

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LISIANI DALENOGARE COGO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
MODIFICADAS COM BORRACHA MOÍDA**

**Alegrete
2017**

LISIANI DALENOGARE COGO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
MODIFICADAS COM BORRACHA MOÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Diego Arthur Hartmann

Coorientador: Maurício Silveira dos Santos

Alegrete

2017

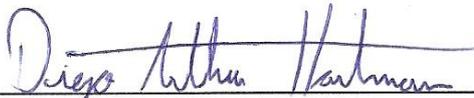
LISIANI DALENOGARE COGO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
MODIFICADAS COM BORRACHA MOÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27/11/2017

Banca examinadora:



Prof. (M.Sc). (Diego Arthur Hartmann)

Orientador

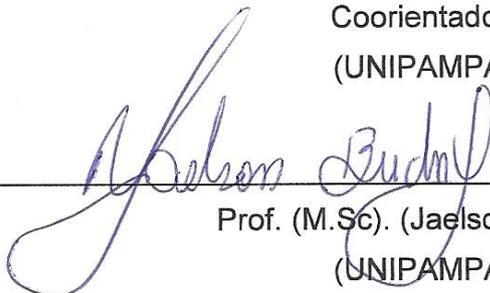
(UNIPAMPA)



Prof. (Me). (Mauricio Silveira dos Santos)

Coorientador

(UNIPAMPA)



Prof. (M.Sc). (Jaelson Budny)

(UNIPAMPA)



Prof. (Me). (Fernando Dekeper Boeira)

(UFSM)

Dedico este trabalho à minha mãe e meu pai, os quais amo muito, pelo exemplo de vida e família. A meus irmãos por tudo que me ajudaram até hoje. Aos meus amigos, pela confiança, incentivo e apoio sempre.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força e coragem nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Delvaci e Tânia, que são as peças fundamentais para todas as conquistas que realizei até o momento. Agradeço por todo o amor e confiança que me deram, e por todo o esforço que fizeram para que eu sempre tivesse a melhor educação.

Aos meus irmãos, Luzardo e Leonardo, pelo companheirismo e convivência em todos esses anos de vida, que sempre me apoiaram e ajudaram nas decisões, dando força para continuar sempre em busca do sucesso profissional e pessoal.

Aos meus amigos de graduação, pela diversão, aprendizado e pela convivência. Amigos que durante esses anos de faculdade foram minha segunda família, dividindo sonhos, risadas, festas, lanches e lágrimas.

A Rosiéli e Danielli, essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa, obrigada pela ajuda nos ensaios, pelo apoio, conversas, trabalhos, por tudo, obrigada!

Aos meus orientadores que se dispuseram a me orientar com tanta paciência, agradeço por todo tempo que me foi dado, pela preocupação em todas as correções para que eu fizesse um bom trabalho. Em especial ao professor Mauricio, pelo apoio, orientação, dedicação, conhecimento compartilhado e pela sua disponibilidade quando precisei.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios de Solos e Pavimentação, Materiais de Engenharia Civil e LAMAP da UNIPAMPA, pela disposição e auxílio ao longo do trabalho.

Aos laboratórios e técnicos da Universidade Federal de Santa Maria por permitirem a realização do ensaio.

Aos Professores Maurício e Jaelson pelo fornecimento do material necessário para realização da pesquisa.

E a todos que colaboraram direta e indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado.

RESUMO

A preocupação ambiental representa um dos principais fatores para justificar os estudos crescentes quanto ao reaproveitamento de materiais inservíveis que possam ser utilizados como alternativa de melhorar o desempenho de revestimentos asfálticos. Nesse contexto, essa pesquisa consistiu em realizar ensaios laboratoriais, para avaliar o comportamento de misturas asfálticas modificadas com a incorporação de 1; 3 e 5% de borracha moída. O procedimento de incorporação de borracha realizado, conhecido como processo seco, consiste na substituição de parte do agregado miúdo de uma mistura de referência que utiliza brita 0, brita 1 e pó de pedra como agregados. Inicialmente, a dosagem Marshall foi realizada para a caracterização volumétrica das misturas, seguida de dois ensaios mecânicos: módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral. Os resultados dos ensaios das misturas com substituição de borracha foram analisados e comparados com a mistura convencional, bem como avaliados aos requisitos mínimos recomendado pelas normas do DNIT. De acordo com os valores encontrados, menores teores de borracha conferem melhores resultados. A mistura com 1% de borracha foi a que atendeu aos requisitos exigidos pelas normas e os valores encontrados foram compatíveis com outros pesquisadores. Porém, as misturas asfálticas modificadas com borracha moída requerem maior consumo de ligante e apresentam resultados menores, quando comparado à mistura convencional. Apesar disso, ficou evidente a viabilidade técnica para a execução de revestimentos com a utilização, em pequenas porcentagens de borracha reciclada.

Palavras-Chave: mistura asfáltica, borracha moída, ensaios mecânicos

ABSTRACT

The environmental concern is one of the main factors to justify the growing studies regarding the reuse of waste materials that can be used as an alternative to improve the performance of asphalt coatings. In this context, this research consisted of carrying out laboratory tests to evaluate the behavior of modified asphalt mixtures with the incorporation of 1; 3 and 5% ground rubber.. The rubber incorporation procedure performed, known as the dry process, consists of replacing part of the small aggregate of a reference mixture that uses brita 0, brita 1 and stone powder as aggregates. Initially, the Marshall dosage was performed for the volumetric characterization of the mixtures, followed by two mechanical tests: resilience modulus and tensile strength by diametrical compression. The results of the tests of the mixtures with rubber substitution were analyzed and compared with the conventional mixture, as well as evaluated to the minimum requirements recommended by the norms of the DNIT. According to the values found, lower rubber contents give better results. The mixture with 1% rubber was the one that met the requirements required by the standards and the values found were compatible with other researchers. However, modified asphalt mixtures with ground rubber require higher binder consumption and present lower results when compared to the conventional blend. In spite of this, the technical feasibility for the execution of coatings with the use in small percentages of recycled rubber became evident.

Keywords: asphalt mix, crumb rubber, mechanical tests

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura e consumo de combustível.....	19
Figura 2 - Processo criogênico para obtenção da borracha granulada de pneus	34
Figura 3 - Processo de obtenção da borracha granulada por trituração a temperatura ambiente	35
Figura 4 - Diagrama de blocos da classificação de ligantes asfálticos segundo o DNER	36
Figura 5 - Cimento Asfáltico de Petróleo	37
Figura 6 - Processo seco de incorporação de borracha em misturas asfálticas.....	40
Figura 7 – Fluxograma das atividades	44
Figura 8 – Composição da mistura.....	47
Figura 9 – Borracha moída utilizada nas misturas	48
Figura 10 – Procedimento realizado para determinação da densidade da borracha	49
Figura 11 – Ligante Asfáltico utilizado na mistura	50
Figura 12 – Moldagem dos corpos de prova	54
Figura 13 - Procedimento do ensaio de massa específica aparente.....	55
Figura 14 - Procedimento para determinação da massa específica máxima	57
Figura 15 – Sequencia do Módulo de Resiliência	59
Figura 16 - Esquema do ensaio de compressão diametral	61
Figura 17 – Sequência do ensaio de RT	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Organização da metodologia Superpave de dosagem de misturas asfálticas em função do volume de tráfego	29
Tabela 2 - Especificações recomendadas para misturas modificadas com borracha, para diferentes níveis de tráfego	41
Tabela 3 – Granulometria dos agregados	45
Tabela 4 – Composição da mistura	46
Tabela 5 – Composição da borracha	48
Tabela 6 - Propriedades físico-químicas do CAP 50/70.....	50
Tabela 7 – Composição granulométrica das misturas.....	52
Tabela 8 – Volume de vazios para a mistura convencional	63
Tabela 9 – Volume de vazios para a mistura com 1% de borracha	64
Tabela 10 – Volume de vazios para a mistura com 3% de borracha	64
Tabela 11 – Volume de vazios para a mistura com 5% de borracha	64
Tabela 12- Módulo de Resiliência da mistura convencional.....	67
Tabela 13 – Módulo de Resiliência da mistura com 1% de borracha.....	68
Tabela 14 – Módulo de Resiliência da mistura com 3% de borracha.....	68
Tabela 15 – Módulo de Resiliência da mistura com 5% de borracha.....	69
Tabela 16 - RT da mistura convencional.....	72
Tabela 17 – RT da mistura com 1% de borracha	73
Tabela 18 – RT da mistura com 3% de borracha	73
Tabela 19 – RT da mistura com 5% de borracha	74
Tabela 20 – Relação MR/RT das misturas.....	78

LISTA DE FIGURAS

Gráfico 1 – Curva granulométrica de trabalho.....	45
Gráfico 2 - Curva granulométrica de trabalho / Faixa “C” do DNIT.....	47
Gráfico 3 – Variação da viscosidade do CAP 50/70 em função da temperatura	51
Gráfico 4 – Teor de ligante x Volume de vazios para mistura convencional	65
Gráfico 5 – Teor de ligante x Volume de vazios para mistura com 1% de borracha .	65
Gráfico 6 – Teor de ligante x Volume de vazios para mistura com 3 % de borracha	66
Gráfico 7 – Teor de ligante x Volume de vazios para mistura com 5% de borracha .	66
Gráfico 8 - Módulo de Resiliência da mistura convencional	69
Gráfico 9 – Módulo de Resiliência da mistura com 1% de borracha	70
Gráfico 10 – Módulo de Resiliência da mistura com 3% de borracha	70
Gráfico 11 – Módulo de Resiliência da mistura com 5% de borracha	71
Gráfico 12 - Módulo de Resiliência das misturas.	71
Gráfico 13- RT da mistura convencional	74
Gráfico 14 – RT da mistura com 1% de borracha	75
Gráfico 15 – RT da mistura com 3% de borracha	75
Gráfico 16 – RT da mistura com 5% de borracha	76
Gráfico 17 – Resistencia à tração das misturas.	76
Gráfico 18 - Relação MR/RT da mistura convencional.....	79
Gráfico 19 – Relação MR/RT da mistura com 1% de borracha.....	79
Gráfico 20 – Relação MR/RT da mistura com 3% de borracha.....	80
Gráfico 21 – Relação MR/RT da mistura com 5% de borracha.....	80
Gráfico 22 – Relação MR/RT das misturas.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEDA - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto

ADP - Asfaltos Diluídos de Petróleo

AMB - Asfaltos Modificados por Borracha Pneus

AMP - Asfaltos Modificados por Polímero

AR e ARE - Agentes rejuvenescedores

CA - Concreto Asfáltico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPA - Camada Porosa de Atrito

DAER - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

EAP - Emulsões Asfálticas de Petróleo

PMF - Pré-misturado a Frio

PMFD - Pré-misturado a Frio Denso

RBV - Relação Betume Vazios

RCC - Resíduos de Construção Civil

SHRP - *Strategic Highway Research Program*

SMA - *Stone Matrix Asphalt*

VAM - Vazios do Agregado Mineral

Vv – Volume de Vazios

WMA - *Warm-Mix Asphalt*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	Misturas Asfálticas	18
2.1.1	Misturas Asfálticas a Quente	19
2.1.1.1	Concreto Asfáltico	20
2.1.1.2	Matriz Pétreo Asfáltica	21
2.1.1.3	Camada Porosa de Atrito	21
2.1.2	Pré-Misturado a Frio	22
2.1.3	Mistura Morna	23
2.2	Dosagem de Misturas Asfálticas	26
2.2.1	Dosagem Marshall	26
2.2.2	Dosagem Superpave	28
2.3	Agregados	29
2.3.1	Agregado Natural	30
2.3.2	Agregado Reciclado	31
2.3.2.1	Resíduos da Construção Civil	32
2.3.2.2	Material Fresado	32
2.3.2.3	Borracha Moída	33
2.4	Ligantes Asfálticos	35
2.4.1	Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	37
2.5	Borrachas em Misturas Asfálticas	38
2.5.1	Processo Úmido	40
2.5.2	Processo Seco	40
2.6	Trabalhos Realizados com Borracha	42
3	METODOLOGIA	44
3.1	Características dos materiais	44
3.1.1	Agregados	44

3.1.2 Borracha moída de Pneu.....	47
3.1.3 Ligante Asfáltico.....	50
3.2 Misturas asfálticas.....	51
3.2.1 Composição Granulométrica das Misturas.....	52
3.2.2 Dosagem Marshall.....	52
3.2.2.1 Massa Específica Aparente (Gmb).....	55
3.2.2.2 Massa Específica Máxima (Gmm).....	56
3.2.2.3 Volume de Vazios.....	58
3.3 Ensaio de propriedades mecânicas da mistura asfáltica.....	58
3.3.1 Módulo de Resiliência.....	59
3.3.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	60
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	63
4.1 Caracterização Volumétrica das Misturas.....	63
4.2 Caracterização Mecânica das Misturas.....	67
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	84
REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

As indústrias automobilísticas no Brasil têm passado por grande crescimento. A facilidade de compra, as baixas taxas de juros e financiamentos com parcelas populares fizeram com que a venda de automóveis, caminhões, motos, aeronaves entre outros, se desenvolvesse de forma elevada, e com esse crescimento, surgiram também alguns fatores importantes. O primeiro deles é como os pavimentos suportarão um excesso de tráfego e de carga tão grande sem sofrerem patologias prematuras. Outro ponto importante é que com uma frota de veículos muito elevada serão gerados muitos resíduos, sendo os pneus descartados um dos principais e mais degradantes (ARAÚJO, 2015).

