mais de 90% dos deslocamentos de passageiros são feitos por rodovias (CNT, 2018). Desta forma, é indiscutível que a condição das estradas brasileiras tem valor imprescindível no crescimento econômico do País, implicando em diversos aspectos como o aumento no consumo de combustível, elevação dos índices de acidentes e acréscimos nos custos operacionais de veículos.

No entanto, a malha rodoviária brasileira encontra-se em situação precária e a idade avançada dos pavimentos no país, bem como outros fatores como a falta de manutenção, sobrecarga de caminhões, fundações não apropriadas, falta de drenagem adequada, materiais sem a qualidade desejada, geometria inadequada, má sinalização, má execução etc. contribuem com a situação. Contudo, todo pavimento é projetado para uma determinada vida útil e é natural que durante e após esta vida útil sejam feitas intervenções, buscando-se aumentar a durabilidade do revestimento e do pavimento (PINHEIRO, 2004), incentivando a reabilitação destes através do uso de técnicas que empreguem materiais não convencionais e que alcancem o comportamento mecânico desejado pelas normas brasileiras.

Além disso, juntamente com o aumento demográfico ocorrido nas últimas décadas, houve também um aumento exponencial na produção de carros e, conseqüentemente, na quantidade e nos tipos de resíduos gerados como, por exemplo, os pneus inservíveis. Os pneus inservíveis, quando descartados em locais inadequados, servem como local de procriação de mosquitos e outros vetores de doenças e representam um risco constante de incêndios que contaminam o ar com fumaça altamente tóxica e produzem um óleo que se infiltra e contamina o lençol freático (ODA, 2002). Porém, à borracha utilizada para a confecção de pneus, são adicionados elementos químicos que dificultam o processo de reutilização (SOUZA, 2009), de forma que os pneus inservíveis não possam ser processados facilmente e, portanto, considerados como uma das substâncias que geram maior malefício para o meio ambiente (GHASEMI; MARANDI, 2013).

Em 26 de agosto de 1999 foi aprovada a Resolução nº 258/99 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), determinando a obrigatoriedade das empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos a coletar e dar destinação final adequada aos pneus inservíveis. Em 2004, 120 milhões de pneus foram gerados na China (YAZID et al., 2015) e quase 300 milhões de pneus são gerados anualmente nos Estados Unidos (ABDELRAHMAN, 2014). De acordo com a Agência Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), em 2016, dentre várias categorias de

produção, foram produzidos aproximadamente 67.870.350 pneus no Brasil. Antes da lei mencionada ser aprovada, o Brasil reciclava somente 10% dos pneus produzidos, porém, após a aprovação, o número de empresas cadastradas no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para realizar o processo de recolhimento e destruição dos pneus cresceu continuamente (FLORIANI; FURLANETTO; SEHNEM, 2016), facilitando a utilização da borracha de pneu na pavimentação.

A pavimentação consome um volume excessivo de materiais, sendo uma fonte de aplicação racional de resíduos e rejeitos. A geração de resíduos de pneus pela indústria tem representado um problema mundial contínuo, sinalizando a necessidade de seu reaproveitamento, porém, sem aceitação de menor qualidade, mas na adequação deste material alternativo às condições de uso e às solicitações dos pavimentos (SEYDELL; LINTZ, 2009).

Nas últimas décadas, o uso de aditivos para melhorar o desempenho do concreto asfáltico tem sido praticado por engenheiros e investigado por pesquisadores. O reforço de concreto asfáltico usando diferentes materiais é um método comum de melhorar seu desempenho. Envolve a incorporação de certos materiais com algumas propriedades desejadas dentro de outro material que não possui essas propriedades (TAHERKHANI, 2016).

Tendo em vista isto, este trabalho tem o objetivo de estudar o potencial da utilização de borracha de pneu triturada em substituição parcial dos agregados em misturas asfálticas por meio do processo seco, obtendo-se um material com propriedades que permitam seu uso na pavimentação. E, para que seja possível atingir estes objetivos, primeiramente foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados e das misturas para que se possa conhecer o objeto de estudo. Além disso, também foi analisada a influência das porcentagens de partículas de borracha de pneu nas misturas e o efeito da adição de raspas de borracha de pneu sob os vários aspectos que condicionam o bom desempenho de uma mistura em campo através da caracterização mecânica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta algumas definições importantes para o entendimento do trabalho como um todo e um breve histórico das técnicas de destinação dos pneus inservíveis bem como técnicas de incorporação de pneu em raras para melhoria do asfalto.

2.1. PAVIMENTOS

De acordo com a NBR 7207 (1982) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), o pavimento pode ser definido como uma estrutura construída após terraplanagem e destinada economicamente e simultaneamente, em seu conjunto, a:

- a) Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos;
- b) Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) Resistir aos esforços horizontais que nela atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

No entanto, o Manual do DNIT (2006) define pavimento como uma superestrutura constituída por um sistema de camada de espessuras finitas, assentadas sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito (infraestrutura ou terreno de fundação) a qual é designada de subleito.

As camadas que fazem parte do pavimento são definidas pela NBR 7207 (1982) da ABNT como:

- a) Subleito: terreno de fundação do pavimento ou do revestimento;
- b) Sub-base: camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplanagem;
- c) Base: camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre o qual se constrói um revestimento.
- d) Camada de ligação: ligação entre revestimento e base formada por misturas de agregados e cimento asfáltico.
- e) Revestimento: camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos.

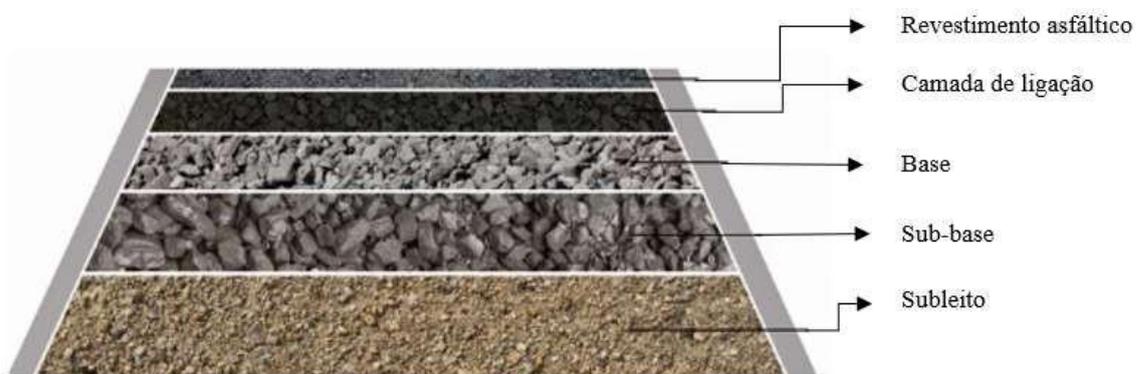


Figura 1 - Camadas do pavimento

Este trabalho tem como foco o revestimento, cama superficial do pavimento, ao qual foram adicionadas diferentes teores de borracha de pneu para análise e, posteriormente, submetidos à ensaios mecânicos.

2.2. PNEUS

Os pneus para veículos de transporte são camadas de borracha ajustadas a um aro e têm o objetivo de amortecer o contato entre o veículo e a estrada pela qual este transita. O conforto proporcionado pelos pneus se deve à absorção dos choques mecânicos pelo ar comprimido dentro do pneu, como também pela composição elástica da borracha (PINHEIRO, 2004).

De acordo com a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2018), no Brasil, mais de 60% do transporte de cargas e mais de 90% dos deslocamentos de passageiros são feitos por rodovias, resultando numa excessiva quantidade de pneus necessários para suprir a demanda, consolidando o mercado de pneus no país.

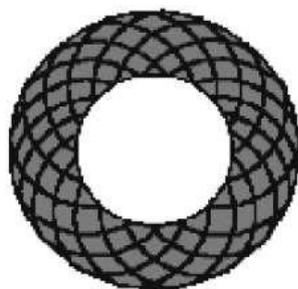
2.2.1. Estrutura e Composição dos Pneus

A Tabela 1 abaixo apresenta a composição e a porcentagem em peso de cada material utilizado para a fabricação de pneus de automóveis, caminhões e ônibus, juntamente com seu peso médio.

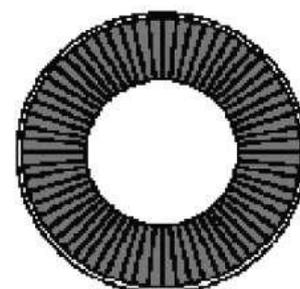
Tabela 1 - Composição dos materiais utilizados nos pneus de passeio e carga
Fonte: (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

Materiais	Pneus de automóvel (%)	Pneus de carga (%)
Borracha natural	14	27
Borracha sintética	27	14
Negro de fumo (carbono)	28	28
Aço	14 - 15	14 - 15
Tecido, antiozônio, aceleradores, óleos, etc.	16 - 17	16 - 17
Peso	Peso médio do pneu novo 8,5 kg. No Brasil, o pneu inservível pesa 5 kg, conforme a instrução normativa nº 8 do IBAMA, de 15 de maio de 2002.	No Brasil, o pneu inservível pesa 40 kg, conforme a instrução normativa nº 8 do IBAMA, de 15 de maio de 2002

Os pneus podem apresentar construção radial ou convencional, conforme a Figura 2 abaixo. A construção radial proporciona ao pneu maior flexibilidade e resistência. Essas características se resumem em maior durabilidade, melhor aderência e maior eficiência na aceleração e desaceleração (BERTOLLO, 2002).



(a) Pneu Diagonal (Convencional)



(b) Pneu Radial

Figura 2 - Construção do pneu
(Fonte: BERTOLLO, 2002)

A Figura 3 apresenta partes que compõem um pneu: carcaça, banda de rodagem, talões, e flancos.

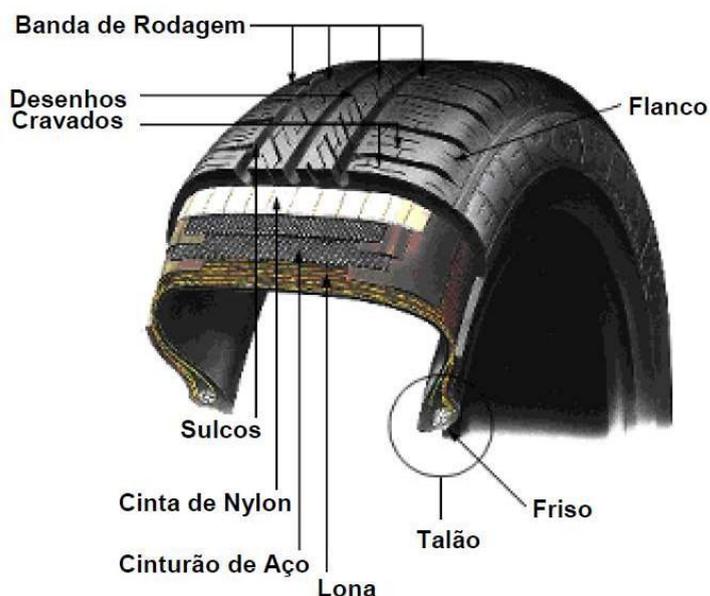


Figura 3 - Partes que compõem o pneu
(Fonte: BERTOLLO, 2002)

A carcaça é a parte resistente do pneu, constituída por lonas de poliéster, náilon ou aço. Tem como função reter o ar sob pressão que suporta o peso total do veículo. Nos pneus radiais as cinturas complementam sua resistência (BERTOLLO, 2002).

Os talões são constituídos internamente de arames de aço de alta resistência e têm como objetivo manter o pneu acoplado ao aro. A banda de rodagem é a parte do pneu que possui contato direto com o solo, sendo fabricada por composto de borracha de grande resistência ao desgaste. Os flancos protegem a carcaça de lonas e são providas de uma mistura especial de borracha com alto grau de flexibilidade (BERTOLLO, 2002).

2.2.2. Pneus Inservíveis

Embora os pneus sejam primordiais para o desenvolvimento da sociedade moderna, ao final de sua vida útil causam diversos problemas para o meio ambiente e para a saúde pública se descartados inadequadamente.

Do ponto de vista da saúde pública, o descarte de pneus inservíveis em terrenos baldios é danoso pois tende a gerar um acúmulo de água pluviais que, associado às condições de calor geradas pela luz do sol, criam um ambiente propício para a proliferação de mosquitos

transmissores de doenças como dengue e febre amarela (CIMINO, 2004). O volume e a forma dos pneus não apenas dificultam sua compactação, aumentando o custo de seu transporte, armazenamento e descarte, mas também são feitos de diferentes formulações e reforços de materiais, como fibras sintéticas e aço, dificultando sua reciclagem (DE SOUZA; D'AGOSTO, 2013)



Figura 4 - Pneus inservíveis recolhidos em Usina de Tratamento Ecológico de Pneus (Fonte: UTEP, 2019)

A fim de evitar os danos causados pelos impactos ambientais gerados pelos pneus, decorrentes de sua produção excessiva, vêm sendo adotadas no Brasil e no mundo algumas formas de redução, tais como reciclagem e reuso dos materiais. Estas medidas visam a redução de extração de recursos naturais maximizando a vida útil dos aterros sanitários.