O destino impróprio de grandes quantidades dos resíduos gerados pela sociedade tem sido um dos maiores problemas, dentre eles pode-se destacar: poluição do ar, poluição do solo, poluição das águas superficiais e subterrâneas, poluição visual e sonora e desequilíbrio ecológico, etc. Uma forma de sanar o problema é a reutilização desses rejeitos.

Em face disso nas últimas décadas tem-se verificado uma crescente preocupação com as questões ambientais, instigando a realização de pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias, de modo a contribuir com a redução dos impactos ambientais provenientes das atividades humanas.

Um pneu é considerado como inservível quando não existe mais possibilidade de uso ou reforma. Os pneus quando inservíveis acarretam uma série de problemas: são de degradação lenta (400 a 800 anos), poluição visual, necessitando de condições apropriadas de armazenamento e deposição. A não reutilização dos pneus inservíveis pode conduzir futuramente à formação de depósitos de pneus a céu aberto. A preocupação com a não reutilização dos pneus usados ocorre pelo fato de a borracha vulcanizada empregada na fabricação destes pneus, quando queimada a céu aberto contaminar o meio ambiente com a grande quantidade de fumaça tóxica (dióxido de enxofre), além de outros poluentes. Além disto, a formação de depósitos de pneus usados a céu aberto contribui para a proliferação de mosquitos e doenças.

Como forma de controle da poluição ambiental pelos pneus usados foi aprovada no Brasil a partir de 1º de janeiro de 2002, a Resolução Nº. 258. Nesta resolução é mencionado que produtores e importadores de pneus são obrigados a

coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional.

É neste contexto de melhoria do comportamento dos materiais asfálticos convencionais e diminuição da poluição ambiental que tem se utilizado borracha moída de pneus inservíveis em misturas asfálticas.

Segundo Clerman (2004) para a obtenção da borracha, o pneu passa por um processo chamado de regeneração. Nesse processo a borracha é separada dos outros componentes e a malha de aço e o nylon são recuperados como sucata qualificada. Depois desta separação, o pneu é reduzido a pó, isto ocorre, por já haver ocorrido o processo de vulcanização, não podendo ser utilizado como substituto da borracha crua. A borracha vulcanizada é um produto relativamente inerte, de difícil combinação ou ligação com outras substâncias.

Com isso, o uso do asfalto borracha vem crescendo em todo mundo, 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.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral, estudar o comportamento mecânico de misturas asfálticas quando parte de seus agregados são substituídos por borracha moída de pneus, através do processo seco.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da substituição de diferentes teores de agregados naturais por borracha moída em misturas asfálticas densas.
- Avaliar as propriedades volumétricas das misturas asfálticas modificadas com diferentes teores de borracha moída.

- Avaliar o comportamento mecânico das misturas por meio de ensaios mecânicos de resistência à tração e módulo de resiliência.
- Comparar os resultados obtidos com resultados de misturas asfálticas convencionais.

1.2 Justificativa

Com o aumento do volume de tráfego dos veículos nas rodovias, torna-se cada vez mais importante um pavimento que atenda aos requisitos de alta durabilidade e segurança, proporcionando tranquilidade e conforto aos usuários. Além do mais, a relação custo-benefício é um fator que exerce influência na escolha do revestimento asfáltico. Optar por uma alternativa de alta durabilidade reduz os custos de manutenção e operação das vias durante sua vida útil.

O modal rodoviário requer condições ideais para sua utilização, de modo que se diminuam os custos de operação dos serviços de transportes. Dessa forma, a utilização da borracha de pneus em asfaltos torna-se uma excelente solução para melhorar o desempenho dos revestimentos asfálticos, porém ainda se fazendo necessário o investimento em pesquisas, visando principalmente o barateamento da tecnologia. Os estudos sobre essa metodologia requerem o conhecimento sobre as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais envolvidos, assim como as suas possíveis combinações (SPECHT, 2004).

A incorporação de borracha em pavimentação e misturas betuminosas tem aumentado consideravelmente na última década, os pneus que inicialmente eram um passivo ambiental passaram a ser vistos como uma matéria prima nobre para o reforço de pavimento. Desta forma se justifica a verificação da utilização da borracha neste estudo.

1.3 Estrutura do Trabalho

Para alcançar a meta proposta, este trabalho de conclusão de curso está estruturado em cinco capítulos, conforme descritos a seguir:

- Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo encontra-se a introdução ao tema, contendo a proposta a ser estudada, o objetivo do trabalho de conclusão de curso, a justificativa do tema abordado e como está estruturado o presente trabalho;
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Contém uma breve revisão bibliográfica, contextualizando o tema da pavimentação rodoviária, e apresentando o estudo realizado sobre os resíduos mais utilizados em pavimentação;
- Capítulo 3 – Metodologia: É apresentado a metodologia implementada e o tipo de estudo para a realização deste trabalho;
- Capítulo 4 – Análise dos Resultados: Neste capítulo é exposta análise dos resultados obtidos da pesquisa, procurando comparar e discutir esses dados, com elucidações através de tabelas e gráficos, com o objetivo de facilitar a análise de resultados;
- Capítulo 5 – Considerações finais: São expostas as considerações finais do trabalho de conclusão de curso; são feitas também algumas recomendações visando o desenvolvimento de outros trabalhos que venham a ter relação com o tema.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica apresentada a seguir compreende os temas relacionados ao estudo realizado como a utilização de misturas asfálticas com aplicação de borracha.

2.1 Misturas Asfálticas

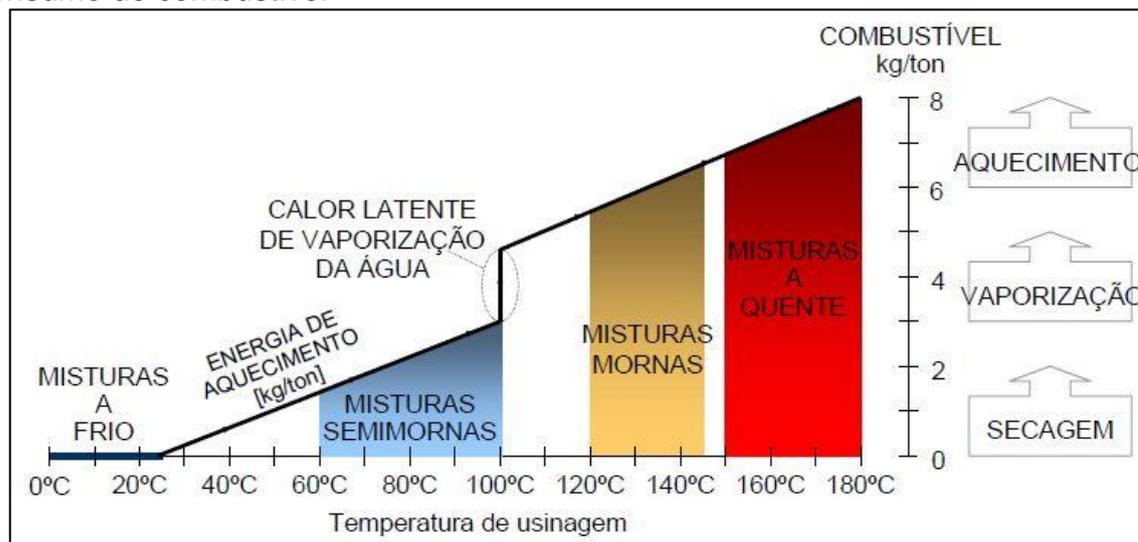
As misturas asfálticas consistem na associação de agregado graúdo e miúdo, de material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico, em proporções adequadas ao fim que se trata.

Os diversos tipos de misturas asfálticas podem ser classificados de acordo com a temperatura aplicada em sua produção, havendo, assim, misturas a quente, misturas mornas, misturas semi-mornas e misturas a frio (MOTTA, 2011).

As misturas a quente são aquelas na qual o agregado é aquecido à temperatura de 10 a 15°C acima da temperatura do ligante, não podendo ultrapassar 177°C (BERNUCCI *et al.*, 2008). Misturas mornas são aquelas preparadas com temperaturas de 20 a 30°C abaixo das misturas a quente e superiores a 100°C, e misturas semi-mornas são produzidas com temperaturas inferiores a 100°C (D'ANGELO *et al.*, 2008). No caso de misturas a frio, estas são produzidas em temperatura ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Conforme aumenta o nível de aquecimento no processo de usinagem há alteração da energia consumida para usinagem da mistura asfáltica, como ilustrado na Figura 1, onde se apresenta a classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas, bem como a indicação do consumo de combustível em cada caso. Nota-se que os processos de secagem e vaporização da água estabelecem grande quantidade energética para serem executadas.

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura e consumo de combustível



Fonte: Motta (2011, p.46)

2.1.1 Misturas Asfálticas a Quente

As misturas asfálticas a quente se dividem em grupos específicos de acordo com o padrão granulométrico. Bernucci *et al.*, (2008) classifica as misturas a quente a partir de graduação, como:

- **Graduação densa:** curva granulométrica contínua e bem graduada, estrutura mineralógica com poucos vazios, agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores. Exemplo: Concreto Asfáltico (CA);
- **Graduação aberta:** curva granulométrica uniforme com agregados basicamente iguais, possibilitando uma grande presença de vazios, com falta de material fino para preencher os vazios deixados por partículas maiores. Esse tipo de mistura é característica de revestimentos drenantes, permitindo a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: Camada Porosa de Atrito (CPA);
- **Graduação descontínua:** presença de granulometria variada (grande, média e fina), com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediária, completados por certa quantidade de finos, trazendo um maior contato entre os grãos graúdos e tornando o revestimento mais resistente à deformação permanente. Exemplo: matriz pétreo asfáltica (*Stone Matrix Asphalt – SMA*).

Patriota (2004), afirma que além da granulometria, o que distingue esses três tipos de misturas asfálticas a quente é a percentagem de vazios, sendo que no CA varia de 3 a 5%, na SMA de 4 a 6%, e no CPA é em torno de 20%.

2.1.1.1 Concreto Asfáltico

A mistura asfáltica mais empregada no Brasil é o Concreto Asfáltico ou também conhecido por Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), sendo definido como uma mistura de agregados de diversos tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente determinadas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. Suas propriedades são muito sensíveis a variação do teor de ligante asfáltico, sendo que, qualquer variação pode ocasionar problemas de deformação permanente por fluência e exsudação ou enfraquecimento da mistura e da resistência à formação de trincas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo a norma DNIT 031 (2004), o concreto asfáltico é uma mistura produzida a quente, em usina apropriada, constituído de agregado mineral graduado, fíler e cimento asfáltico, lançada e compactada a quente.

Para fins de execução, na ocorrência de duas camadas de revestimento, a camada superior é chamada de capa de rolamento ou camada de desgaste e a camada inferior recebe o nome de *binder* ou camada de ligação. O concreto asfáltico pode assumir a função de camada de regularização ou camada de nivelamento (reperfilagem) com a finalidade de regularizar o nível do greide da superfície de um pavimento antigo ou irregular (BALBO, 2007).

A quantidade de ligante asfáltico deve ser o suficiente para cobrir os agregados e preencher os vazios, pois a mistura precisa contar com vazios de ar após a compactação, em torno de 3 a 5%, para camada de rolamento (camada em contato direto com os pneus dos veículos), e de 4 a 6% para camadas intermediárias ou de ligação (camada subjacente à de rolamento). Se não for dada a devida atenção ao controle do índice de vazios, as misturas asfálticas deixam de ser estáveis ao tráfego e, por fluência, deformam-se significativamente (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.1.1.2 Matriz Pétreo Asfáltica

O SMA (*Stone Mastic Asphalt*, nomenclatura mais usada na Europa, ou *Stone Matrix Asphalt*, nomenclatura mais usada dos EUA), foi desenvolvido na Alemanha no final da década de 60 para ser utilizada como revestimento de pavimentos rodoviários e de aeroportos. A mistura se caracteriza por apresentar granulometria descontínua, composta por uma elevada porcentagem de agregados graúdos (entre 70% e 80%), uma rica massa de ligante/fíler, chamada de argamassa ou mastique e aproximadamente 4% de volume de vazios. Comumente o teor de ligante asfáltico é superior a 6%, formando uma película asfáltica mais espessa em torno do agregado. São utilizadas fibras para evitar o escorrimento do ligante durante o transporte e nas etapas de produção e lançamento do SMA (NEVES, 2004).

O SMA por apresentar alta concentração de agregados graúdos tem uma macro textura superficialmente áspera, formando “caminhos” entre os agregados graúdos, responsáveis por uma eficaz drenabilidade superficial e aumento de aderência pneu-pavimento em dias de chuva (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As misturas asfálticas tipo SMA tem sido aplicado como revestimento de pavimentos de vias com alta frequência de caminhões, aeródromos, áreas portuárias, rampas, pontes, paradas e faixas de ônibus, estacionamentos e em áreas de carregamento e descarregamento de cargas (MOURÃO, 2003).

2.1.1.3 Camada Porosa de Atrito

A execução de pavimentos com misturas asfálticas com granulometrias abertas tem se mostrado eficiente na questão de drenagem, atuando no elevado escoamento da água, diminuindo o potencial de aquaplanagem de veículos e de aeronaves (BALBO, 2007).

A norma DNER 386 (1999) define Camada Porosa de Atrito (CPA) como mistura asfáltica porosa (entre 18 e 25% de vazios) preparada em usina a quente composta de agregados, material de enchimento e cimento asfáltico de petróleo modificado, espalhado e comprimido a quente. Essas misturas asfálticas possuem

uma grande porcentagem de vazios com ar devido as pequenas quantidades de fíler, agregado miúdo e de ligante asfáltico.

A CPA é aplicada como camada de rolamento com a finalidade funcional de aumento de aderência pneu-pavimento nos dias de chuva. Esse revestimento drena as águas de chuva para o seu interior e é capaz de promover uma rápida percolação da mesma devido à sua elevada permeabilidade, até sair pelas laterais. A característica importante dessa mistura asfáltica é que ela causa: redução da espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento; redução das distâncias de frenagem sob chuva; melhoria da visibilidade, devido redução do spray oriundo do borriço de água pelos pneus dos veículos; menor reflexão luminosa no período noturno. Todas essas características atuando em conjunto proporcionam uma redução do número de acidentes em dias de chuva. Outro fator importante é a redução dos níveis de ruído do tráfego, diminuindo esse desconforto ambiental em áreas nas proximidades de vias com revestimentos drenantes (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A CPA é utilizada com sucesso em superfícies da pista de decolagem em diversos aeroportos mundiais. Porém, seu sucesso depende de um processo construtivo correto. Por não possuir função estrutural, deve ser aplicada sobre pavimentos de concreto asfáltico de alta estabilidade, com boa declividade e isento de contaminações, construídos ou restaurados especialmente para receber a CPA (SANTOS, 2004).

2.1.2 Pré-Misturado a Frio

Santana (1992) comenta que as misturas asfálticas a frio são geralmente feitas com emulsões asfálticas catiônicas, cuja característica principal é a mistura ser realizada, espalhada e compactada à temperatura ambiente. ABEDA (2001) recomenda que a aplicação seja realizada quando as condições ambientais apropriadas, sem chuvas, com o tempo estável e temperatura acima de 10°C.

É uma mistura realizada à temperatura ambiente em usina adequada, composta de agregado graúdo, material de enchimento (fíler) e de emulsão asfáltica, lançada e compactada a frio. O agregado pode ser pedra ou seixo britado, livre de torrões de argila. O agregado miúdo pode ser areia, pó de pedra ou mistura de ambos

(DNIT 153/2010 - ES). Santana (1992) acrescenta que o agregado ou mistura de agregados deverá ter uma granulometria contínua e, no que diz respeito à graduação, os pré-misturados podem ser classificados em:

- pré-misturado de graduação densa: é aquele no qual o agregado ou mistura de agregados possui granulometria contínua e com uma quantidade apreciável de material fino suficiente para encher os vazios entre as partículas maiores, ficando após a compactação com volume de vazio baixo;
- pré-misturado de graduação aberta: é aquele no qual o agregado ou mistura de agregados possui granulometria contínua e com uma quantidade de material fino insuficiente para encher os vazios entre as partículas maiores;
- pré-misturado de graduação semi-denso: é a mistura asfáltica com quantidade média de agregado miúdo e com pouco ou nenhum fíler, ficando após a compactação com um médio teor de vazios;

Dentre os vários tipos de pré-misturados, destaca-se o pré-misturado a frio denso (PMFD) que tem uma quantidade apreciável de agregado miúdo, podendo ou não conter alto teor de “fíler”, ficando, após a compactação, com teor de vazios baixo. Este tipo de pré-misturado não precisa de capa selante (CHAVES, 2010).

Os pré-misturados a frio podem ser utilizados em camada de 30 a 70 mm de espessura compactada, dependendo do tipo de serviço e da granulometria da mistura, espessuras maiores precisam ser compactadas em duas camadas. As camadas precisam ser lançadas e compactadas à temperatura ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.1.3 Mistura Morna

O termo “mistura morna” tem sido usado no Brasil para representar o termo em inglês (*Warm-Mix Asphalt* - WMA) que reúne uma série de tecnologias que admite a redução da temperatura na qual as misturas asfálticas são produzidas e aplicadas. Estas tecnologias permitem a redução da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas de 20 a 55°C mais baixas que a temperatura das misturas quentes. Deste modo, a mistura fica mais trabalhável e obtém-se melhora na

compactação, há redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante, que é o encarregado pelo melhor desempenho em termos de trincas e susceptibilidade da mistura (CAVALCANTI, 2010).

A produção de misturas asfálticas mornas é possível a partir de espumejo de asfalto, e/ou introdução de aditivos orgânicos ou de aditivos surfactantes, diretamente no ligante ou durante o processo de mistura. Combinando estes elementos, resulta na diminuição da temperatura dos agregados para que a usinagem aconteça em temperatura menor que a temperatura usual, pois os agregados compõem cerca de 95% da mistura asfáltica e isto é suficiente para baixar a temperatura de usinagem de maneira significativa. No entanto, a diminuição da temperatura do ligante também é interessante, visto que isto pode contribuir para o menor envelhecimento/enrijecimento do asfalto (MOTTA, 2011).

Existem diversos aditivos no mercado, dependendo do tipo, pode ter ou não a necessidade de adaptações na usina de asfalto. Os tipos de aditivos existentes no mercado são:

1. Aditivos orgânicos:

Os aditivos orgânicos/ceras são utilizados para reduzir a viscosidade do ligante e permitir que a mistura asfáltica tenha trabalhabilidade igual àquela obtida sem a adição deste aditivo no ponto de fusão. Assim, quando forem submetidos a temperaturas superiores ao seu ponto de amolecimento, interferem nas propriedades do ligante asfáltico, acarretando uma diminuição da viscosidade. O teor do aditivo e a temperatura que ocorre o amolecimento, além da temperatura esperada do pavimento na pista precisam ser levados em conta, reduzindo o risco de deformações permanentes e a possibilidade de trincas em baixas temperaturas. Isso acontece devido à possibilidade de o aditivo causar um endurecimento excessivo em baixas temperaturas quando incorporada em quantidades elevadas (PROWELL, 2007).

Entre alguns aditivos disponíveis no mercado pode-se citar o Sasobit, fabricado pela Sasol, CCBIT 113AD, fabricado pela Dr. H Technologies, Asphaltan-B, fabricado pela Romonta GmbH e o Licomont BS 100, fabricado pela Clariant.

2. Agentes surfactantes

Uma das tecnologias de mistura asfáltica morna é o Evotherm, produzido pela MeadWestvaco Asphalt Innovations. O Evotherm é um aditivo fácil de usar, pois

agrega lubricidade às partículas microscópicas de asfalto, além de gerar a formação de mistelas que desenvolvem “planos de deslizamento”, o que permite que as partículas de asfalto se movimentem mais facilmente, exigindo menos energia mecânica durante a mistura e compactação. Na verdade, a mistura morna com Evotherm apresenta as mesmas propriedades reológicas que o CBUQ convencional quando submetida a baixas forças de cisalhamento; mas quando submetida a alto cisalhamento (usinagem e rolagem) apresenta menor viscosidade mesmo em temperaturas mais baixas (MELLO, 2012).

A tecnologia Evotherm baseia-se num pacote químico que é misturado a uma emulsão ou ao ligante asfáltico. Este pacote químico tem por objetivo melhorar o recobrimento dos agregados, a trabalhabilidade e a adesividade das misturas asfálticas, quando estas são produzidas e compactadas a temperaturas inferiores daquelas usualmente praticadas (MELLO, 2012).

Atualmente, existem diversos produtos no mercado alguns exemplos de aditivos surfactantes de adesividade são: QPR QualiTherm, Revix, Evotherm®, Rediset®, Cecabase® e Gemul®.

3. Espuma de asfalto

Nas tecnologias que fazem uso desse recurso, a água é introduzida no processo de usinagem por injeção direta, por agregado úmido ou na forma de material hidrofílico como as zeólitas. Trata-se da técnica de espumar o ligante, com isso, a mistura sendo produzida a temperaturas inferiores. Neste processo, o ligante asfáltico quente é colocado em contato com a água em temperatura ambiente, com isso, tornando-a vapor e expandindo (PROWELL e HURLEY, 2007).

O equipamento que permite a produção de misturas asfálticas espumadas consiste em uma barra anexada à usina para espumação do asfalto com controle de temperatura, controle de pressão de injeção de água, ar e dosagem fina dos componentes através de uma bomba de deslocamento positivo. O controle da pressão de ar é necessário para o perfeito funcionamento do sistema. Cilindros de limpeza evitam entupimento durante a operação, antes e após paradas. O sistema permite a operação em asfalto tanto para a mistura asfáltica tradicional quanto para a espumada (MELLO, 2012).

Deve-se ter um cuidado ao escolher este tipo de tecnologia, pois a quantidade de água a ser inserida no ligante deve ser suficiente para causar o efeito espuma, pois se inserir água à mais pode causar problemas de falta de adesividade (RUBIO et al. 2012).

Segundo MOTTA (2011), dependendo do tipo de tecnologia utilizada é possível reduzir a temperatura de usinagem em até 50 °C. Também pode-se combinar estas tecnologias com aquelas que empregam aditivos surfactantes, que são: LEA®, LT Asphalt®, Advera® WMA, AQUABlack® Warm mix Asphalt, Aspha-Min®, Double Barrel® Green, LEA B®, WAM-fOAM®, WMA Terex®.

2.2 Dosagem de Misturas Asfálticas

O objetivo da dosagem é produzir uma mistura que possua trabalhabilidade satisfatória e a melhor combinação possível das seguintes propriedades: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, impermeabilidade e resistência ao atrito.

A dosagem da mistura asfáltica consiste na escolha, através de métodos experimentais, do teor de projeto, em função de uma faixa granulométrica pré-determinada. O método de dosagem mais utilizado no Brasil utiliza a compactação por impacto e é denominado método Marshall, já em países mais desenvolvidos é a metodologia SUPERPAVE que está sendo utilizado.

2.2.1 Dosagem Marshall

No Brasil a maior parte dos projetos de misturas asfálticas é realizado pela metodologia Marshall, preconizado no Brasil pela norma DNER-ME 043/95. Esse método foi idealizado no decorrer da segunda guerra mundial como um procedimento para efeito da determinação da quantidade de ligante e de agregados que deveria ser usada na composição de mistura betuminosas, capaz de resistir às cargas de roda e pressão de aeronaves (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Na dosagem de misturas asfálticas, o método Marshall considera os seguintes parâmetros:

- granulometria: busca-se a densidade máxima possível para garantir a máxima estabilidade;
- densidade aparente da mistura: calculada com os corpos de prova do ensaio de dosagem;
- densidade máxima teórica da mistura: densidade da mistura suposta sem vazios;
- porcentagem de vazios da mistura (Vv): volume total de pequenas bolsas de ar existentes entre as partículas de agregados recobertos por cimento asfáltico em uma mistura compactada em relação ao volume total da mistura;
- porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM): porcentagem do volume do espaço intergranular de uma mistura asfáltica compactada, que inclui o volume de ar e de asfalto, em relação ao volume total da mistura;
- relação betume vazios (RBV): é a relação entre o volume de betume e o volume total de vazios;
- estabilidade: carga máxima a qual o corpo de prova resiste antes da ruptura;
- fluência: deslocamento na vertical apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga máxima.