A Resolução do CONAMA nº 258/99 afirma que pneumático inservível, ou pneu inservível, é aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional, enquanto que pneus novos, mesmo depois de usados, ainda podem ser utilizados em processo de reciclagem.

No entanto, é possível recuperar e reutilizar parte dos pneus inservíveis recuperando-se parte dos materiais utilizados em sua produção. A Figura 5 representa a cadeia de destinação ambientalmente correta de pneus.

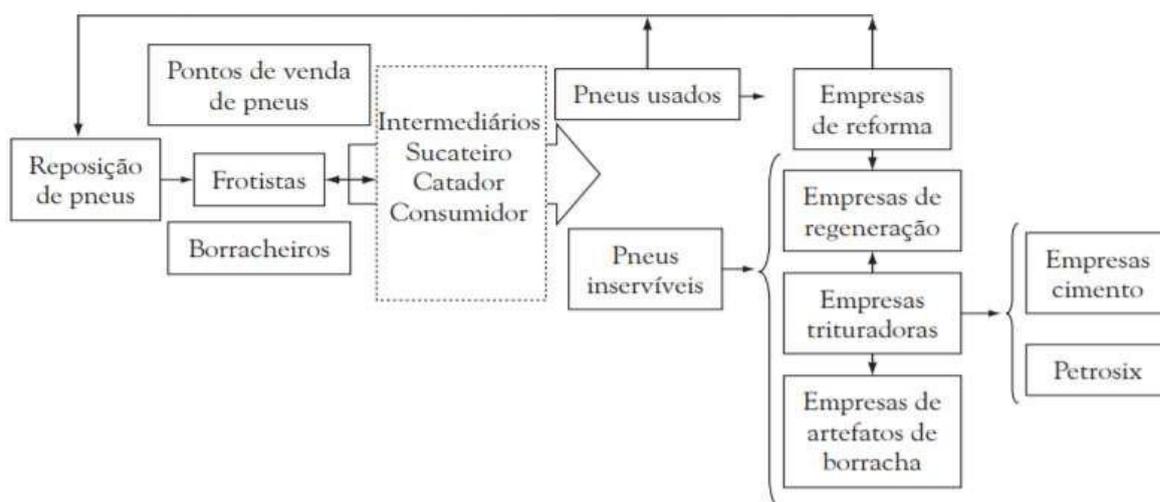


Figura 5 - Cadeia de reposição de pneus
(Fonte: MOTTA, 2008)

Os pneus descartados podem ficar depositados nos pontos de venda de pneus, em borracheiros, ou podem ser levados de volta para casa pelo consumidor. Ao retornar com o pneu para casa, pode ser vendido para sucateiros e catadores, caso sejam pneus usados. Porém se for inservível, pode ocorrer o acúmulo do material. Os pneus usados, dependendo de suas condições, podem ser vendidos diretamente no mercado de segunda mão, ou são vendidos para empresas que realizam reforma dos pneus. Depois de reformados os pneus retornam para o mercado de reposição. Os pneus inservíveis podem seguir três caminhos: os pneus convencionais são destinados para as empresas que realizam a laminação e transformação da borracha em artefatos diversos, como solados, cintas de sofá, tapetes para carros etc; os pneus radiais, na maior parte das vezes, são triturados e depois encaminhados para empresas produtoras de cimento, para queima nos fornos de clínquer, ou para o Processo Petrosix® (unidade produtiva de Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS) que processa xisto betuminoso para obtenção de petróleo bruto) que os co-processa; ou os pneus podem ser encaminhados para empresas regeneradoras de borracha, que os transforma em pó de borracha (MOTTA, 2008).

A partir da pulverização ou granulação da borracha, obtêm-se diversas aplicações para o material, como utilização em misturas asfálticas, revestimentos de quadras e pistas de esporte, fabricação de tapetes automotivos etc. (BERTOLLO, 2002).

2.2.3. Processo de Recapagem de Pneus

De acordo com a OST (2019), empresa brasileira que oferece serviços de reforma de pneus, existem 3 processos de recapagem de pneus exibidos abaixo na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Processos de recapagem de pneus

Pneu remoldado	O pneu é reconstruído a partir de uma carcaça usada. O processo de remoldagem retira a banda de rodagem lateral usada, e anova cobertura se estende de talão a talão, ou seja, cobre toda a área do pneu incluindo suas laterais. A remoldagem é realizada através do processo a quente, ou seja, os pneus são submetidos a moldes individuais por um período de tempo que varia conforme o tamanho do pneu a uma temperatura de 150 °C e com 150 libras de pressão.
Pneu recapado	Possui sua banda de rodagem (parte do pneu que entra em contato com o solo) substituída. A recapagem pode utilizar o processo a quente ou a frio. No processo a frio, a banda aplicada no pneu já vem com os sulcos desenhados de fábrica. Nesse sistema, o processo ocorre através de autoclave pressurizada à temperatura efetiva de 110 °C. Os pneus são inflados e permanecem nessas condições por um período de 3 horas. No processo a quente é utilizado o “camelback” para repor a borracha desgastada na rodagem que é vulcanizada em moldes.
Pneu recauchutado	No pneu recauchutado, a banda de rodagem também é retirada, entretanto, a nova banda tem uma área de cobertura maior do que a usada no pneu recapado, chegando a cobrir os ombros do pneu, ou seja, a junção entre a banda de rodagem e a parte da lateral dos pneus. O processo de recauchutagem é realizado a quente.

2.3. DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS

As misturas asfálticas são comumente utilizadas nos pavimentos como camadas de revestimento. Os defeitos mais significativos que ocorrem em estruturas flexíveis se refletem no revestimento e permitem identificar dois modos diferenciados de solicitação mecânica: flexão

repetida, responsável pela fadiga do material associada ao trincamento do revestimento ou de camadas cimentadas, e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes (SPETCH, 2004).

No geral, é seguro dizer que o bom desempenho do pavimento é o produto do bom design, uso de materiais duráveis, boa compactação e conservação seca da sub-base (MOAUKET; CAPANO, 2013), no entanto, esta não é a realidade presenciada na grande maioria das rodovias brasileiras onde o trincamento é a principal causa de ruptura dos pavimentos rodoviários e o afundamento em trilhas de roda também é um fenômeno bastante presente (SPETCH, 2004). Os principais fatores considerados causadores da degradação dos pavimentos flexíveis são o tráfego e o clima, principalmente em se tratando de trincamento por fadiga e afundamento em trilha de roda, que na maioria dos casos é causada pelo resultado do acúmulo de deformações plásticas nas diversas camadas (BLASS; SPETCH; BORGES, 2010).

Baseado na literatura é definido três fases para a propagação de fendas de fadiga, conforme Figura 6, conhecidas como iniciação das fissuras, crescimento estável e crescimento instável. As fissuras de fadiga geralmente se iniciam sob a forma de microfissuras e prosseguem como rachaduras que crescem devido ao cisalhamento e tensões de tração no pavimento rodoviário (MOGHADDAM; KARIM; ABDELAZIZ, 2011).



Figura 6 - Fissura em revestimento asfáltico
(Fonte: CNT, 2018)

O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o desempenho do pavimento, portanto, é fundamental conhecer as características de ruptura dos materiais envolvidos na realização dos trabalhos, tendo em vista que o comportamento dos revestimentos sob solicitações à flexão e a compressão é caracterizado por leis fenomenológicas específicas: lei de fadiga e lei de deformação permanente (PINTO, 1991).

2.4. APLICAÇÕES DE BORRACHA DE PNEU EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A primeira estrada com asfalto modificado por borracha foi construída em Cannes, França, em 1902, no entanto, os asfaltos modificados antes da Segunda Guerra Mundial eram constituídos apenas pela adição de borracha natural (ODA, 2000).

Somente no início da década de 60 houve, pela primeira vez, o teste de aplicação de uma mistura de asfalto e borracha sobre um trecho de pavimento asfáltico repleto de trincas em uma rua na cidade de Phoenix, Arizona, no Estados Unidos. Posteriormente verificou-se que essa mistura apresentou maior elasticidade, maior resistência à oxidação, menor suscetibilidade térmica, melhor recuperação elástica e maior resistência à fadiga quando comparada com a mistura original (BALAGUER, 2012).

Há mais de 50 anos a mistura de asfalto e borracha vem sendo aperfeiçoada em países da Europa e nos Estados Unidos para potencializar os seus benefícios mecânicos nos revestimentos asfálticos. No Brasil, no entanto, sua primeira aplicação foi há apenas 15 anos e ainda há muito o que ser estudado (KLINSKY; FARIA, 2017).

Os agregados utilizados em misturas asfálticas precisam ter certas propriedades para que apresentem características apropriadas a um desempenho desejável, contudo, a busca por pavimentos mais resistentes ao fadigamento e à deformação permanente, associada à preocupação ambiental com a disposição inadequada de pneus inservíveis, motivou ainda mais o uso de borracha moída em misturas asfálticas, gerando uma nova mistura alternativa denominada de asfalto borracha. Autores afirmam que a adição do agregado de borracha ao asfalto, traz diversos benefícios ao asfalto, como o aumento da durabilidade, a resistência à fissuração, da deformação permanente e redução da suscetibilidade à temperatura (MOAUKET; CAPANO, 2013) além de também melhorar o conforto e a segurança na direção e reduzir o ruído do tráfego (XIANG; CHENG; QUE, 2009). O asfalto contendo borracha reaproveitada de pneus usados tem valor de venda cerca de 30% acima do convencional, podendo ser considerado um investimento, pois, além de ajudar a combater o passivo de pneus descartados no ambiente, dura mais que o convencional (MASSON. *et al*, 2017). A incorporação da borracha de pneus

descartados às misturas asfálticas pode ser feita de duas formas distintas: processo seco e processo úmido.

2.4.1 Processo Úmido

O processo úmido é o que dá origem ao ligante denominado asfalto-borracha, definido pela ASTM D 6114-97 como “uma mistura de cimento asfáltico, borracha de pneu reciclada e certos aditivos, dos quais o percentual de borracha deve ser pelo menos 15% em massa do total da mistura, e sofrer reação com o ligante asfáltico aquecido, de forma a causar um inchamento das partículas de borracha” (DIAS, 2005).

Neste processo, são transferidas para o asfalto algumas características químicas da borracha vulcanizada como inibidores de raios ultravioletas e antioxidantes, produzindo assim um material com maior resistência ao envelhecimento e à fissuração (DIAS, 2005), no entanto, a capacidade da borracha em pó de melhorar a mistura de asfalto depende de muitos fatores, tais como métodos de mistura, tempo de reação com betume, natureza da borracha e tamanho e concentração das partículas de borracha (ODA, 2000).

Normalmente, a preparação do ligante modificado com borracha pelo processo úmido é *just in time* (preparada no canteiro de obras e utilizada imediatamente, porém, no Brasil, está sendo utilizada a tecnologia *terminal blending*, onde a mistura é efetuada em uma unidade central e transportada até o local de aplicação (SPECHT, 2004). O ligante deve ser beneficiado em temperaturas elevadas por agitação em alto cisalhamento, resultando em produto final mais viscoso (ODA, 2000).

2.4.2 Processo Seco

O processo seco define os métodos que misturam a borracha com o agregado mineral antes da adição do cimento asfáltico, utilizando a borracha como mais um agregado da mistura asfáltica (BALAGUER, 2012). Neste processo, a utilização de pó de pneu reciclado em concreto asfáltico a seco, caracteriza-se por utilizar o resíduo como um aditivo ao agregado adicionando pedaços sólidos de borracha como substituição de no máximo 5% do agregado (SPECHT, 2004).

A granulometria é normalmente a mesma da utilizada em misturas convencionais, no entanto, são necessárias temperaturas maiores para a mistura (166 – 188 °C) e para compactação (148 – 160 °C). A interação existente entre o ligante e a borracha é muito pequena, comparada ao processo úmido, e os inibidores de raios ultravioletas e antioxidantes presentes na borracha

não chegam a ser transmitidos para o asfalto, razão pela qual o processo seco tem sido menos utilizado que o processo úmido (DIAS, 2005)

A Tabela 3 (adaptada BERTOLLO, 2002 *apud* EPPS, 1994) apresenta algumas das tecnologias de incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas por ambos os processos seco e úmido.