A seguir é descrito, de forma sucinta, os procedimentos para realização do ensaio Marshall, fixados de acordo com os métodos de ensaio do DNER-ME 043/95:

I - Após definição da composição granulométrica da mistura que devera ser enquadrada nos limites da faixa especificada, conhecidos os percentuais de cada material na mistura, os agregados e o ligante são aquecidos separadamente, até a temperatura determinada a partir da curva viscosidade versus temperatura do ligante escolhido e, então, misturados.

II – A mistura é colocada no molde aquecido, numa única camada, e compactada, geralmente, com 75 golpes (tráfego pesado) com o soquete padrão em cada face do corpo de prova, caindo de uma altura de 45,72 cm. O corpo de prova de concreto asfáltico é um cilíndrico com diâmetro igual a 4”(10,16 cm) e 2 ½” (6,35cm) de altura;

III - Extração dos corpos-de-prova dos moldes cilíndricos e colocados em repouso, ao ar livre, numa superfície lisa e plana, por no mínimo 12 horas. Após esse período faz-se a pesagem e cubagem dos corpos-de-prova para a determinação dos

elementos para o cálculo de suas características físicas (massa específica aparente, volume de vazios, relação betume vazios); Tomar o cuidado na pesagem hidrostática (peso imersão) de equalizar a temperatura da água em $25\pm 1^\circ\text{C}$;

IV - Imersão dos corpos-de-prova em banho-maria, a 60°C , durante 30 minutos, após as amostras são imediatamente submetidos a um carregamento na prensa Marshall até a ruptura, para a determinação de suas propriedades mecânicas (estabilidade e fluência);

V – Com os dados são traçadas as curvas de variação de volume de vazios (%), relação betume/vazios (%), vazios de agregado mineral (%), densidade máxima teórica (g/cm^3), densidade aparente (g/cm^3), estabilidade e fluência, em função da quantidade de ligante utilizada e, posterior determinação do teor de ligante de projeto em função dos critérios definidos pelo DAER/RS;

Os limites recomendados pelo DNER para estabilidade, fluência, porcentagem de vazios e relação betume/ vazios encontram-se reproduzidas no Quadro 1.

Quadro 1- Valores estabelecidos pelo DNER (1997)

Discriminação	CAMADA DE ROLAMENTO	CAMADA DE LIGAÇÃO (BINDER)
Porcentagem de vazios	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	75/82	65 – 72
Estabilidade, mínima	350 kgf (75 golpes) 250 kgf (50 golpes)	350 kgf (75 golpes) 250 kgf (50 golpes)
Fluência, mm	2,0 - 4,5	2,0 - 4,5

Fonte: Adaptado de DNER (1997, p.5)

2.2.2 Dosagem Superpave

A especificação Superpave, desenvolvida a partir do Programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), classifica os ligantes asfálticos com base no desempenho e leva em consideração as condições climáticas, assim como o volume

e as cargas do tráfego. Para determinar as propriedades fundamentais relacionadas aos principais defeitos que ocorrem nas misturas asfálticas, a especificação Superpave inclui equipamentos de ensaios laboratoriais, métodos e critérios em substituição aos ensaios tradicionais.

A dosagem Superpave difere da dosagem Marshall com relação ao tipo de compactação dos corpos de prova, enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros). Outra diferença que pode ser referida entre os dois métodos é a forma de escolha da granulometria da mistura de agregados. A metodologia Superpave abrange os conceitos de pontos de controle e zona de restrição (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Marques (2004), no procedimento Superpave há três níveis de projeto de misturas dependendo do volume de tráfego e do número de passagem do eixo equivalente (ESAL – *Equivalent Single Axle Loads*), conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Organização da metodologia Superpave de dosagem de misturas asfálticas em função do volume de tráfego

Nível	1	2	3
Critério	Volumétrico	Volumétrico Ensaio de previsão de desempenho a uma temperatura	Volumétrico Ensaio de previsão de desempenho a três temperaturas
N (AASHTO)	$N < 10^6$	10^6 e 10^7	$N \geq 10^7$

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2008, p.231)

2.3 Agregados

De acordo com a norma ABNT NBR 9935 (2005), que determina a terminologia dos agregados, o termo agregado é definido como material sem forma ou volume

definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto.

Os agregados representam a maior parcela constituinte de uma mistura asfáltica, atingindo a valores maiores que 90% em peso do conjunto asfalto-agregado. Assim, as propriedades dos agregados empregados nas misturas asfálticas são muito importantes para o desempenho dos pavimentos (ROHDE, 2007).

2.3.1 Agregado Natural

Agregados naturais são resultantes da alteração das rochas por processos de intemperismo e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias etc. Os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e dimensão como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por processamentos como a britagem (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os agregados utilizados em pavimentação são, na maior parte das vezes, obtidos de rochas naturais. As rochas naturais são classificadas em três grupos, dependendo de sua origem: ígneas, sedimentares e metamórficas.

Para Bernucci *et al.* (2008), rochas ígneas são aquelas que resultam da solidificação de material rochoso, parcialmente ou totalmente fundido, gerado no interior da crosta terrestre, por exemplo, os granitos e dioritos de granulação grossa. Outros tipos são extrusivos, provenientes de fluxos de lava para a superfície da Terra, resultando em rochas de granulação fina, como os basaltos.

Segundo Gouveia (2002), as rochas sedimentares são tipicamente formadas pelo intemperismo e erosão de rochas preexistentes, e seu resultado transportado pela ação da água, vento ou gelo. São classificadas conforme sua origem (como os arenitos, os siltitos e os argilitos) e conforme composição química (como os calcários e os carvões).

Bernucci *et al.* (2008) descreve que rochas metamórficas são rochas ígneas ou sedimentares que sofreram aquecimento a altas temperaturas e/ou foram submetidas

a alta pressão e compõem um grupo bastante complexo de rochas. Areias e pedregulhos são agregados naturais, provenientes das rochas de que são originários e dos processos de transporte sofridos antes da deposição.

Patriota (2004) afirma que, na estrutura do pavimento, os agregados têm como funções principais a resistência mecânica e a flexibilidade da camada de rolamento, devendo possuir características granulométricas adequadas, resistência mecânica e aderência ao ligante asfáltico. Esses agregados são encontrados em depósitos naturais superficiais, tais como: as areias de rio e de campo, os seixos rolados, etc.

Os agregados são classificados quanto ao tamanho, para uso em misturas asfálticas, em graúdo, miúdo e material de enchimento ou fíler (DNIT 031/2004 – ES):

- graúdo – é o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira no 10. São as britas, cascalhos, seixos etc.;
- miúdo – é o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. É o material que é retido na peneira de no 200, mas que passa na de abertura no 10. São as areias, o pó de pedra etc.;
- material de enchimento (fíler) – é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de no 200, e.g., cal hidratada, cimento Portland etc.

2.3.2 Agregado Reciclado

Segundo a ABNT NBR 15115 (2004), o agregado reciclado aplicável à pavimentação é o “material granular, obtido por meio de britagem ou beneficiamento mecânico, de resíduos de construção civil”, pertencentes a Classe A da Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002). O material deve atender a alguns requisitos como: (a) boa graduação granulométrica; (b) valores mínimos de ISC e expansão (conforme o tipo de camada do pavimento); (c) dimensões máxima característica de 63,5 mm.

2.3.2.1 Resíduos da Construção Civil

Bagatini (2011), diz que o reaproveitamento dos resíduos de construção civil está associado à diminuição dos impactos ambientais ocasionados pelo indevido descarte e, da mesma forma, restrição ao uso das matérias-primas de fontes naturais.

De acordo com a resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), os resíduos da construção civil são definidos como aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Segundo a ABNT NBR 15115 (2004), o agregado reciclado aplicável à pavimentação é o “material granular, obtido por meio de britagem ou beneficiamento mecânico, de resíduos de construção civil”, pertencentes a Classe A da Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002). O material deve atender a alguns requisitos como: (a) boa graduação granulométrica; (b) valores mínimos de ISC e expansão (conforme o tipo de camada do pavimento); (c) dimensões máxima característica de 63,5 mm.

Segundo Iyomasa (2013), agregado reciclado de RCC, originado por processos de britagem em usinas, é uma mistura de agregados graúdos e miúdos com formato similar ao agregado natural de rocha calcária, apresentando uma forma mais irregular, e textura mais áspera e porosa, o que provoca uma maior absorção de água. No Brasil, o agregado reciclado de RCC é mais empregado em pavimentação e como material de enchimento para aterros. Na pavimentação podem ser empregados nas camadas de base, sub-base, reforço do subleito e no cascalhamento de vias, substituindo os agregados convencionais.

2.3.2.2 Material Fresado

De acordo com Bomfim (2007), a crise do petróleo dos anos 1970 e a escassez da fabricação dos materiais asfálticos, fizeram os técnicos rodoviários da época

voltarem-se para a ideia de reprocessar os materiais de pavimentação de pistas deterioradas. O mesmo autor relata que a fresagem de pavimentos asfálticos é, nos dias atuais, uma técnica constantemente aplicada como parte de um processo de restauração de pavimento.

Segundo Moreira (2005), a reutilização de material fresado surge como alternativa viável para utilização em vias de baixo volume de tráfego. Apesar da tecnologia de reciclagem ser bastante difundida, em locais de baixo poder orçamentário ainda se opta pela solução de depositar o material fresado em “bota-foras”.

A utilização do material fresado é de grande utilidade dentro da pavimentação. Além dos trabalhos de reciclagem “in situ”, nota-se o grande leque de opções formado pela possibilidade de incorporação do RAP em novas misturas asfálticas, entre as quais, podem-se destacar: Specht (2012) que propõe a utilização deste material em camadas de base e subbase de pavimentos, Pinto (2010), que investiga a possibilidade de utilização deste material em bases de aterros e Zubaran (2014) avaliando o comportamento de misturas mornas recicladas. Além destes, Moreira (2005) incorpora aos Pré Misturados a Frio (PMF) porcentagens de fresado.

2.3.2.3 Borracha Moída

Um pneu típico, como o modelo P195/75R14, com massa aproximada de 10 kg, contém (SALINI, 2000):

- 2,50 kg de 30 diferentes tipos de borracha sintética;
- 2,05 kg de 8 tipos diferentes de borracha natural;
- 2,27 kg de 8 tipos de carbono preto;
- 0,68 kg de aço para o cinturão;
- 0,45 kg de poliéster e nylon;
- 0,23 kg de arame de aço;

- 1,36 kg diferentes tipos de produtos químicos, ceras, óleos, pigmentos, etc.

De acordo com Salini (2000), no processo de reciclagem os pneus podem ser triturados, basicamente, através de dois processos: a tecnologia criogênica ou em temperatura ambiente.

O termo criogênico, é utilizado para descrever o uso de nitrogênio líquido ou dióxido de carbono sólido para resfriar materiais a temperaturas inferiores a -87°C . A separação criogênica da borracha é realizada em temperaturas extremamente baixas (-87°C a -198°C) por meio da aplicação de um banho de nitrogênio líquido nos pneus usados. Sob temperaturas muito baixas, a borracha torna-se muito frágil. O pneu congelado passa então por uma série de moinhos de martelo que o reduzem ao tamanho de partículas finas ou superfinas (geralmente de 0,5 mm a 0,1 mm) (SALINI, 2000).

A Figura 2 mostra as etapas do processo criogênico para a extração e granulação da borracha existente nos pneus usados. O processo inicia-se com a lavagem e limpeza das carcaças dos pneus, para posterior fragmentação e retirada dos aros metálicos. Após esta trituração preliminar mais grosseira, o material é conduzido ao túnel criogênico, para aplicação do nitrogênio líquido, o que facilita a trituração e permite a obtenção de grânulos mais pequenos e regulares. Em seguida vai para os moinhos de martelo onde a borracha é extraída e reduzida à granulometria desejada. Antes da crivagem são separados os metais por processos magnéticos e os têxteis por processos gravimétricos recorrendo ao ar ventilado.