Tabela 3 - Tecnologias de incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas

Tecnologia	Características
Processo	<p><i>Plus Ride®</i> Os agregados pétreos apresentam descontinuidade na sua curva de distribuição granulométrica para acomodar partículas relativamente grandes de borracha (até ¼”) nos teores especificados (em torno de 3% do peso total da mistura)</p>
seco	<p><i>Generic System</i> Parte dos agregados pétreos são substituídos por partículas de borracha com granulometria fina, para que ocorra reação parcial com o ligante, e em menores teores.</p>
	<i>Chunky Rubber</i>
Processo	<p><i>McDonald</i> Consiste na mistura de cimento asfáltico e borracha triturada (15% a 25% do peso do ligante) a uma temperatura elevada (170 °C a 200 °C) durante um determinado período (20 a 120 minutos). A mistura reage e forma um composto denominado asfalto borracha com propriedades reológicas diferentes do composto original.</p>
úmido	<p><i>Continuous Blending</i> Partículas finas de borracha são adicionadas ao cimento asfáltico em um processo contínuo. Difere da tecnologia <i>McDonald</i> no teor de borracha que é menor (8% a 10%), dimensão das partículas de borracha menor, temperatura de mistura e tempo de reação menores.</p>
	<p><i>Terminal Blending</i> No <i>terminal blending</i>, a borracha do pneu é misturada ao cimento asfáltico na refinaria e enviada para a</p>

planta de produção de mistura quente como um produto acabado, sendo permitida uma armazenagem prolongada do ligante asfalto-borracha.

Fonte: BERTOLLO, 2002

2.5. DOSAGEM DE MISTURA ASFÁLTICA

As misturas asfálticas vêm sendo utilizadas nas construções de rodovias desde o começo do século XX, quando o asfalto manufaturado passou a ser mais disponível (SENÇO, 2001), mas sua dosagem tem sido uma tarefa mais complexa do que parece pois, por exemplo, melhorar um aspecto do comportamento mecânico pode representar a piora do outro.

As propriedades desejáveis de uma mistura asfáltica são função da sua posição como camada na estrutura do pavimento e da finalidade a que se destinam. Assim, as camadas de base e sub-base exigem materiais com rigidez adequada para distribuir as cargas sobre o terreno de fundação sem que ocorram deformações excessivas. Por outro lado, materiais utilizados nas camadas em contato direto com as rodas dos veículos demandam quanto à deformabilidade, à vida de fadiga, à durabilidade e aspectos de superfície: rugosidade, drenabilidade, ruído, etc. (ANTT, 2014).

A aplicação de revestimentos asfálticos deve ser precedida por ensaios que permitam a obtenção do teor (ou quantidade) de ligante a ser utilizado na mistura, para que a mesma se enquadre dentro de especificações que são definidas com a finalidade de evitar desagregação prematura da mistura, por falta de ligante, ou superfícies escorregadias e deformáveis, por excesso de ligante. Existem diversos métodos, cada um com critérios próprios que objetivam o estabelecimento de relações entre ensaios de laboratório e ensaios obtidos em campo, dentre eles: método Hveem, método Marshall, método Triaxial de Smith, método SUPERPAVE® e método Bailey. Neste trabalho focaremos nos métodos Marshall.

O método de dosagem Marshall utilizado neste trabalho é caracterizado pela seleção do ligante asfáltico e do agregado de modo a atender determinadas especificações de projeto. No método normatizado, define-se a faixa granulométrica em função da camada em que a mistura será utilizada. A partir da escolha do tipo de ligante são moldados cinco grupos de três corpos de prova com diferentes teores de asfalto mediante aplicação de 75 golpes por face (ANTT, 2014).

É importante considerar que a dosagem Marshall, método ainda mais utilizado no país, segue as orientações da norma do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) e que esta, embora parecida com a da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e com os

procedimentos recomendados pelo Instituto de Asfalto norte-americano, não foi talvez atualizada de acordo com as mudanças ocorridas nas citadas normas estrangeiras ao longo de revisões sucessivas, em pelo menos dois pontos importantes: a consideração da absorção de ligante pelos agregados e o uso da massa seca com superfície saturada e o uso de fórmula para cálculo da Densidade Máxima Teórica (DMT) (BERNUCCI *et al*, 2008).

Com o intuito de melhorar o desempenho, durabilidade, segurança e eficiência de misturas asfálticas, em 1987, o congresso americano propôs a formação do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que produziu o sistema chamado de *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE®). O sistema SUPERPAVE® inclui avanços significativos em procedimentos de ensaios para a classificação de ligantes e para a dosagem de misturas asfálticas. Além disso, o sistema também define as chamadas propriedades de consenso e de origem de agregados (PAZOS; SACRAMENTO; MOTA, 2015).

A maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos Estados Unidos entre 1940 e 1990 foi dosada utilizando a metodologia Marshall ou Hveem, porém, desde 1993, porém, as universidades e departamentos de transporte norte-americanos vêm utilizando a metodologia SUPERPAVE®, que também já está sendo utilizada no Brasil (BERNUCCI *et al*, 2008). A maior diferença entre este novo procedimento e o Marshall é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem SUPERPAVE® é realizada por amassamento (giros). Neste trabalho, no entanto, a dosagem será realizada pelo procedimento Marshall.

O método de ensaio do DNER (1995) estabelece os procedimentos para Ensaio Marshall que consistem, resumidamente, nos seguintes passos:

- a) Preparação dos corpos de prova: agregados e asfaltos são aquecidos até a temperatura determinada e misturados. A mistura é posicionada no molde aquecido e compactada com 75 golpes em cada lado do corpo de prova com um soquete caindo a uma altura de 45, 72 cm. Devem ser confeccionados 3 corpos de prova para cada teor de asfalto, para que se possa escolher o teor de projeto do asfalto.
- b) Ensaio: o corpo de prova confeccionado para o ensaio Marshall deve ter o formato cilíndrico com diâmetro de 10,2 cm e altura de 6,35 cm. Após extraídos do molde, são deixados em repouso durante 12h ao ar livre. Em seguida são pesados ao ar e imersos em água para obtenção dos dados necessários para o cálculo de suas características físicas. Antes de serem submetidos aos ensaios para determinação

de características mecânicas, os corpos de prova são imersos em água à 60°C por um período de 30 a 40 minutos.

- c) Curvas típicas obtidas: a partir dos dados obtidos, é possível determinar o teor ótimo de ligante atendendo aos limites para estabilidade (E), fluência (F), volume de vazios (Vv) e relação betume vazios (RBV).

2.6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

2.6.1. Dano por Umidade Induzida

O ensaio de dano por umidade induzida, também conhecido como ensaio Lottman modificado, visa determinar a capacidade da mistura asfáltica em manter sua resistência à tração após a ação deletéria da água em ciclos de temperaturas intermediárias e baixas, evidenciando os possíveis problemas de adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico. No Brasil, o ensaio é descrito pela norma ABNT NBR 15617/2011 e consiste em comparar os valores de resistência à tração por compressão diametral entre grupos de corpos de prova com vazios entre 6 e 8% e saturação entre 55 e 80% com e sem condicionamento térmico.

O condicionamento consiste em envolver os corpos de prova em filme plástico e mantê-los à -18°C por 16h, retirar o filme plástico e manter os CPs em banho de 60°C por 24h, estabilizando a temperatura dos CPs em banho de 25°C, conforme a AASHTO T 283. A avaliação do dano causado pela umidade nas misturas asfálticas é bastante relevante, na medida em que ela afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos (PINHEIRO, 2004). Para misturas dosadas a partir do método Marshall, a relação de resistência à tração inferior à 70% indica que a mistura é suscetível ao dano por umidade. O ensaio está representado pela Figura 7 abaixo.



Figura 7 - Detalhes do ensaio de umidade induzida (Lottman modificado)

2.6.2. Resistência à Tração

Este ensaio, desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE)/ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), determina a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland através da solitação estática, é conhecido em vários centros de pesquisa no exterior como “ensaio brasileiro” (BRUXEL, 2015). Posteriormente, o investigador Schimidt da Chevron, Califórnia, introduziu este ensaio para misturas betuminosas sob carregamento repetido (DIAS, 2005).

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) constitui um parâmetro bastante importante na caracterização de misturas asfálticas. O ensaio consiste na aplicação de carga progressiva, a uma taxa de 0,8 a 1,0mm/s, em corpo de prova previamente condicionado por duas horas à temperatura desejada, 25°C neste trabalho, até se dar a ruptura, em duas metades, ao longo de um plano diametral. Então a carga máxima é colocada na Equação 1 e a resistência à tração é calculada (PINHEIRO, 2004).

$$RT = \frac{2F}{100\pi DH}$$

onde, RT – resistência à tração, MPa

F – carga máxima de ruptura, N

D – diâmetro do corpo de prova, cm

H – altura do corpo de prova, cm.

A realização deste ensaio pode ser feita utilizando-se a prensa de ensaio de estabilidade Marshall, conforme mostrado na Figura 8.



Figura 8 - Detalhes da prensa de ensaio de resistência à tração por compressão diametral

2.6.3. Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência é um fator importante na definição do dimensionamento racional dos pavimentos, sendo um módulo de elasticidade obtido em condições de carregamento cíclico de baixa duração, ao qual são submetidos os materiais de pavimentação (BRUXEL, 2015). É definido como a relação entre a tensão de tração, aplicada em um corpo de prova cilíndrico Marshall, e a deformação específica recuperável relacionada à tensão aplicada em uma determinada temperatura. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga e, então, mede-se o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada (BERNUCCI et al., 2008). Trata-se de um ensaio que apresenta fácil execução e obtenção de corpo de prova (cilindro Marshall) e boa representação do estado de tensões que ocorre no pavimento em serviço (BERTOLLO, 2002). O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada e isso permite ensaio em diversas temperaturas. A Figura 9 apresenta um corte esquemático do equipamento.

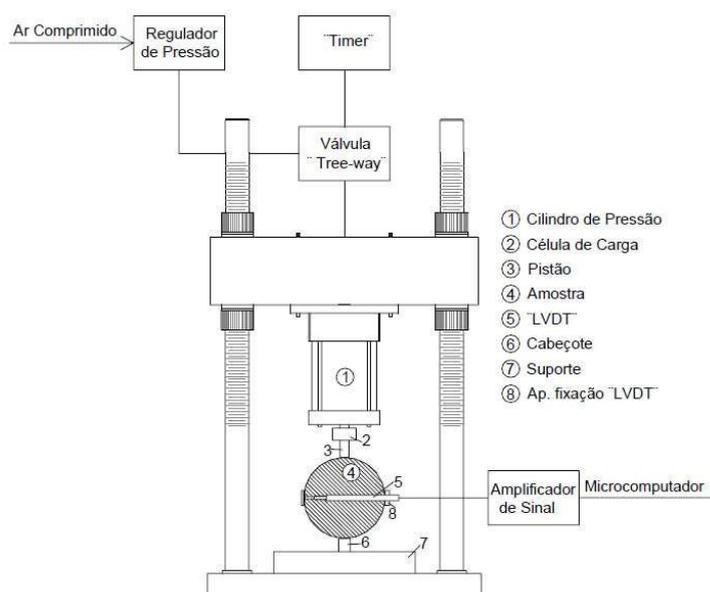


Figura 9 - Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência (Fonte: Specht, 2004)

2.6.4. Resistência à Fadiga

O fenômeno conhecido como fadiga é definido como (ASTM, 1979): “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”. Ela ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas isoladamente, se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na realidade são determinantes na vida útil do pavimento (Bernucci et al., 2008).

O trincamento por fadiga é uma das mais comuns manifestações de mau desempenho ou ruptura de um pavimento, manifesta-se através do surgimento de trincas longitudinais nas trilhas de roda e propaga-se pela superfície do pavimento na forma de trincas interligadas tipo couro de jacaré. As trincas podem ter seu início, através de forças cisalhantes, na superfície do pavimento ou de tensões de tração na fibra interior de camada asfáltica (SPECHT, 2004) e suas características são expressas em relação à tensão ou deformação inicial atuante e o número de repetições de carga até a ruptura. (BERNUCCI et al, 2008).

O ensaio laboratorial de vida de fadiga tradicionalmente realizado no Brasil para definição do número de repetições de carga é feito por compressão diametral à tensão controlada (TC), sendo a carga aplicada em uma frequência de 1 Hz através de equipamento pneumático.