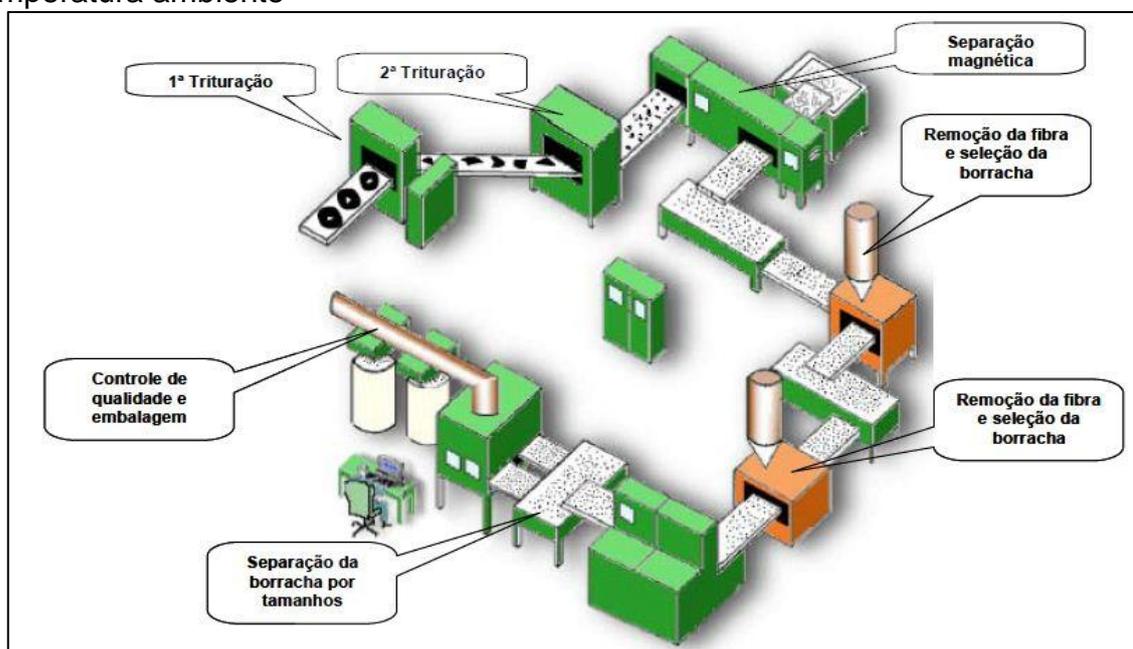
Figura 2 - Processo criogênico para obtenção da borracha granulada de pneus



Fonte: Campos (2006, p.44)

O processo de moagem a temperatura ambiente consiste em rasgar e cortar os pneus usados à temperatura ambiente. Normalmente as partículas são trituradas com tamanhos de 3,0 mm à 0,5 mm. Esta trituração é realizada por um conjunto de moinhos ou granuladores, peneiras, esteiras de transporte, e vários tipos de ímãs para remover o aço existente nas carcaças, conforme ilustrado na Figura 3. As fibras presentes nas lonas dos pneus são retiradas por peneiramento (SALINI, 2000).

Figura 3 - Processo de obtenção da borracha granulada por trituração a temperatura ambiente



Fonte: Dantas Neto (2004, p.8)

2.4 Ligantes Asfálticos

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é considerada a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo Pinto e Pinto (2015), os asfaltos devem apresentar uma boa resistência à oxidação na obscuridade, podendo até oxidar em um espaço curto de tempo na superfície, evitando assim problemas de derrapagem. A diferença de oxidação está no fato de que os asfaltos serem constituídos basicamente de núcleos

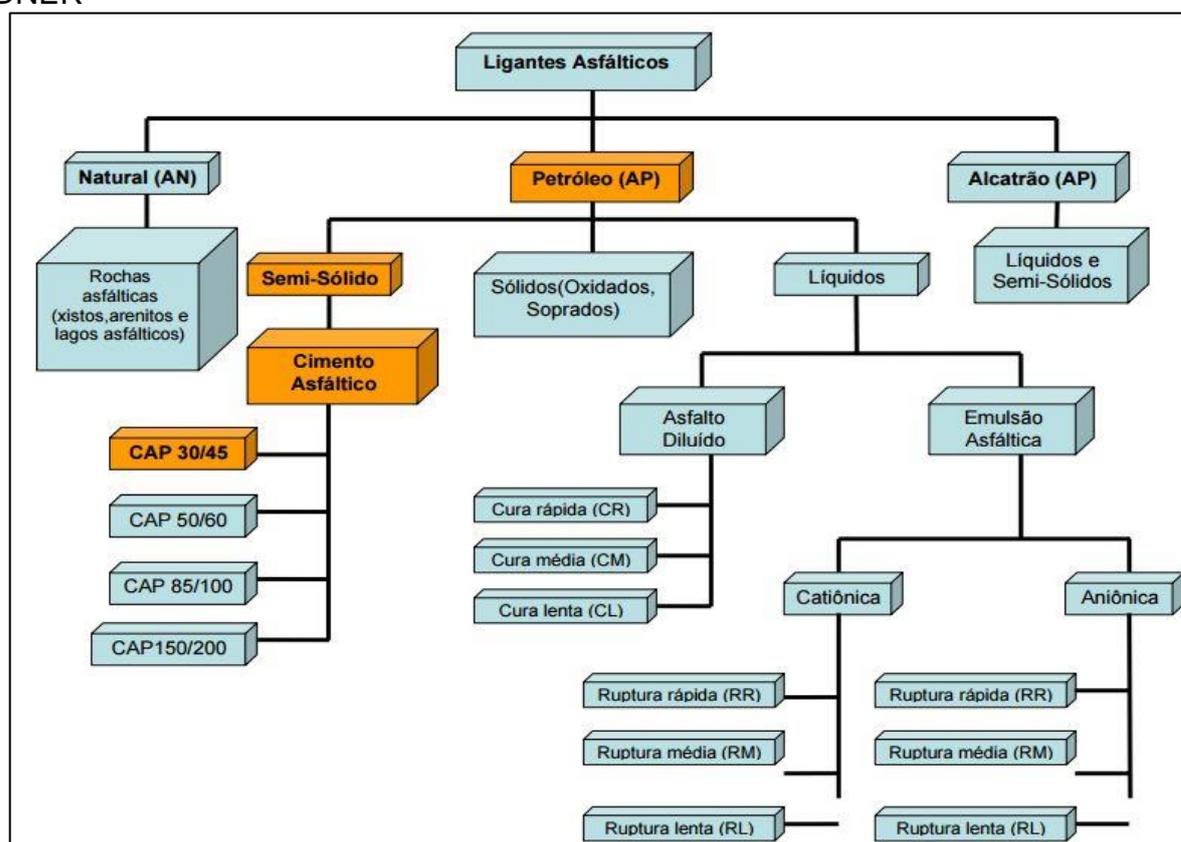
hidrocarbonetos aromáticos, onde não absorvem oxigênio na obscuridade, porém, na luz, são muitos reativos.

De acordo com Bernucci et al (2008), atualmente, o mercado brasileiro dispõe dos seguintes tipos de ligantes asfálticos:

- ✓ Cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- ✓ Asfaltos diluídos de petróleo – ADP;
- ✓ Emulsões asfálticas de petróleo – EAP;
- ✓ Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- ✓ Asfaltos modificados por polímero – AMP ou por borracha de pneus – AMB;
- ✓ Agentes rejuvenescedores – AR e ARE.

A Figura 4 apresenta o diagrama dos tipos de ligantes asfálticos e seus grupos, segundo a classificação do DNER e as definições pertinentes a cada classe de ligante asfáltico.

Figura 4 - Diagrama de blocos da classificação de ligantes asfálticos segundo o DNER



Fonte: Mothé (2009, p.17)

2.4.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Os Cimentos Asfálticos de Petróleo são obtidos a partir de processos de refinamento do petróleo cru. São materiais que apresentam uma grande quantidade de betume (hidrocarbonetos não voláteis pesados), com cor escura, muito viscoso e agindo como ligante, de consistência sólida a semissólida em temperatura ambiente (BALBO, 2007).

O CAP, apresentado na Figura 5, é obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos, podendo ser obtido pela destilação do petróleo em refinarias. O cimento asfáltico de petróleo, CAP, é um produto obtido no fundo da torre de destilação a vácuo, de acordo com as especificações brasileiras. À temperatura ambiente são semi-sólidos e precisam ser aquecidos para adquirir a consistência adequada para serem misturados com os agregados. São flexíveis, impermeáveis, aglutináveis e resistentes a ação da maioria de ácidos, sais e álcalis (DNER, 1996).

Figura 5 - Cimento Asfáltico de Petróleo



Fonte: Bernucci et al. (2008)

Mothé (2009) afirma que os cimentos asfálticos de petróleo são classificados pelo seu “grau de dureza” retratado no ensaio de penetração ou pela sua viscosidade. A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padronizada penetra em uma amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, sob condições especificadas de carga, tempo e temperatura. Quanto menor a penetração, “mais duro” é o cimento asfáltico. Sua classificação, de acordo com DNIT 095 (2006), é relacionada à sua penetração, podendo ser: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200.

2.5 Borrachas em Misturas Asfálticas

De acordo com Bertollo (2002), em 1963, o engenheiro Charles Mcdonald que é considerado o “pai” do asfalto borracha nos EUA, desenvolveu um ligante modificado para asfalto usando borracha de pneu triturada, denominada Overflex® (processo úmido). Posteriormente, na metade dos anos 1970 a Companhia de Refinação do Arizona – ARCO criou uma tecnologia semelhante de adição de borracha triturada ao ligante asfáltico, que foi chamada de Arm-R-Shield®.

Também nos anos 1960, ao mesmo tempo em que o asfalto-borracha estava ganhando notoriedade nos EUA, duas empresas suecas desenvolveram um método de incorporação de pequena quantidade de borracha triturada em substituição de parte dos agregados nas misturas asfálticas (processo seco). No fim dos anos 1970, este produto denominado Rubit® foi introduzido e patenteado nos Estados Unidos com o nome de PlusRide® (PATRIOTA, 2004).

O Quadro 2 apresenta algumas das principais tecnologias de incorporação de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas pelos processos seco e úmido.

Quadro 2 - Algumas das tecnologias de incorporação de borracha de pneus em misturas asfálticas

Tecnologia		Características
Processo Úmido	McDonald (Overflex® e Arm-R-Shield®)	Desenvolvida nos anos 1960 no Arizona - EUA. Consiste na mistura de cimento asfáltico e borracha triturada (15 a 25% em relação ao peso de ligante), a uma temperatura elevada (170 a 200°C), durante um determinado período de tempo (20 a 120 minutos). A mistura reage e forma um composto denominado asfalto-borracha, com propriedades reológicas diferentes do ligante original, podendo ser incorporado aditivo para ajustar a viscosidade da mistura.
	<i>Continuous Blending (Florida wet process)</i>	Desenvolvida em 1989 na Florida - EUA. Partículas finas de borracha são adicionadas ao cimento asfáltico em um processo contínuo. Essa tecnologia difere do processo McDonald em vários aspectos: são adicionados menores teores de borracha (8 a 10%), as partículas de borracha são mais finas e o tempo de reação são menores.
	<i>Terminal Blending</i>	Desenvolvida em 1992 - Arizona / Washington - EUA. Essa tecnologia permite a armazenagem prolongada do ligante asfalto-borracha.
Processo Seco	PlusRide®	Desenvolvida nos anos 60 - Suécia. Os agregados pétreos apresentam descontinuidade na sua curva de distribuição granulométrica para acomodar partículas relativamente grandes de borracha (até 1/4") nos teores especificados (geralmente 3% em relação ao peso total da mistura).
	Genérica (<i>Generic System</i>)	Desenvolvida por H. B. Takallou em 1989 - Nova York - EUA. Neste método são utilizadas curvas granulométricas densas onde parte dos agregados pétreos é substituído por partículas de borracha com granulometria mais fina (para que ocorra reação parcial com o ligante asfáltico) e em menores teores (geralmente 2% em relação ao peso total da mistura para camadas de rolamento).
	<i>Chunk Rubber (borracha "graúda")</i>	Desenvolvida em 1990 - EUA. Este método foi desenvolvido com o objetivo de melhorar as características dos pavimentos asfálticos a serem construídos em regiões de clima frio. As pesquisas se concentraram no aumento do tamanho das partículas de borracha e no aumento da quantidade de borracha incorporada nas misturas asfálticas, utilizando os conceitos do sistema PlusRide®.

Fonte: Adaptado de Bertollo (2002 p.89)

2.5.1 Processo Úmido

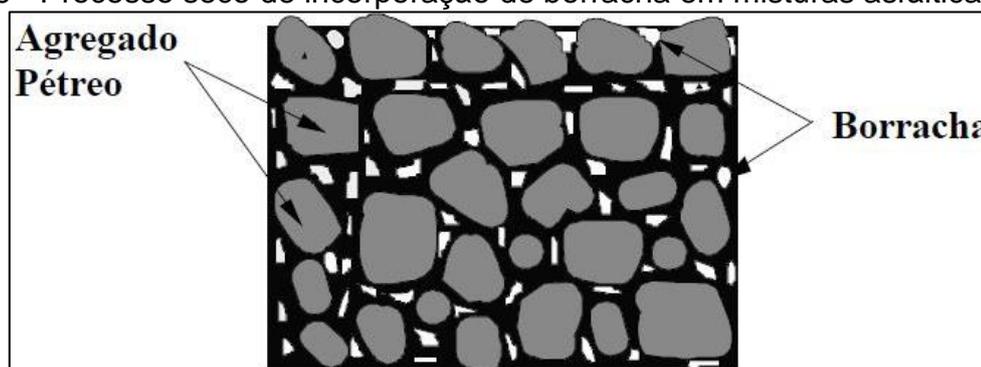
No processo úmido, um teor mínimo de 15% de borracha em relação ao peso do ligante (ou cerca de 0,9% de borracha em relação à mistura) é previamente misturado ao ligante asfáltico seguindo a norma DNIT 111/2009 – EM antes de incorporar o agregado, modificando-o permanentemente em uma liga química, melhorando as propriedades do concreto asfáltico. Nesta modalidade ocorre a transferência mais efetiva das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original (SOARES; ASSIS, 2008).