Pode-se utilizar o mesmo equipamento de determinação do Módulo Resiliente para o ensaio da vida de fadiga. Este ensaio tem sido realizado no país, geralmente com tensão e temperatura controladas, utilizando uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,1 segundos de duração do carregamento repetido e descanso de 0,9 segundos (BALAGUER, 2012)

2.6.5. Ensaio Cântabro

O ensaio cântabro visa avaliar, indiretamente, a coesão e resistência à desintegração das misturas betuminosas ante os efeitos abrasivos originados pelo tráfego, ou seja, permite medir o desgaste por abrasão de misturas asfálticas (PINHEIRO, 2004).

O desgaste é medido na máquina “Los Angeles”, composta por um tambor cilíndrico que rotaciona por 300 revoluções com agregado sem as bolas de ferro fundido no seu interior, de forma que o impacto das bolas com o agregado provoca o desgaste dos grãos. O CP entra no ensaio com uma determinada massa e, depois do atrito, pesa-se novamente para medir o desgaste. O desgaste é determinado pelo percentual de massa perdida durante o ensaio. Este ensaio reproduz, diferentemente do Ensaio Marshall, do ensaio de Compressão Simples ou de Tração Indireta, tendências observadas no desprendimento de agregados das misturas drenantes colocadas em pistas (FILHO, 2001). No caso, busca-se verificar se a adição de borracha proporciona algum benefício às misturas, em termos de resistência à desagregação.

Na Figura 10 é possível observar o modelo de moinho da máquina “Los Angeles” utilizada para realização do ensaio na Universidade Federal do Amazonas (UFAM).



Figura 10 - Moinho de da máquina de Abrasão Los Angeles da UFAM

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação do comportamento da borracha de pneu triturado em misturas asfálticas, desenvolveu-se uma programação de ensaios com o objetivo de determinar propriedades de engenharia relevantes e quantificar o efeito dos principais fatores intervenientes nestas respostas. Serão detalhadas aqui as técnicas de ensaio adotadas para leitura dos resultados variáveis. O presente trabalho atuará em apenas um campo da tecnologia de incorporação de borracha em misturas asfáltica, o processo seco, portanto, os ensaios e dados estão ligados apenas à esta tecnologia.

A Figura 11 abaixo resume a metodologia utilizada neste trabalho.

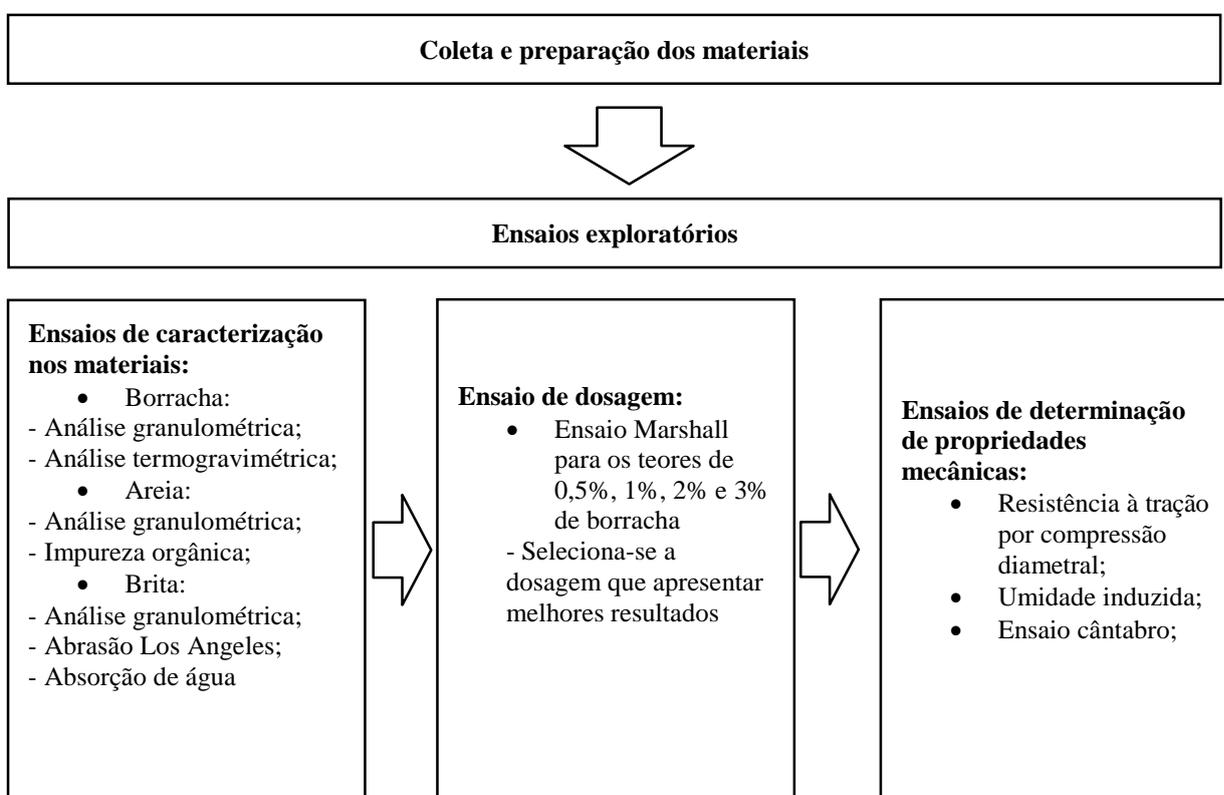


Figura 11 - Metodologia utilizada no trabalho

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Agregado Pétreo (Brita)

Os agregados pétreos escolhidos foram coletados diretamente na unidade de produção da pedreira Britamazon, localizada no bairro Ponta Negra, na cidade de Manaus. Tais agregados são comumente utilizados em pavimentos na região. A Figura 12 ilustra a granulometria utilizada na dosagem e a Tabela 4 apresenta algumas das propriedades do agregado pétreo utilizado.

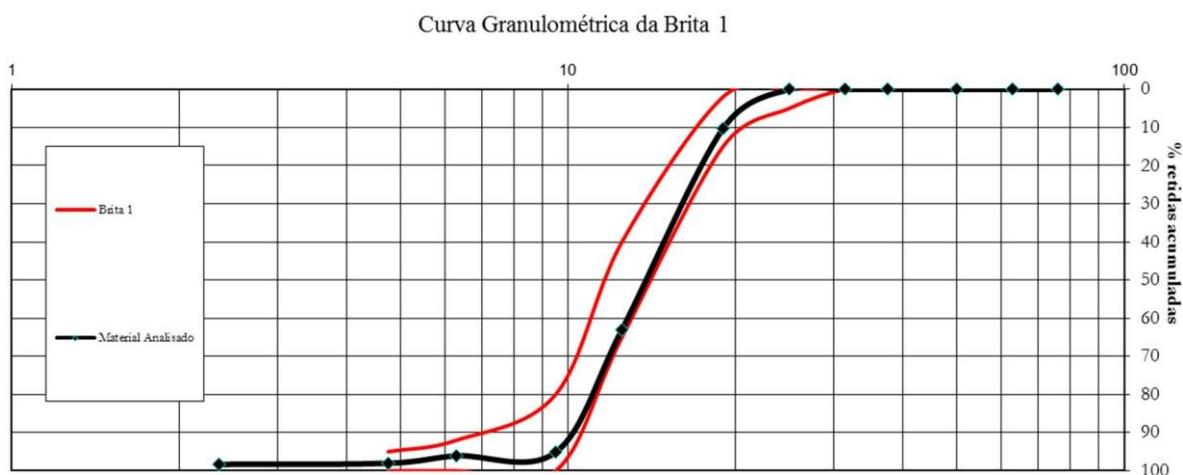


Figura 12 - Curva granulométrica da brita

Tabela 4 - Propriedades dos agregados pétreos

Ensaio	Agregados		Norma utilizada
	Brita 1	Brita 0	
Abrasão Los Angeles	14,3%	11,9%	ABNT NBR NM 51
Absorção	0,48%		ABNT NBR NM 53

No ensaio de absorção realizado, o agregado graúdo analisado apresentou média de absorção de 0,48%. Considerando que agregados naturais ou britados com elevada porosidade normalmente não sejam recomendados em misturas asfálticas, pois além de consumirem maior quantidade de ligante asfáltico, podem apresentar porosidade variável conforme a amostragem, dificultando o estabelecimento do teor de ligante, resultando em excesso ou falta do mesmo (BERNUCCI et al, 2008), o agregado utilizado apresentou muito boa percentagem de absorção.

O ensaio de Abrasão Los Angeles realizado apresentou porcentagem de redução de massa de 13,10%, uma das mais baixas entre as britas da região, ficando dentro dos limites de especificações brasileiras que envolvem o uso de agregados, que sugerem índices de 40% a 55%.

3.1.2. Borracha de Pneu

A borracha em raspas foi doada pela empresa Rio Limpo Amazonas Reciclagem, situada no bairro Coroado em Manaus. Este material foi obtido por meio do processo de recauchutagem. A Figura 13 ilustra a borracha utilizada neste trabalho.



Figura 13 - Raspa de borracha utilizada no trabalho

O ensaio de análise granulométrica também foi realizado nas raspas de pneu. Para a realização deste ensaio, primeiramente o material foi secado em estufa para que não houvesse umidade na amostra que dificultasse o processo e, em seguida, foram removidos manualmente os restos de aço e impurezas (como por exemplo papelão) que viessem a ser encontrados no resíduo. A curva granulométrica ficou disposta conforme a Figura 14.

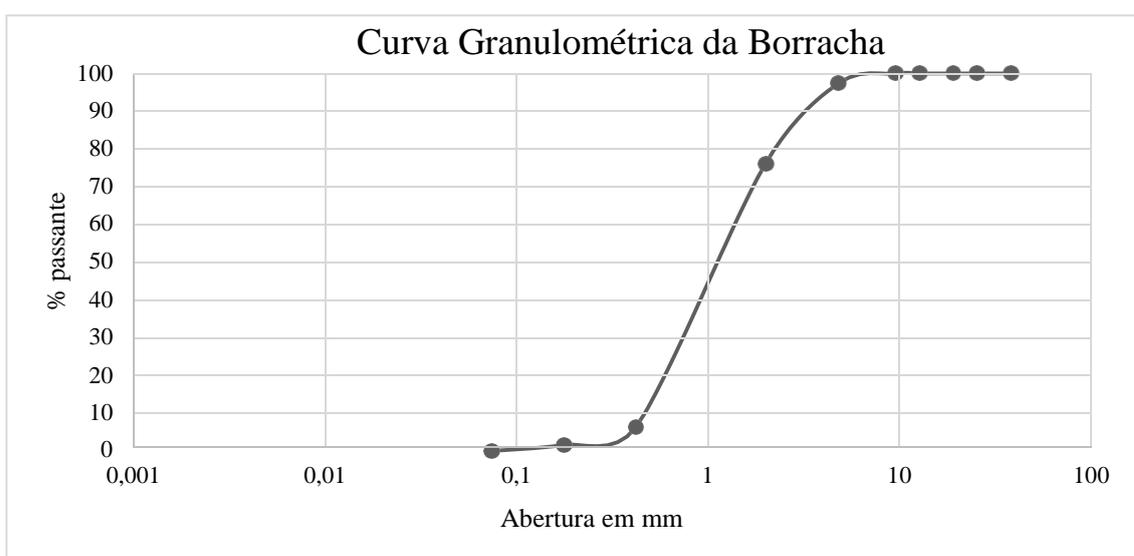


Figura 14 - Curva granulométrica da borracha

Como pode-se perceber, a granulometria da borracha é comparável à de uma areia média a grossa e, por isso, optou-se por fazer a substituição parcial da areia pela borracha nos ensaios realizados mais à frente.

Realizou-se o ensaio de análise termogravimétrica (TGA) conforme a ASTM E2550 (*Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry*) no resíduo de borracha com o objetivo de caracterizar o resíduo de borracha disponível para a pesquisa e ter uma ideia da degradação do material com o aumento da temperatura e com a mudança de atmosfera. A Figura 15 ilustra o equipamento pertencente ao laboratório de Ensaios Físico-Químicos/FT/UFAM, onde o ensaio foi realizado, do tipo SDT Q600 da Ta Instrument.



Figura 15 - Equipamento de análise termogravimétrica

O gráfico resultado da amostra submetida à análise TGA é apresentado na Figura 16 e nele é possível perceber que a borracha de pneu conseguiu manter a perda massa relativamente estável até a temperatura de aproximadamente 300 °C mas, a partir desta temperatura, houve uma grande queda na linha correspondente à massa. Isso indica que a borracha pode trabalhar sem alterações bruscas em sua composição até a temperatura de aproximadamente 300 °C.