A produção de asfalto-borracha pelo processo úmido envolve a avaliação dos principais componentes, ou seja, asfalto, borracha e aditivos, tendo em conta o aperfeiçoamento das propriedades do asfalto-borracha, para uma gama de tempo de digestão e de temperatura de fabricação, a estabilidade da mistura ao longo do tempo e as proporções dos componentes visando obter as propriedades desejadas do novo ligante (ZANZOTTO; KENNEPOHL, 1996). No Brasil, o seu procedimento executivo deve atender às condições gerais impostas pela norma DNIT 111/2009 – EM.

2.5.2 Processo Seco

No processo seco a borracha moída substitui parte dos agregados pétreos que com a adição do ligante asfáltico, formam um produto denominado agregado-borracha ou concreto asfáltico modificado com adição de borracha, conforme Figura 6.

Figura 6 - Processo seco de incorporação de borracha em misturas asfálticas



Fonte: Bertollo (2002, p.87)

O sistema PlusRide® permite a incorporação de 3% de borracha granulada em relação ao peso total da mistura asfáltica, com os grânulos de borracha variando de 6,3 mm a 2,0 mm. O objetivo é que esta borracha preencha os vazios que normalmente situam-se entre 2% e 4%, que requerem uma quantidade maior de ligante asfáltico, cerca de 1,5 a 2% a mais em relação às misturas convencionais (BERTOLLO, 2002). A Tabela 2 apresenta as especificações do método PlusRide®.

Tabela 2 - Especificações recomendadas para misturas modificadas com borracha, para diferentes níveis de tráfego

Característica	PlusRide® 9*	PlusRide® 12*	PlusRide® 16*
Tráfego diário médio	<2500	2500 - 10000	>10000
Espessura mínima	0,75" (1,9 cm)	1,5" (3,8 cm)	1,75" (4,5 cm)
Peneiras	Agregado - % passando		
3/4"	-	-	100
5/8"	-	100	-
1/2"	-	-	65-80
3/8"	100	60-80	50-60
1/4"	60-80	30-42	30-42
#10	23-38	19-32	19-32
#30	15-27	13-25	13-23
#200	7-11	8-12	6-10
Borracha, % do total	Dosagem preliminar		
em peso	3,0	3,0	3,0
em volume (aprox)	6,7	6,7	6,7
Asfalto, % do total	Dosagem preliminar		
em peso	7,5	7,5	7,5
em volume (aprox)	20,2	20,2	20,2
Vazios máximo (%)	2	3	4

* Diâmetro máximo do agregado

Fonte: Adaptado de Bertollo (2002, p.93)

Segundo Bertollo (2002) as misturas com agregado-borracha de granulometria mais grossa (9,5 – 0,60mm) apresentam um excesso de deformação permanente e

maior resiliência. Já as misturas modificadas com agregado-borracha com granulometria fina (1,18 – 0,15mm) apresentam melhor desempenho quanto à deformação permanente e flexibilidade, quando comparadas a misturas convencionais. Estes resultados ratificam a teoria que as partículas finas de agregado-borracha reagem parcialmente com o ligante, enquanto as partículas maiores funcionam como agregados elásticos.

O processo seco é considerado mais econômico que o processo úmido, porém ainda acarreta grandes dúvidas quanto à sua capacidade de aumentar a durabilidade do pavimento, pois estudos mostram que o processo úmido garante resultados melhores e possui capacidade de aumentar até dez vezes a durabilidade do pavimento (MACHADO, 2013).

2.6 Trabalhos Realizados com Borracha

BERTOLLO (2002) realizou ensaio de módulo de resiliência e ensaio de resistência à tração por compressão diametral utilizando 1,0 e 2,0% de borracha em um processo seco e com duas granulometrias de borracha, em substituição de parte do agregado. Consideraram-se tempos de digestão de zero, duas e quatro horas a 150° C. Esses ensaios foram comparados a uma mistura de controle com 6,2% de CAP 20, em que foi observado que a adição de partículas de 1,18 a 0,15 mm propiciou a melhoria no desempenho quanto à deformação permanente. Ainda, maiores teores de borracha agrupados a menores tamanhos resultaram em menores módulos de resiliência, e maiores teores de borracha apresentaram menores resultados de resistência à tração.

PINHEIRO (2004) estudou a substituição de 2,5% da mistura total por borracha, em três granulometrias diferentes, como parte do agregado mineral. As misturas com partículas de borracha de 2,0 a 0,075 mm apresentaram um excelente comportamento mecânico quanto ao módulo de resiliência e resistência à tração, quando comparadas às misturas convencionais. Além disso, verificou-se que o tempo de digestão é importante para o processo seco, pois é o fator que aproxima o processo seco do processo úmido, melhorando os seus resultados quanto ao volume de vazios e comportamento mecânico.

SPECHT (2004) adicionou de 0,2; 0,6; 1,0 e 3,0% de borracha nas misturas asfálticas, em duas faixas granulométricas: densa e descontínua. Foram considerados três tempos distintos de digestão (zero, uma e duas horas) em corpos de prova com 1,0% de borracha, cujas características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico apresentaram melhores resultados. Entretanto, menores teores de borracha foram mais susceptíveis à desagregação da mistura asfáltica.

SARTORI e LUVISÃO (2014) efetuaram uma mistura padrão com 20% de brita I, 25% de pedrisco e 55% de pó de pedra. A partir desse traço padrão, adicionaram-se porcentagens de resíduo de borracha de 1 a 3%, variando 0,5% para cada traço. Todos os traços atenderam aos valores exigidos por normas e referências nos ensaios de estabilidade, vazios do agregado mineral, relação betume vazios e volume de vazios. Como todos os teores atenderam aos requisitos, a escolha do teor de resíduo e do teor de ligante foi baseada no menor consumo de ligante, para que essa mistura seja a mais econômica. Optou-se, então, por um teor de ligante de 6,15% e de resíduo de 1% que apresentou VV de 4,9%, VAM de 19,45%, RBV de 75% e uma estabilidade de 700 kgf. Deve-se ressaltar, também, que a escolha visou a reutilização de materiais inservíveis, porém, o traço com menor teor ótimo de ligante e a maior estabilidade foi o sem adição de resíduo.

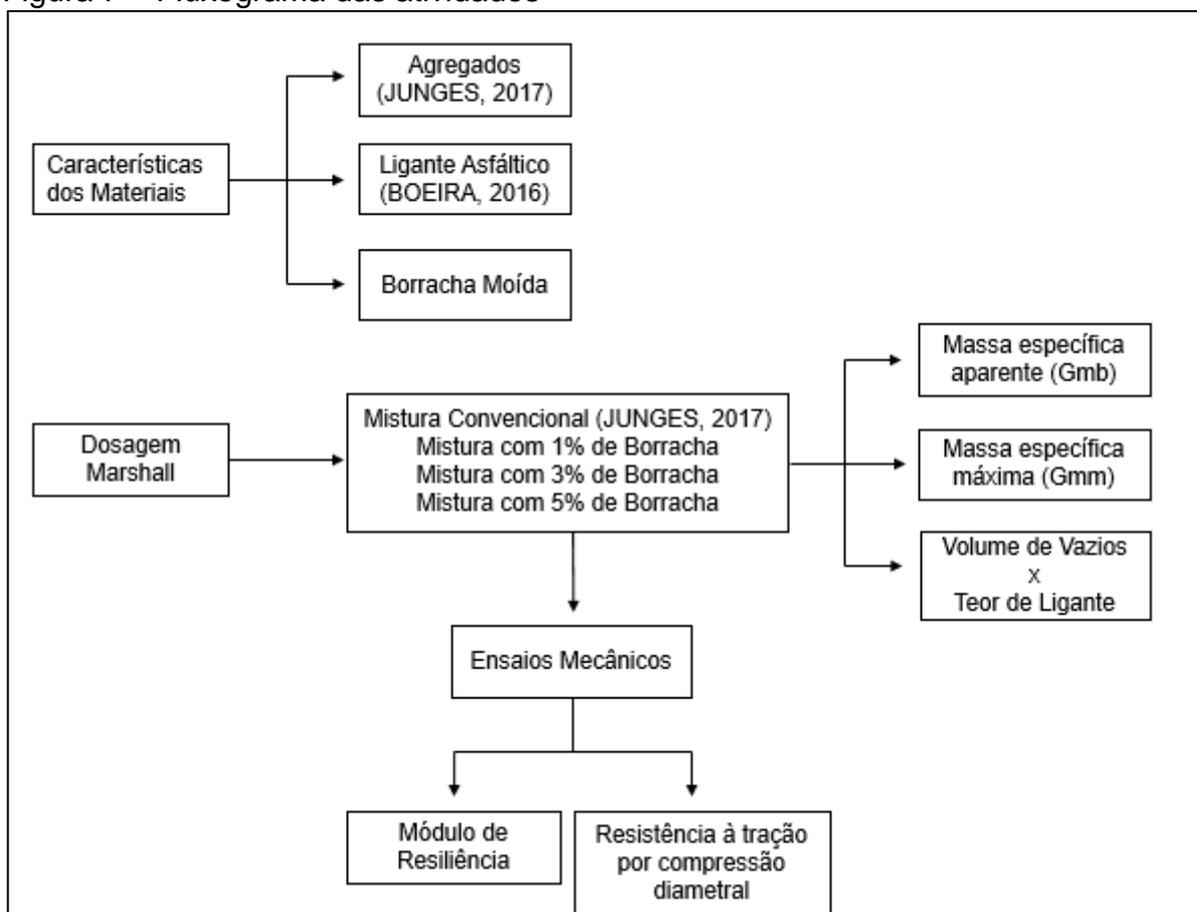
NETTO e REIS (2015) adicionaram 4% de borracha moída nas misturas asfálticas usinadas à quente, através do processo seco. Para o estudo eles utilizaram o CAP 50/70. Para a mistura realizaram ensaios mecânicos, onde a resistência à tração foi de 0,48 Mpa, valor inferior ao estabelecido pela norma DNIT-ES 031 (2006), para o módulo de resiliência o valor encontrado foi de 1650 MPa, valor inferior ao encontrado pela mistura referência, assim a relação MR/RT ficou com valor 3437 MPa. O resultado deste processo foi uma mistura com alto Vv, próximo de um asfalto drenante, e baixos MR e RT.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo são apresentados os métodos e materiais utilizados para avaliar o comportamento de misturas asfálticas convencionais e misturas asfálticas com substituição de borracha moída.

A Figura 7 demonstra o fluxograma das atividades que foram realizadas.

Figura 7 – Fluxograma das atividades



Fonte: Elaboração própria

3.1 Características dos materiais

3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa são provenientes de rochas basálticas, obtidos da Pedreira Pedra Rosada, localizada próxima a BR-290, no município de

Alegrete - RS. Junges (2017), realizou os ensaios de massa específica e absorção conforme regulamentam as normas DNER-ME 081/98 e DNER-ME 194/98 e obteve como resultado uma massa específica média de 2,727 g/cm³ e absorção de 2,01% para o agregado graúdo e para o agregado miúdo massa específica de 2,817 g/cm³.