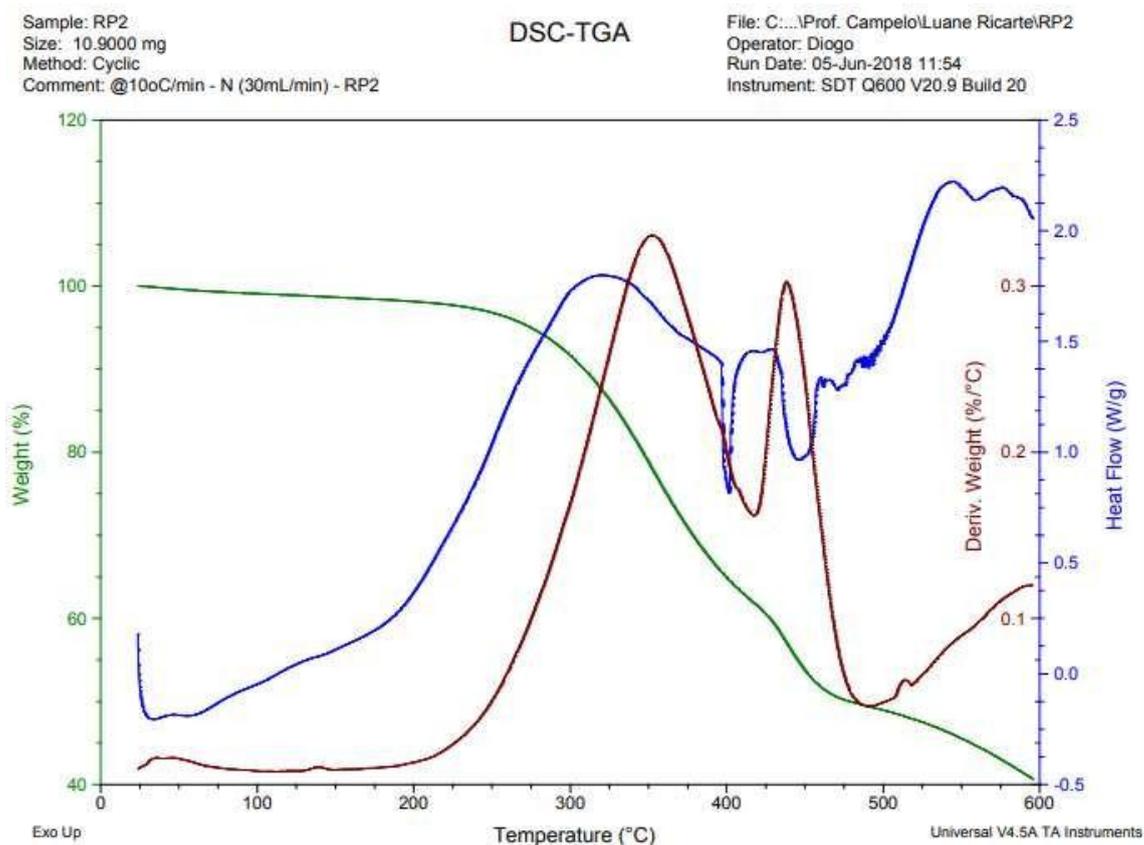


Figura 16 - Gráfico da amostra submetida à análise TG

3.1.3 Areia

A areia utilizada neste trabalho foi adquirida no comércio da cidade de Manaus. Foi realizado primeiramente o ensaio de impurezas orgânicas que permite avaliar a qualidade de uma areia em relação à contaminação com impurezas orgânicas, as quais, conforme sua natureza e teor podem inibir a hidratação do cimento, prejudicar a resistência da mistura e facilitar o aparecimento de fissuras no asfalto depois de endurecido. O ensaio é realizado por meio da comparação entre duas soluções, sendo uma do próprio agregado miúdo com hidróxido de sódio, e a outra, uma solução padrão de hidróxido de sódio e ácido tânico, após um período de 24h. Conforme a DNER ME 55/95, a cor mais escura que a da solução padrão, indica a possibilidade de a areia ser portadora de compostos orgânicos nocivos, ensaios posteriores devem ser realizados visando a aprovação ou rejeição do material, para uso em asfalto.

O resultado obtido para a areia estudada é mostrado na Figura 17. A amostra indicada com o número 1 é a amostra de referência que indica o limite de índice de cor para a amostra estudada, enquanto que a amostra indicada com o número 2 indica a própria amostra estudada. É possível

visualizar que a amostra estudada está levemente mais clara que a referência, portanto, a areia está livre de compostos orgânicos nocivos que possam prejudicar a qualidade do asfalto.



Figura 17 - Ensaio de impurezas orgânicas na areia

Também foi analisada a curva granulométrica da amostra e está representada na Figura 18 abaixo, conforme a NBR 6502/95.

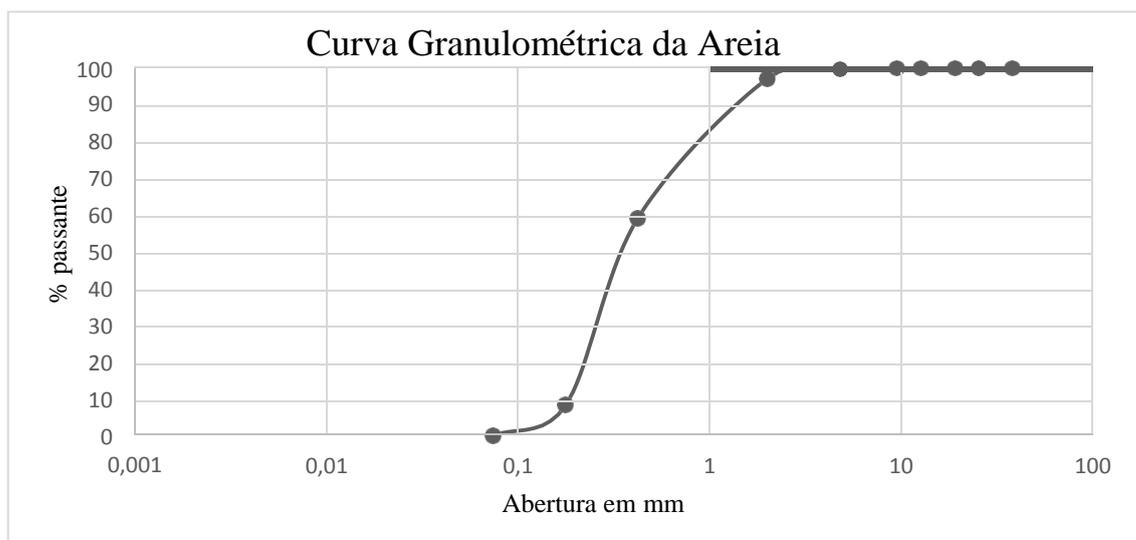


Figura 18 - Curva granulométrica da areia

3.1.4. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP é um material fundamental na realização de ensaios de pavimentação e o utilizado neste trabalho foi o do tipo CA 50/70 fornecido pela Companhia Brasileira de Asfalto da Amazônia (CBAA), localizada no bairro Santa Etelvina, Manaus. A empresa também, gentilmente, forneceu toda a caracterização do ligante apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização do CAP fornecida pela empresa

Característica	Norma (ASTM)	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	54	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	46 min	50,2	°C
Viscosidade Brookfield 135 °C – SP21 20RPM	D 4402	274 min	491	Cp
Viscosidade Brookfield 150°C – SP21	D 4402	112 min	255	Cp
Viscosidade Brookfield 177°C SP21	D 4402	57 a 285	92	Cp
RTFOT – Penetração retida	D 5	55 min	68	%
RTFOT – Aumento do ponto de amolecimento	D 36	8 max	7,6	°C
RTFOT – Ductilidade a 25 °C	D 113	20 min	76	Cm
RTFOT – Variação em % de massa	D 2872	-0,50 a 0,50	0,022	%
Ductilidade a 25 °C	D 113	60 in	>100	Cm
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,5 min	100	% massa
Ponto de fulgor	D 92	235 min	304	°C
Índice de suscetibilidade térmica	X 018	- 1,5 a 0,7	- 1,0	N/A
Densidade relativa a 20/4 °C	D 70	(*)	0,998	N/A
Aquecimento a 177 °C	X 215	(**)	(**)	N/A

(*) Ensaio não faz parte da especificação

(**) Não espuma

3.1.5. Cimento

O cimento utilizado neste trabalho foi do tipo CP II-F-32 da marca Votorantim. O material foi adquirido no comércio da cidade de Manaus. A Tabela 6 apresenta as características físicas do cimento utilizado neste trabalho.

Tabela 6 - Caracterização física e mecânica do cimento.

Propriedade	CP II F-32	Limites de Norma
Finura # 200	1,9	$\leq 12,0$
Finura #325	9,0	N/A
Blaine (cm ² /g)	5470	≥ 2600
Massa específica (g/cm ³)	3,01	N/A
Água de consist. (%)	26,5	N/A
Tempo de pega – Início (min)	176	≥ 60
Tempo de pega – Fim (min)	233	≤ 600
Exp. Quente (mm)	0,8	$\leq 5,0$
Resistência à compressão – 3 dias	24,6	$\geq 10,0$
Resistência à compressão – 7 dias	27,6	$\geq 20,0$
Resistência à compressão – 28 dias	34,2	$\geq 32,0$

Fonte: Boletim de Ensaio fornecido pela Votorantim Cimentos.

3.2. MÉTODOS

O processo aplicado neste trabalho foi o processo seco e sua escolha foi devido à logística com relação à realização de ensaios laboratoriais.

Após a realização dos ensaios de caracterização dos materiais empregados, cujo objetivo foi conhecer o material de estudo e posterior análise da influência dessas características nas propriedades mecânica das misturas, foram estudados também os teores de partículas de borracha de pneu no comportamento mecânico das misturas asfálticas a partir da moldagem de corpos de prova. Foram analisadas inicialmente, por meio da dosagem Marshall, 4 porcentagens de CAP na mistura (4%, 4,5%, 5% e 5,5%) e, após seleção do teor ótimo, foram estudadas inicialmente 4 porcentagens diferentes de raspa de borracha: 0% (para referência), 1%, 2% e 3% para a mesma

quantidade de ligante CAP 50/70 selecionada anteriormente. No entanto, devido aos resultados insatisfatórios obtidos posteriormente, analisou-se mais uma dosagem de 0,5% de borracha.

Os resultados foram comparados à mistura com e sem borracha de acordo com os ensaios mecânicos realizados e foram moldados apenas corpos de prova com a melhor dosagem de borracha e CAP para realização de ensaios de determinação de propriedades mecânicas. A Figura 19 detalha a realização da escolha de dosagem dos corpos de prova moldados.

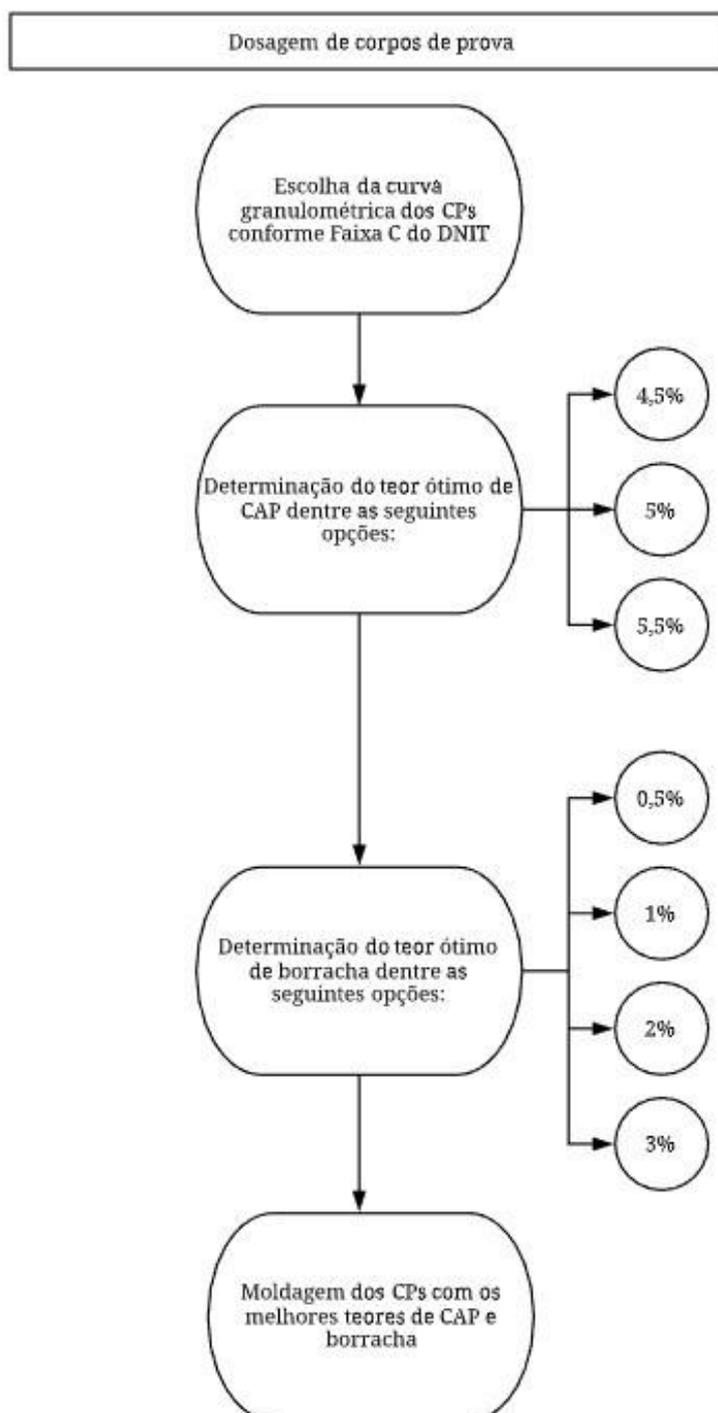


Figura 19 - Detalhamento da dosagem dos CPs

3.2.1. Preparação dos CP's Utilizados nos Ensaio Mecânicos

As misturas asfálticas foram produzidas no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e cada amostra foi produzida em triplicata. Cada material foi coletado e transportado em baldes de plástico previamente limpos para que não houvesse contaminação com nenhum outro material, no entanto, a coleta e o transporte do ligante foram feitos em latas de alumínio de 3,5 litros. Os corpos de prova foram moldados pelo procedimento Marshall com 1200 g, incluindo a borracha, CAP e outros materiais. Para a compactação, foram utilizados cilindros padronizados, de acordo com o procedimento Marshall, de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura com 75 golpes em cada face na temperatura de 170 °C.

3.2.2. Composição Granulométrica das Misturas Asfálticas

A Tabela 7 mostra a composição granulométrica da mistura asfáltica utilizada e especificação da mistura asfáltica convencional.

Tabela 7 - Composição granulométrica da mistura asfáltica utilizada no trabalho

Composição da mistura							Faixa C		
% da mistura		26%	31%	23%	17%	3%	%	Amostra	%
							Mín		Máx
Peneira	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia	Cimento			
3/4"	19,10	94,9	100	100	100	100	100	99	100
1/2"	12,70	38,5	99,1	100	100	100	80	84	100
3/8"	9,50	10,4	85,9	100	100	100	70	72	90
n 4	4,76	6,9	17,1	98,53	100	100	44	50	72
n 10	2,00	1	4,7	60,12	96,95	100	22	35	50
n 40	0,42	0,6	0	16,85	60,06	100	8	17	26
n 100	0,149	0	0	8,76	7,87	100	4	6	16
n 200	0,074	0	0	3,43	0,2	97	2	4	10

Como resultado à tabela acima, gerou-se o gráfico da curva granulométrica da mistura, apresentado na Figura 20.

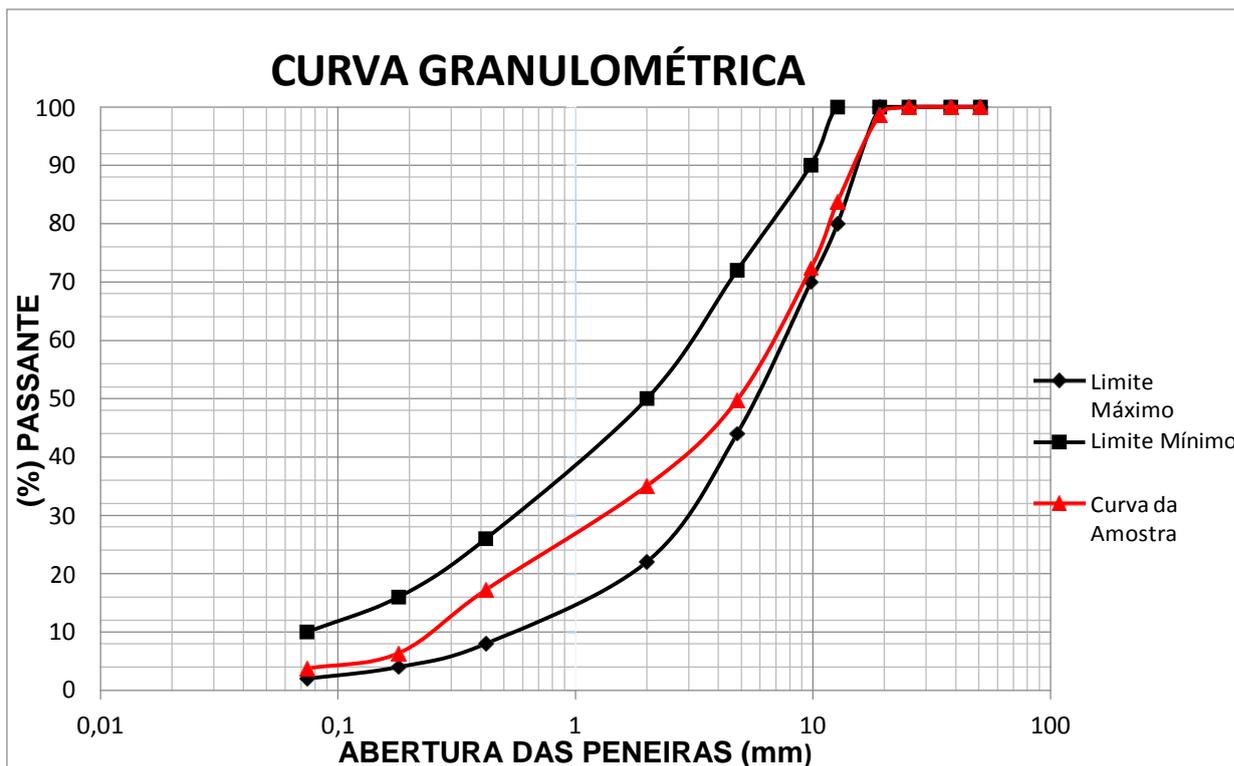


Figura 20 - Curva granulométrica da mistura

A granulometria apresentada anteriormente foi utilizada como padrão para todas as dosagens estudadas no Ensaio Marshall, tendo como variáveis as porcentagens de CAP (calculadas em relação à massa total do corpo de prova 1200 g) e de borracha. Foram moldados dezenas de corpos de prova para determinação do teor de ligante, conforme a Figura 21 abaixo.



Figura 21 - Corpos de prova moldados

4. RESULTADOS

Conforme explicado anteriormente, os corpos de prova foram moldados segundo a metodologia Marshall para verificação das características de projeto e propriedades mecânicas. Neste tópico serão abordados os resultados obtidos referentes ao processo seco.

4.1. DOSAGEM DA MISTURA DE REFERÊNCIA

O método de dosagem Marshall pode apresentar diversas alternativas para a escolha do teor de projeto de ligante asfáltico e, no Brasil, a escolha do teor de asfalto é baseada no volume de vazios (V_v) correspondente à 4%.

O Volume de Vazios (V_v) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico, pois são necessários vazios de ar dentro da mistura compactada para permitir a expansão térmica dos ligantes. Volumes de vazio muito baixos (<3%) comprometem o desempenho das misturas quanto ao afundamento em trilha de rodas enquanto que, quando muito altos (>8%), comprometem a durabilidade.

Para a determinação dos teores de ligante de projeto para 4% de volume de vazios, utilizaram-se 4 teores de ligante e 3 amostras para cada mistura. Com o teor atingido, encontrou-se os teores de projeto de ligante para cada mistura estudada.

Os Vazios do Agregado Mineral (VAM) representam o espaço intergranular do esqueleto mineral. Valores muito reduzidos de VAM levam a teores muito baixos de ligante, podendo comprometer o desempenho à fadiga e a durabilidade das misturas. Valores excessivamente altos de VAM podem levar a perda de intertravamento do esqueleto mineral e redução da resistência ao cisalhamento.

A relação betume vazios (RBV) é a percentagem de vazios intergranulares preenchidos por asfalto e tem como função certificar uma quantidade satisfatória de ligante preenchendo os vazios do agregado mineral. A mistura tem sua durabilidade e estabilidade comprometidas quando apresenta valores de RBV muito baixos e muito elevados, respectivamente (DIAS, 2005).

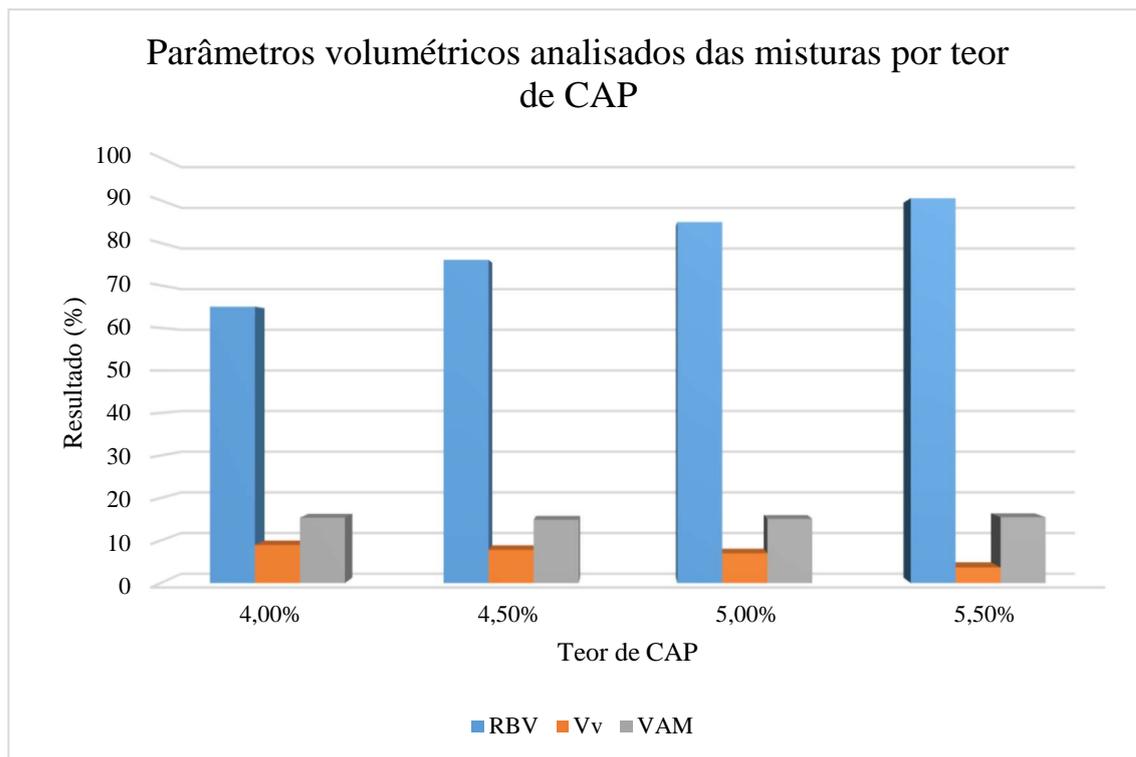


Figura 22 - Resultados dos parâmetros volumétricos de cada mistura para diferentes teores de CAP (a) RBV; (b) Vv; (c) VAM.

Os resultados obtidos foram analisados e indicaram que o teor ótimo de dosagem de CAP para a curva granulométrica escolhida é de 5,58% e, portanto, a partir deste ponto todas as misturas terão como teor de ligante aplicado o calculado.

4.2. DOSAGEM DO TEOR DE BORRACHA

Após a determinação do teor de ligante a ser utilizado nas amostras, foi determinado também o teor de borracha ideal através da comparação de resultados dos teores sugeridos no início deste trabalho (1%, 2% e 3%) por meio da realização do mesmo método Marshall. Os ensaios mecânicos foram realizados apenas nas amostras com teores de borracha cujas médias dos resultados apresentaram melhores valores. No entanto, os resultados dos teores sugeridos não alcançaram, em sua maioria, os parâmetros exigidos por norma, de modo que decidiu-se acrescentar mais um teor de borracha (0,5%) para testes.

O critério para definição do teor de raspa de borracha de pneu a ser utilizado na realização do ensaios mecânicos foi realizado meramente através do cumprimento dos requisitos para projetos de misturas asfálticas, conforme norma DNIT 031/2004 apresentados nos Anexo A e B. A norma recomenda como valores limites para parâmetros que o volume de vazios fique entre

3% e 5%, uma vez que, misturas com elevados índices de vazios apresentam menores resistências ao aparecimento de trincas por fadigas e, quando menores que 3%, apresentam exsudação (BERTOLLO, 2002).