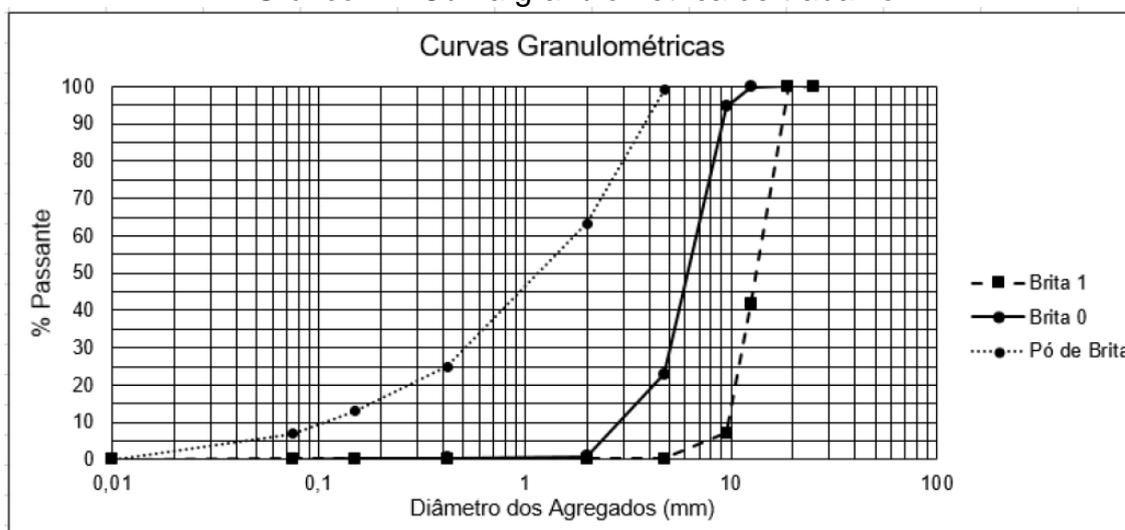
O ensaio granulométrico do material foi realizado conforme a norma DNER-ME 083/98 de Análises Granulométricas, utilizando-se peneiras de malha quadrada e de aberturas regulamentadas conforme as especificações técnicas. A Tabela 3 apresenta os valores das porcentagens passantes dos agregados ensaiados (brita 0, brita 1 e pó de brita) e o Gráfico 1 a curva de trabalho dos agregados.

Tabela 3 – Granulometria dos agregados

Peneiras		% Passante			
Malha (mm)	Nº	Pó de brita normal	Pó de brita com lavagem	Brita 0	Brita 1
25	1"	100,00	100,00	100,00	100,00
19	3/4"	100,00	100,00	100,00	99,79
12,5	1/2"	100,00	100,00	99,83	41,66
9,5	3/8"	100,00	100,00	94,70	7,14
4,75	4	99,04	99,07	22,99	0,20
2	10	63,22	64,50	0,83	0,20
0,42	40	25,03	28,84	0,57	0,20
0,15	100	13,03	19,07	0,36	0,20
0,075	200	6,95	15,34	0,15	0,20
Fundo	-	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Junges (2017, p.45)

Gráfico 1 – Curva granulométrica de trabalho



Fonte: Junges (2017, p.46)

Os materiais constituintes nos montes de brita 0 , brita 1 e pó de brita , tentaram ser enquadrados dentro das faixas C do DNIT, porém, os mesmos apresentaram deficiência na quantidade de finos, sendo necessário separá-los em peneiras para que o excesso de alguns fosse desprezado.

Junges (2017) realizou o ensaio de granulometria com lavagem, onde foi possível determinar a porcentagem de material pulverulento (passante na peneira #200), a qual ficou determinada em 15%. Determinou a porcentagem de finos existente em cada diâmetro de agregados, possibilitando assim, a correção da composição dos materiais que foram utilizados para a dosagem. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição da mistura

Peneiras		Quantidade Real (g)	Quantidade Corrigida (g)
Malha (mm)	Nº		
19,1	3/4"	0,00	0,00
12,7	1/2"	330,00	330,00
9,5	3/8"	330,00	330,00
4,75	4	726,00	726,00
2	10	725,92	733,38
0,42	40	626,42	646,07
0,15	100	229,60	249,02
0,075	200	126,33	159,37
fundo	-	172,73	93,17
Cal	0,01	33,00	33,00
Total		3300,00	3300,00

Fonte: Junges (2017, p.47)

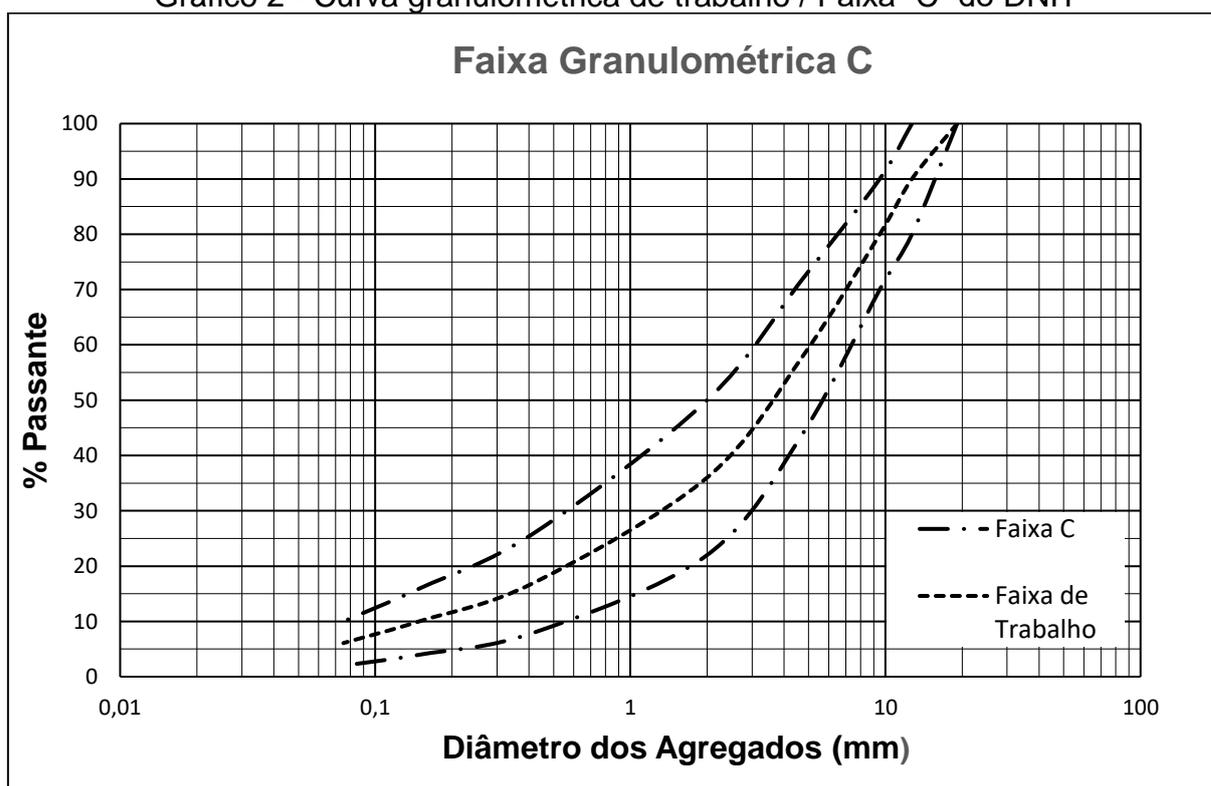
Devido à deficiência de finos e para facilitar o enquadramento nas faixas granulométricas do DNIT, adicionou-se 1,0% de cal hidratada CH-II de origem dolomítica. A composição da mistura pode ser analisada conforme a Figura 8. O Gráfico 2 apresenta a curva granulométrica de trabalho, enquadrado na faixa C do DNIT.

Figura 8 – Composição da mistura



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 2 - Curva granulométrica de trabalho / Faixa "C" do DNIT



Fonte: Junges (2017, p.48)

3.1.2 Borracha moída de Pneu

A borracha moída utilizada nessa pesquisa foi fornecida pela INDIBA - Industrial Batistella de Artefatos de Borracha Ltda, localizada em Nova Santa Rita - RS. A

borracha é proveniente de pneus de diversos tipos de automóveis e caminhões oriundos de borracharias, prefeituras, transportadoras, etc. O processo de obtenção da borracha moída é por trituração a temperatura ambiente, com tamanhos de 2 mm a 4 mm.

O ensaio granulométrico da borracha moída foi realizado conforme a norma DNER-ME 083/98 de Análises Granulométricas, utilizando-se peneiras de malha quadrada e de aberturas regulamentadas conforme as especificações técnicas. A Tabela 5 apresenta os valores das porcentagens passantes da borracha ensaiada e a Figura 9 mostra a borracha utilizada nas misturas.

Tabela 5 – Composição da borracha

Peneiras		% Retida	% Passante
Malha (mm)	Nº		
4,75	4	0,00	100,00
2	10	92,53	7,47
0,42	40	7,47	0,00
0,15	100	0,00	0,00
0,075	200	0,00	0,00
Fundo	-	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Figura 9 – Borracha moída utilizada nas misturas



Fonte: Elaboração própria

A determinação da densidade específica da borracha foi realizada conforme o método apresentado pela norma ABNT NBR 15619. Para a realização do ensaio, primeiramente calibrou-se o frasco kitasato de 2500 ml com água a temperatura de 25 °C, determinando-se “B”. Depois, colocou-se uma quantidade de borracha moída, denominada de “A” e foi preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique coberta, é então aplicada uma pressão de vácuo no recipiente, por um período de 15 minutos. Em seguida, completa-se o recipiente com água. O conjunto recipiente, água e borracha foi pesado, determinando-se “C”. A Figura 10 mostra o procedimento realizado para determinação da densidade da borracha e o Quadro 3 os valores obtidos.

Figura 10 – Procedimento realizado para determinação da densidade da borracha



Fonte: Elaboração própria

Através da equação 1, calculou-se a densidade específica:

$$\rho = \frac{A}{A+B-C} \times 0,9971 \quad \dots(1)$$

Quadro 3 – Densidade específica da borracha moída

A = massa da amostra seca em ar (g)	100,1
B = massa do recipiente com volume completo com água (g)	4800
C = massa do recipiente + amostra submersa em água (g)	4805,7
ρ = Densidade específica (g/cm³)	1,06

Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Ligante Asfáltico

O ligante utilizado na mistura foi o CAP 50/70, produzido na refinaria Alberto Pasqualini em Canoas (RS). Esse tipo de ligante asfáltico é comumente utilizado em obras de pavimentação do Rio Grande do Sul. As propriedades físico-químicas do ligante estão apresentadas na Tabela 6 e a Figura 11 é a representação de uma amostra de ligante asfáltico que foi utilizado nas misturas.

Tabela 6 - Propriedades físico-químicas do CAP 50/70

Propriedade	Unidade	Norma	CAP 50/70	
			Especificações	Resultado
Penetração	0,1 mm	NBR 6576	50 a 70	70
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	46 min	49
Viscosidade Brookfield 135 °C	cp	NBR 15184	274 min	333
Viscosidade Brookfield 150 °C	cp	NBR 15184	112 min	138
Viscosidade Brookfield 177 °C	cp	NBR 15184	57 a 285 min	68
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	235 min	334
Densidade Relativa		NBR 6296		1,000

Fonte: Boeira (2016, p. 64)

Figura 11 – Ligante Asfáltico utilizado na mistura

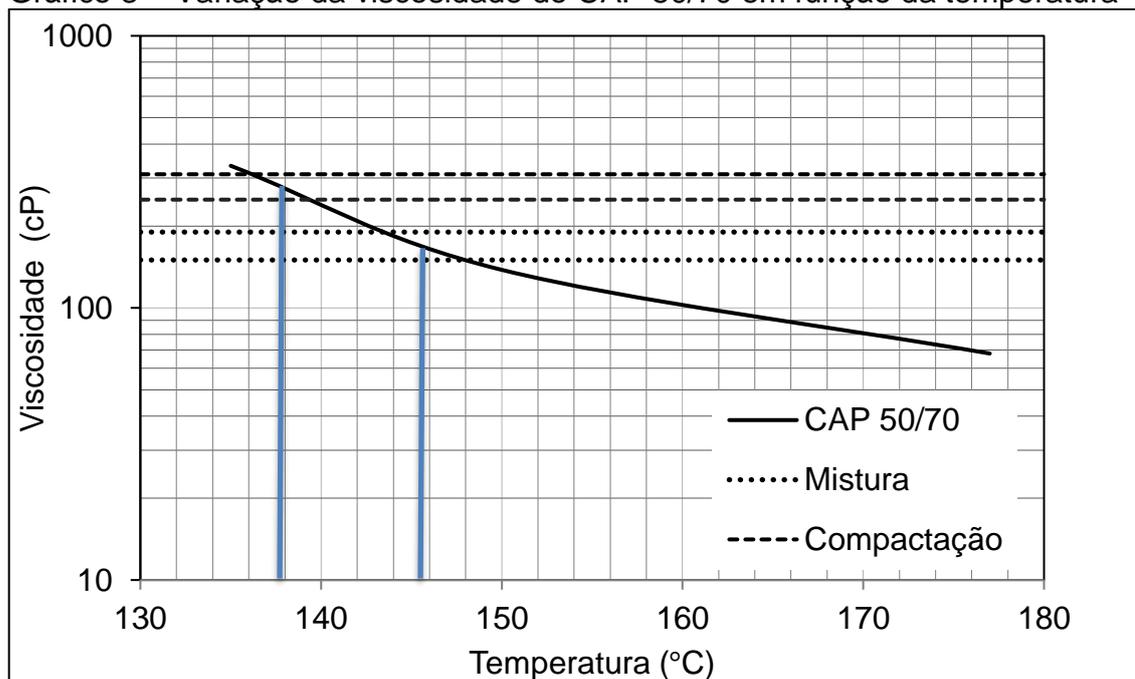


Fonte: Elaboração própria

O ensaio de viscosidade do ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi realizado com viscosímetro Brookfield, que permite medir as propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e à estocagem (ABNT NBR 15184).