Conforme a Figura 23, verificou-se que o volume de vazios das misturas aumentou consideravelmente com o aumento do teor de borracha de pneu. Isso causou um transtorno na realização da moldagem dos corpos de prova, de modo que posteriormente foi acrescentado mais uma amostra com teor de borracha inferior (0,5%) para que se alcançasse o valor máximo.

A relação betume/vazio tende a apresentar maiores valores quanto menor o teor de borracha, no entanto, todas as misturas ficaram dentro do limite exigido pela norma brasileira para aplicação na camada de rolamento que é de 75 a 82%, conforme apresentado na Figura 23.

Quanto aos vazios do agregado mineral, os resultados obtidos também apresentaram tendência à diminuição dos vazios quanto menor for o teor de borracha, conforme Figura 23. De acordo com norma DNIT 031/2004, o valor de VAM mínimo a ser considerado é de 15%, logo, todas as misturas atingiram o requisito, com exceção da amostra de 0,5% de borracha.

Após análise dos principais resultados obtidos, optou-se por trabalhar com a amostra de 0,5% de teor de borracha, pois acreditou-se ser esta a amostra que mais se apresentou dentro dos limites estabelecidos, mesmo que ainda apresentasse o VAM levemente baixo.

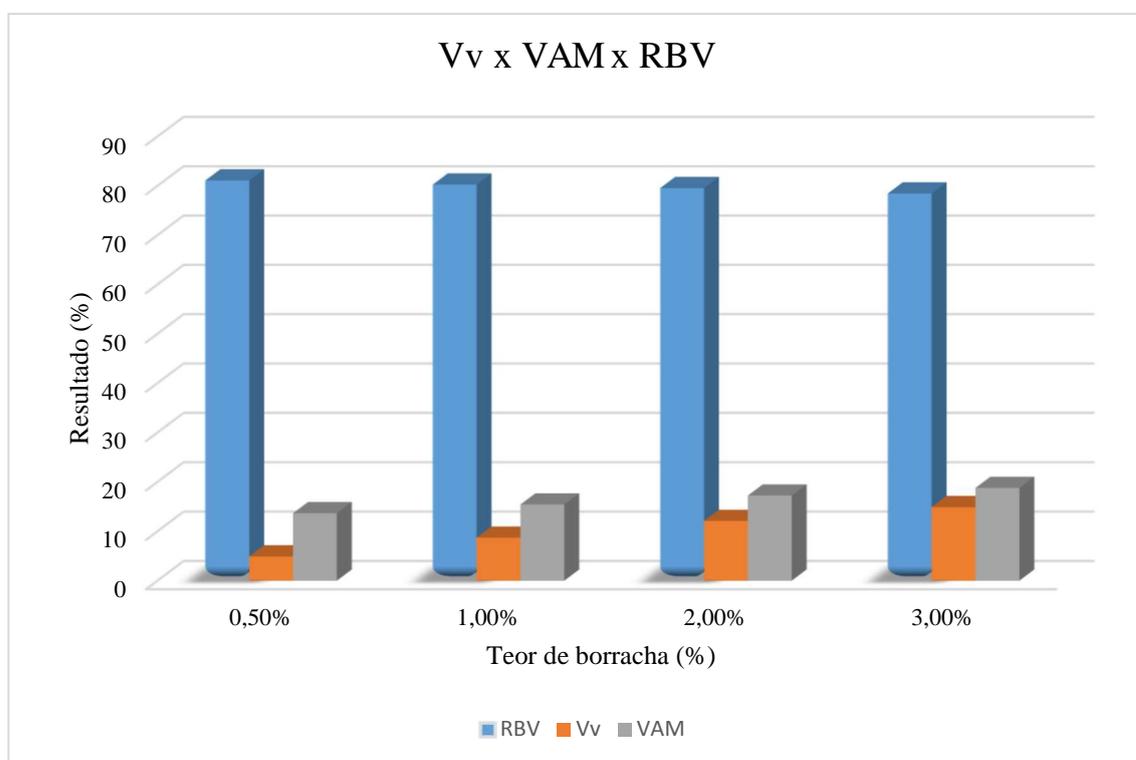


Figura 23 -- Resultados dos parâmetros volumétricos de cada mistura para diferentes teores de borracha (a) RBV; (b) Vv; (c) VAM.

A partir deste ponto, todas amostras moldadas e submetidas a ensaios mecânicos tiveram como dosagem o valor de 5,58% de CAP e 0,5% de teor de borracha para a curva granulométrica apresentada anteriormente.

4.3. UMIDADE INDUZIDA

A norma do ensaio de umidade induzida AASHTO, também conhecida como ensaio Lottman modificado ou ensaio de dano por umidade induzida, recomenda a moldagem de corpos de prova com volume de vazios entre 6% e 8%, obtidos por meio do ajuste do número de golpes durante a compactação, e saturação entre 55 e 80%. Para que fosse alcançado o volume de vazios desejado, reduziu-se o número de golpes para 20 por face na compactação dos corpos de prova.

Foram realizadas tentativas do ensaio com os 75 golpes em cada lado, como os corpos de prova de referência nos outros ensaios, mas, infelizmente, a amostra não atingia o mínimo de 55% de saturação e foi descartada.

A Tabela 8 apresenta o resultado da média das resistências da mistura de controle a danos por umidade induzida.

Tabela 8 - Resultado da resistência da mistura a danos por umidade induzida

Mistura	Condição	Vv%	RT	$\frac{RT_{saturado}}{RT_{seco}}$
Amostra com 0,5% de asfalto	Seco	6,9%	6,2	87%
	Saturado	7,1%	5,4	

O resultado apresentado indica que a mistura não apresenta problemas de adesividade entre agregado e ligante, por apresentar razão entre RT saturado e seco maior que 70%.

4.4. ENSAIO CÂNTABRO

O ensaio cântabro, neste trabalho, foi uma tentativa de verificar se a adição de borracha propicia benefícios à mistura asfáltica com relação à resistência à desagregação. Os corpos de

prova, após submetidos ao ensaio no moinho de Abrasão Los Angeles, ficaram com o aspecto apresentado na Figura 27.



Figura 24 - Corpo de prova após ensaio cântabro em diferentes perspectivas

A Figura 24 abaixo exibe, de forma comparativa, os resultados das médias do ensaio cântabro realizado nos corpos de prova.

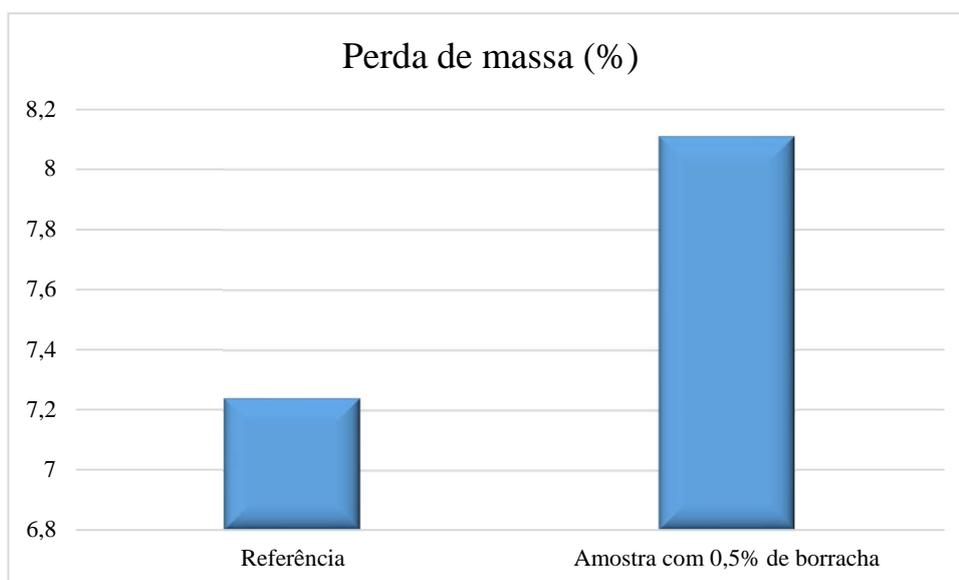


Figura 25 – Gráfico da perda de massa do ensaio cântabro

A análise dos resultados indica que a os corpos de prova submetidos ao ensaio cujas composições continham borracha de pneu apresentaram um desgaste levemente maior que os corpos de prova sem a presença da borracha, menos de 1%. Tendo em vista que o ligante (cuja função é proporcionar um maior recobrimento dos agregados, aumentando a resistência à desagregação das misturas) foi aplicado na mesma proporção em ambas as amostras, acredita-se que a borracha tem um impacto negativo devido à sua característica física de raspa, pode se desprender com maior facilidade do corpo de prova.

4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado a uma carga progressiva (taxa de 0,8 a 1,0 mm/s) em corpos de prova previamente condicionado a temperatura de 25 °C (em ambiente que dispunha de ar condicionado ligado com temperatura controlada) por 2 horas até que o mesmo fosse rompido ao longo de um plano diametral em 2 metades, conforme Figura 29.



Figura 26 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral em perspectivas diferentes

A Figura 26 abaixo apresenta os valores das médias de resistência à tração por compressão diametral da amostra estudada em comparação com a amostra de referência. Foram moldados 3 corpos de prova para cada uma.

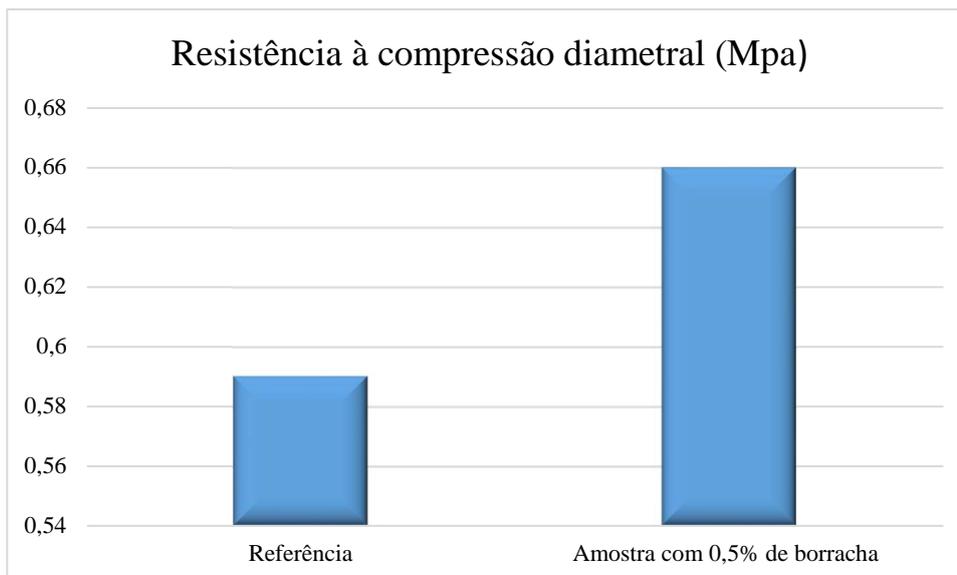


Figura 27 - Gráfico da resistência à tração por compressão diametral

A norma DNIT 031/2004-ES especifica o valor mínimo de 0,65 MPa de RT para concretos asfálticos. Valores típicos de RT para misturas asfálticas a quente, recém moldadas ou logo após a execução na pista, situam-se na média entre 0,5 MPa e 2,0 Mpa (BALAGUER, 2012). Desta forma, a amostra de concreto asfáltica modificada com borracha de pneu moída apresentou uma melhor resistência quando comparada com a amostra sem modificação, além de estar dentro dos parâmetros exigidos por norma.

5. CONCLUSÕES

Diante dos tópicos discutidos neste trabalho, do método escolhido para sua execução e das análises realizadas nos resultados obtidos, podem ser feitas as seguintes conclusões:

- O tema discutido tem sido bastante abordado em países desenvolvidos, mas ainda pode ser mais aprofundado na região do Amazonas com utilização de matéria prima local.
- A literatura afirma que a borracha obtida a partir da trituração de pneus deve ser considerada como um bem valioso, cuja utilização vem se expandindo no mercado. Sua aplicação em misturas asfálticas tem melhorado algumas propriedades mecânicas, tornando conveniente seu uso como agregado.
- Com base na caracterização dos agregados utilizados, o estudo indicou que a utilização desses é favorável para o uso em misturas asfálticas, uma vez que:
 - A borracha, após realização de ensaio de termogravimetria, não mostrou perda de massa significativa até a temperatura de 250 °C, que é superior à temperatura empregada para que se tenha boa trabalhabilidade com o material asfáltico.
 - Também apresentou granulometria compatível com a literatura, indicando que o material pode ter sucesso no alcance dos objetivos;
 - As caracterizações do agregado graúdo atenderam as especificações das normas brasileira. Os agregados utilizados foram a brita 0 e a brita1 para os quais os ensaios de granulometria indicaram que os mesmos estavam dentro das faixas solicitadas. As britas apresentaram baixa absorção, o que é ideal em relação ao consumo de ligante. A porcentagem de perda de massa por abrasão dos agregados graúdos mostrou-se dentro dos limites solicitados, que sugerem índices de 40% a 55%.
- As misturas com maiores teores de borracha apresentaram um considerável aumento no volume de vazios das amostras. Diante desse fato foi necessário adotar para a mesma dosagem um novo teor de borracha. Esse novo teor foi menor e proporcionou um menor volume de vazios o que foi fundamental para que o concreto asfáltico se mantivesse na faixa de 3% a 5% de conforme indicado pela normas brasileiras recomendado para pavimento.

- De modo geral, menores quantidades de borracha adicionadas às misturas apresentaram os melhores resultados para os parâmetros da dosagem Marshall, porém todos os teores atingiram os requisitos estabelecidos por norma como relação ao RBV e ao VAM, com exceção do teor escolhido de 0,5% de borracha que ficou levemente abaixo do parâmetro exigido por norma com relação ao VAM.
- A amostra escolhida para estudos de 5,58% de CAP e 0,5% de borracha não apresentou problemas de adesividade entre agregado e ligante, por apresentar razão entre RT saturado e seco maior que 70%, conforme os resultados do ensaio de umidade induzida.
- No geral, a amostra de referência estudada obteve resultados inferiores aos resultados da amostra modificada com borracha, com exceção no ensaio de perda de massa onde a amostra modificada apresentou um desgaste levemente maior, porém menor que 1%.
- Este trabalho mostrou que a incorporação de borracha de pneus inservíveis em concreto asfáltico pode ser uma alternativa viável para a reciclagem desses resíduos, porém ainda há bastante informação para ser estudada e analisada.

6. REFERÊNCIAS

AASHTO T 283 (2002) – Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.

ABDELRAHMAN, Magdy. Old tires become material for new and improved roads. **National Science Foundation**, 2014. Disponível em: <https://www.nsf.gov/discoveries/disc_summ.jsp?cntn_id=131175>. Acesso em: 25 fev. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**, ANTT, Curitiba (2014). Disponível em: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/proj_2_relata_final_litoral_sulantt__dosagem_fev14rev3.pdf>. Acesso em 16 fev. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D6925- 09. **Standard Test Method for Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor**. [S.I.]. 2009. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D6925.htm>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/ufam/pdfview/viewer.aspx?Q=60EFF2298E32041F0B5E3E0C3712348F605C62152ADCE91F>>. Acesso em: 29 jul. 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DE PNEUMÁTICOS – ANIP. **Produção e Vendas 2016**, ANIP, São Paulo (2016). Disponível em: <<http://www.anip.com.br/arquivos/producao-vendas.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALAGUER, Marcos. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em asfalto-borracha, elaborado pelo processo de produção contínua em usina**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/904>>. Acesso em: 11 dez. 2017.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. “**Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**”. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, v. 504, 2008. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2018/03/Cap-5-Dosagem-de-diferentes-tipos-de-revestimento.pdf>>. Acesso em: 23 jan 2018

BERTOLLO, Sandra A. Margarido. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. 2002. 252 f. Tese (Doutorado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-14122015-152916/en.php>>. Acesso em: 22 dez. 2017.

BLASS, Leandro; SPECHT, Luciano Pivoto; BORGES, Pedro Augusto Pereira. **Análise de degradação de pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperatura**. In: XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2010, Águas de Lindóia, Brasil. Disponível em: <http://www.sbm.org.br/eventos/cnmac/xxxiii_cnmac/pdf/558.pdf>. Acesso em: 25 Jan 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. Ed. – Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2019.

BRASIL. Ministério dos Transportes. BANCO DE INFORMAÇÕES DE TRANSPORTES – BIT. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/atlas-do-transporte>>. Acesso em: 23 jan. 2018.

CETIN, Altan. Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures. **International Journal of Polymer Science**, v. 2013, 2013. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijps/2013/789612/>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

CIMINO, Marly Alvarez. **Gerenciamento de pneumáticos inservíveis: análise crítica de procedimentos operacionais e tecnologias para minimização, adotados no território nacional**. 2004. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4253/DissMAC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://cms_pesquisarodovias.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20de%20Rodovias%202018%20-%20web%20-%20baixa.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA 1999. Dispõe sobre a disposição ambientalmente correta de pneus inservíveis. Resolução 258, de 23 de agosto. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

CREANOVA INC. Bernard J. Burns. Rubber-modified asphalt paving binder. US 5936015^a, 16 out. 1998, 10 Ago. 1999. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/5e/5b/65/b20b7304584a1e/US5936015.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018

CYCLEAN INC. Robert H. Nath. **Process for adding recycled tire particle to asphalt**. US 5385401A, 06 Out. 1993, 31 Jan. 1995. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/b9/37/b5/068504b9cebf1f/US5385401.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

DE SOUZA, Cristiane Duarte Ribeiro; MÁRCIO DE ALMEIDA, D. Agosto. Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: an applied study of co-processing in the cement industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 78, p. 15-25, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913001377>>. Acesso em: 19 ago. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM –DNER. **ME 55 - Areia – determinação de impurezas orgânicas**, DNER, Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: <http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20055-95.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **ME 138 - Misturas Betuminosas - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. DNER, Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20138-94.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM –DNER. **ME 143 - Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**, DNER, Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: <http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20043-95.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, **DNIT ES – 031/2006 Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.academia.edu/9548675/NORMA_DNIT_031_2006_-ES_Palavras-chave_No_total_de_p%C3%A1ginas_MINIST%C3%89RIO_DOS_TRANSPORTES_DEPARTAMENTO_NACIONAL_DE_INFRA-ESTRUTURA_DE_TRANSPORTES?auto=download>. Acesso em: 18 out. 2019.

FAXINA, Adalberto Leandro. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-13052016-155321/en.php>>. Acesso em: 28 jan. 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis. National Asphalt Training Center, 1995. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013177.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

FILHO, Edelino Meurer. **Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes**. 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/81713>>. Acesso em: 09 set. 2019.

FLORIANI, Marco Antonio; FURLANETTO, Vinícius Cadore; SEHNEM, Simone. Descarte sustentável de pneus inservíveis. **NAVUS – Revista de Gestão e Tecnologia**, Florianópolis, v. 6, p. 37-51, abr./jun. 2016. Disponível em: <<http://navus.sc.senac.br/index.php/navus/article/download/347/282>>. Acesso em: 24 jan. 2018

FONTES, Liseane PTL. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/9601>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

GHASEMI, Mojtaba; MARANDI, Seyed Morteza. Performance improvement of a crumb rubber modified bitumen using recycled glass powder. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**, v. 14, n. 11, p. 805-814, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1631/jzus.A1300053>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

GRECA ASFALTOS. **Estudo comparativo do desempenho do Asfalto Borracha**. Disponível em: <<http://www.grecaasfaltos.com.br>> Acesso em: 13 jul. 2018.

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez,; FARIA, Valéria C. de. Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas

LAGARINHOS, Carlos Alberto F.; TENÓRIO, Jorge Alberto S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 106-118, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v18n2/a07v18n2.pdf/tecnologias>>. Acesso em: 20 jul. 2019

MASSON, Terezinha Jocelen; MIRANDA, Leila Figueiredo de; CUNHA, Felipe Meller; ALMEIDA, Luis Felipe Pires de; CAMARGO, Marcella Cristina Almeida de; MUNHOZ JR, Antônio Hortêncio. **Asfalto-borracha: incorporação de pneus no asfalto**. In: XVII Safety, Health and

Environment World Congress, 2017, Vila Real, Portugal. Disponível em: <<http://www.copec.eu/shewc2017/proc/works/14.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2018.

MOAUKET, Abe; CAPANO, Nazzareno A.. **Development of a Pavement Degradation Fee Structure for the City of Toronto**. In: Conference of the Transportation Association of Canada, 2013, Winnipeg, Manitoba. Disponível em: <<http://conf.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2013/session6/capano.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2018.

MOGHADDAM, Taher Baghaee; KARIM, Mohamed Rehan; ABDELAZIZ, Mahrez. A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. **Scientific Research and Essays**, v. 6, n. 4, p. 670-682, 2011. Disponível em: <<http://www.academicjournals.org/journal/SRE/article-abstract/D84906922639>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

MOTTA, Flávia Gutierrez. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis - o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & sociedade**, v. 11, n. 1, p. 167-184, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v11n1/11.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2019.

ODA, Sandra. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Brasil. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-30012018-151928/publico/Tese_Oda_Sandra.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2019

OST; **Processos de recapagem**. Disponível em: <<http://www.ost.ind.br/portal/institucional/processos-de-recapagem>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

PAZOS, Abraham Guerrero; SACRAMENTO, Francisco Thiago; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. In: 44ª Reunião Anual de Pavimentação, 2015, Foz do Iguaçu, Brasil. Disponível em: <http://sinicesp.org.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_39.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2018.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias**. 2004. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Brasil. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4898/1/2004_dis_jhmpinheiro.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2017.

PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos, 1991**. 1991. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/135-1991/756-salomao-pinto>>. Acesso em: 01 ago. 2019.

QADI, Arabi N. S. Al; ALHASANAT, Mahmoud B. A., HADDAD, Madhar. **Effect of Crumb Rubber as Coarse and Fine Aggregates on the Properties of Asphalt Concrete**. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016. Disponível em: <<http://thescipub.com/abstract/10.3844/ajeassp.2016.558.564>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

SALINI, Reus Bortolotto. **Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas**. Florianópolis, 2000. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79302/171246.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

SENÇO, Wlastemiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. Ed. Ampl. São Paulo: PINI, 2007.

SEYDELL, Maria R. R.; LINTZ, Rosa C. C.. Propriedades mecânicas do concreto com adição de borracha de pneus para pavimentos rodoviários. **Estudos Tecnológicos**, v. 5, n. 3, p. 363-373, 2009.

Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Rosa_Lintz/publication/238727004_Propriedades_mecanicas_do_concreto_com_adicao_de_borracha_de_pneus_para_pavimentos_rodoviaros_Mechanical_properties_of_concrete_with_the_addition_of_tire_rubber_for_roadway_pavements/links/552ea6720cf22d437170bdd3.pdf. Acesso em: 20 fev. 2018.

SOARES, Jorge Barbosa; CAVALCANTE, Verônica Teixeira Franco. **Dosagem “passo a passo”**. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2000, Ouro Preto, Brasil. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/19/artigos/142.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2018.

SOUZA, Renata T.. **Análise da logística reversa de pneus usados e inservíveis e seus impactos ambientais quando descartados inadequadamente: estudo de caso de uma empresa de transportes**. 64f. 2009. Monografia (Tecnólogo em Logística), Centro Paula Souza, São Paulo, SP, 2009. Disponível em: <http://web-resol.org/textos/tcc-233.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 280f. 2004. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267236021_AVALIACAO_DE_MISTURAS_ASFALTICAS_COM_INCORPORACAO_DE_BORRACHA_RECICLADA_DE_PNEUS. Acesso em: 02 dez. 2017.

TAHERKHANI, Hasan. **Investigating the Properties of Asphalt Concrete Containing Glass Fibers and Nanoclay**. Civil Engineering Infrastructures Journal, 49(1): 45 – 58, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309668131_Investigating_the_Properties_of_Asphalt_Concrete_Containing_Glass_Fibers_and_Nanoclay. Acesso em: 26 jul. 2019

VASCONCELOS, Kamilla; SOARES, J. B.. **Efeito do procedimento de dosagem no teor de projeto e comportamento mecânico de misturas asfálticas**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267963781_EFEITO_DO_PROCEDIMENTO_DE_DOSAGEM_NO_TEOR_DE_PROJETO_E_COMPORTEAMENTO_MECANICO_DE_MISTURAS_ASFALTICAS. Acesso em: 10 jul. 2018.

XIANG, Li; CHENG, Jian; QUE, Guohe. **Microstructure and performance of crumb rubber modified asphalt**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 12, p. 3586-3590, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809002190>. Acesso em: 13 fev. 2018.

YAZDI, M. A. et al. A Review on Application of Waste Tire in Concrete. **International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering**, v. 9, n. 12, p. 1648-1653, 2015. Disponível em: <http://waset.org/publications/10003388>. Acesso em: 25 fev. 2018.

ANEXO A – Valores limites para parâmetros Marshall

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

ANEXO B – Valores mínimos de vazios de agregados mineral

VAM – Vazios do Agregado Mineral		
Tamanho Nominal Máximo do agregado		VAM Mínimo %
#	m m	
1½"	38,1	13
1"	25,4	14
¾"	19,1	15
½"	12,7	16
3/8"	9,5	18