Para a análise do material, o ensaio de viscosidade foi realizado no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Com esse ensaio, determinou-se as temperaturas para mistura e compactação do ligante. O Gráfico 3 demonstra a variação da viscosidade em função da temperatura para o CAP 50/70.

Gráfico 3 – Variação da viscosidade do CAP 50/70 em função da temperatura



Fonte: Elaboração própria

A temperatura adotada a partir dos resultados obtidos por Boeira (2016) foram de 146 °C para a mistura e 138 °C para a compactação. A norma DNIT ES031/06, sugere que a temperatura do agregado fique aproximadamente de 10 a 15°C a mais que a temperatura do ligante. Assim, a temperatura adotada para o agregado foi de 156 °C.

3.2 Misturas asfálticas

Neste item são descritos os métodos utilizados para composição e dosagem das misturas asfálticas, bem como os procedimentos utilizados para determinar a massa específica aparente, massa específica máxima e volume de vazios.

3.2.1 Composição Granulométrica das Misturas

A incorporação da borracha foi feita considerando-a como mais um agregado da mistura, substituindo parte do agregado miúdo (pó de pedra) na mesma proporção da adição de borracha, não levando em conta a diferença de densidade uma vez que se procurou incorporar a borracha mantendo-se o mesmo arranjo granulométrico da dosagem referência. A granulometria da mistura agregado com a borracha adicionada manteve o mesmo enquadramento na faixa “C” do DNIT.

A Tabela 8 apresenta a composição granulométrica da mistura referência e das misturas experimentais com 1%, 3% e 5% de borracha.

Tabela 7 – Composição granulométrica das misturas

Peneiras	Mistura Referência	Mistura experimental					
		1% borracha		3% borracha		5% borracha	
Nº	Agregado (g)	Agregado (g)	Borracha (g)	Agregado (g)	Borracha (g)	Agregado (g)	Borracha (g)
3/4"	0,00	0,00		0,00		0,00	
1/2"	330,00	330,00		330,00		330,00	
3/8"	330,00	330,00		330,00		330,00	
4	726,00	726,00		726,00		726,00	
10	733,38	715,84	17,54	680,75	52,63	645,67	87,71
40	646,07	630,61	15,46	599,70	46,37	568,78	77,29
100	249,02	249,02		249,02		249,02	
200	159,37	159,37		159,37		159,37	
-	93,17	93,17		93,17		93,17	
1%	33,00	33,00		33,00		33,00	
Total	3300,00	3267,00	33,00	3201,00	99,00	3135,00	165,00

Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Dosagem Marshall

O método de dosagem Marshall é o procedimento mais utilizado no Brasil, em que utiliza a compactação por impacto, normatizado pela norma DNER-ME 043/95. O método consiste em moldar três corpos de prova para cada teor de ligante. Neste caso

foram moldados 45 corpos de prova, sendo 5 teores de ligante e 3 percentuais de borracha.

Os agregados e a borracha, pesados e separados para a composição de três corpos de prova foram colocados em bandejas metálicas e levados à estufa na temperatura de 156 °C, por um período de 5 horas. O ligante asfáltico inicialmente armazenado em latas metálicas, foi colocado em um outro recipiente para ser levado à estufa. O ligante foi aquecido por pelo menos 5 horas, à temperatura de 146 °C.

Os moldes utilizados na moldagem dos corpos de prova foram colocados na estufa em que estavam os recipientes com ligante, para serem aquecidos, evitando a perda de temperatura da mistura durante o processo de compactação.

Os agregados e a borracha foram retirados da estufa e imediatamente colocados no recipiente onde os materiais seriam misturados. Em seguida, foi adicionado o ligante, previamente pesado em uma balança eletrônica, nas proporções calculadas. A mistura entre agregados, borracha e ligante foi realizada manualmente, até que o ligante tivesse envolvido todo o material granular.

Para cada dosagem eram moldados três corpos de prova, assim, após a realização da mistura, separavam-se três porções de 1100 gramas que eram colocadas em recipientes de alumínio e levados para uma estufa na temperatura de 138 °C, onde permaneciam durante duas horas para simular o envelhecimento durante as fases de preparação, transporte e lançamento da mistura na pista.

A mistura era, então, colocada no molde, acomodada com uma espátula e compactada com a aplicação de 75 golpes em cada face do corpo de prova, fazendo com que os mesmos ficassem com 100mm de diâmetro e aproximadamente os corpos de prova 63,5mm de altura. Após a compactação, os corpos de prova eram deixados esfriar dentro dos moldes durante 24 horas. Por último, os corpos de prova eram desmoldados e identificados.

Depois de moldados, para a realização dos ensaios, para ter as dimensões reais de cada corpo de prova, foram medidos a altura dos corpos de prova com um paquímetro em três posições equidistantes, e para o diâmetro foram medidas três posições paralelas, adotando como altura e diâmetro a média entre os valores obtidos. Os corpos de provas foram retificados em uma das faces, visando a análises futuras quanto a obtenção de deformações por meio de imagens.

A Figura 12 apresenta a sequência das atividades para moldagem dos corpos de prova.

Figura 12 – Moldagem dos corpos de prova



a) Agregados e borracha para a mistura



b) Mistura entre agregados, borracha e ligante



c) Separação do material para um molde



d) Compactação



e) Desmoldagem



f) Medição

Fonte: Elaboração própria

3.2.2.1 Massa Específica Aparente (Gmb)

Para obtenção da massa específica aparente da mistura compactada (Gmb), conforme Bernucci *et al.* (2008), é obtida de acordo com o método da ASTM D 2726.

Para o procedimento do ensaio, os corpos de prova foram pesados, obtendo-se a massa seca (Ms), depois foram pesados imersos em água com temperatura de 25 °C, obtendo-se a massa seca submersa (M_{sssub}). Feito isso, os corpos de prova foram retirados da água, eliminando-se a água da superfície com uma toalha, pesando novamente e obtendo assim, a massa saturada (M_{ss}). A Figura 13 ilustra o procedimento realizado para determinar a massa específica aparente.

Figura 13 - Procedimento do ensaio de massa específica aparente



Fonte: Elaboração própria

Segundo esse método, obtém-se a massa específica aparente pela relação entre a massa seca do corpo de prova e a diferença da massa seca e a massa seca do corpo de prova posteriormente submerso em água. Para o cálculo foi utilizada a seguinte equação:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_{sss_{sub}}} \times 0,9971 \quad \dots(2)$$

Onde:

M_s = massa do corpo de prova seco (g);

M_{sss} = massa de corpo de prova na condição de superfície saturada seca, g;

$M_{sss_{sub}}$ = massa de corpo-de-prova compactado na condição de superfície saturada seca e posteriormente submerso em água, g;

3.2.2.2 Massa Específica Máxima (Gmm)

Para obtenção da massa específica máxima em laboratório, conforme Bernucci *et al.* (2008), é obtida de acordo com o método ABNT NBR 15619.

Para este ensaio foi preparada 15 misturas, sendo 5 teores de ligante e 3 percentuais de borracha, com o mesmo procedimento das misturas realizadas para moldagem dos corpos de prova, porém, com quantidade mínima de 1500g para cada mistura. Após deixar duas horas na estufa a mistura era destorroada, de forma a ocorrer toda a desfragmentação da amostra, e esfriada em temperatura ambiente.

Para a realização do ensaio, utilizou-se um kitasato de 2500 ml, onde o procedimento iniciou-se com calibragem do mesmo, determinando-se assim “B”. Depois, pesou-se uma quantidade da mistura (“A”), colocado dentro do kitasato e preenchido com água a temperatura de 25 °C até que toda a mistura ficou coberta. Feito isso, aplicou-se uma pressão a vácuo no recipiente por um período de 15 minutos, agitando o sistema durante a aplicação de pressão de vácuo, colaborando na expulsão do ar existente entre os agregados encobertos pelo filme de ligante. Por fim, o recipiente retorna a pressão ambiente e é completado com água e posteriormente pesado novamente (“C”).

A Figura 14 mostra a sequência realizada para determinar a massa específica máxima.

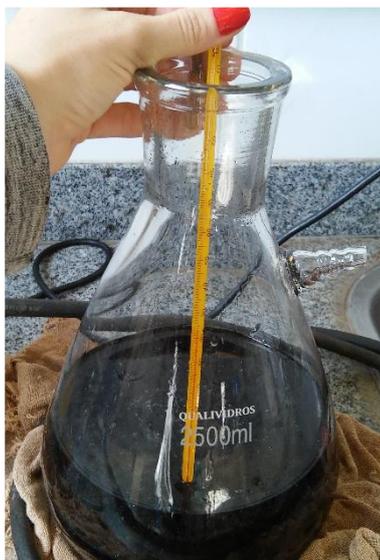
Figura 14 - Procedimento para determinação da massa específica máxima



a) Calibração kitasato



b) Preparação da amostra de mistura.



d) Ajuste da temperatura a 25 °C



c) Pesagem da amostra



e) Aplicação de vácuo



f) Pesagem final

Fonte: Elaboração própria

Para o cálculo do Gmm foi utilizada a seguinte equação:

$$Gmm = \frac{A}{A+B-C} \times 0,9971 \quad \dots(3)$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar (g);

B = massa do recipiente com volume completo de água (g);

C = massa do recipiente + amostra submersa em água (g).

3.2.2.3 Volume de Vazios

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o teor ótimo de ligante asfáltico pode estar relacionado com vários parâmetros, porém para a escolha do teor que será utilizado nas camadas de rolamento de um pavimento asfáltico é ideal que este seja baseado apenas com o volume de vazios (V_v), o qual deve corresponder a 4%. Para obtenção desse parâmetro foi utilizada a equação 4.

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad \dots(4)$$

Onde:

V_v = volume de vazios (%);

G_{mm} = massa específica máxima (g);

G_{mb} = massa específica aparente (g).

3.3 Ensaios de propriedades mecânicas da mistura asfáltica

Neste trabalho foram realizados dois ensaios mecânicos, sendo o primeiro o ensaio para obtenção do módulo de resiliência e o segundo para encontrar os valores de resistência à tração por compressão diametral. Estes ensaios foram realizados no intuito de analisar o comportamento das misturas com diferentes teores de borracha moída.

3.3.1 Módulo de Resiliência

No Brasil, esse ensaio é normatizado pelo DNIT 135/2010 - ME que estabelece os procedimentos metodológicos para determinar o valor de módulo de resiliência de misturas asfálticas e prescreve a aparelhagem usada e condições para obtenção do resultado. Para a realização do ensaio, foram utilizados os mesmos corpos de prova moldados para dosagem Marshall, uma vez que não se realizou os ensaios destrutivos da metodologia de dosagem. Os corpos de prova foram medidos e enviados ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria para serem ensaiados, onde foram primeiramente condicionados em câmara climática por 24 horas a 25 °C.

Os mesmos foram posicionados no interior do suporte da prensa em sua superfície cilíndrica, onde o pistão de carga foi assentado com o friso superior em contato com o corpo de prova e os transdutores LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) fixados e ajustados, de modo a obter o registro no microcomputador no início da escala linear dos mesmos. A Figura 15 mostra a prensa e o posicionamento do corpo de prova na prensa.

Figura 15 – Sequencia do Módulo de Resiliência



Fonte: Junges (2017)

Após realizar os ajustes dos LVDT'S, iniciou-se o ensaio com 15 pulsos com carga de aproximadamente 10% do RT cuidando o desvio padrão, para condicionamento do corpo de prova e para deforma-lo sem causar danos irreversíveis, com frequência de 1Hz sendo o tempo de carregamento de 0,1 segundos e 0,9 segundos de repouso. Posteriormente foi aplicado mais 5 pulsos de carga com mesmo valor de carregamento e frequência para obtenção do valor de Módulo de Resiliência. O ensaio foi realizado com o corpo de prova rotacionado a 0° e 90°. Com os valores obtidos, foram calculados os módulos de resiliência, através da equação 5.

$$MR = \frac{F}{\Delta * H} * (0,9976\mu + 0,2692) \quad \dots(5)$$

Onde:

F = Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova;

Δ = Deformação elástica ou resiliente;

H = Altura do corpo de prova;

μ = Coeficiente de Poisson.

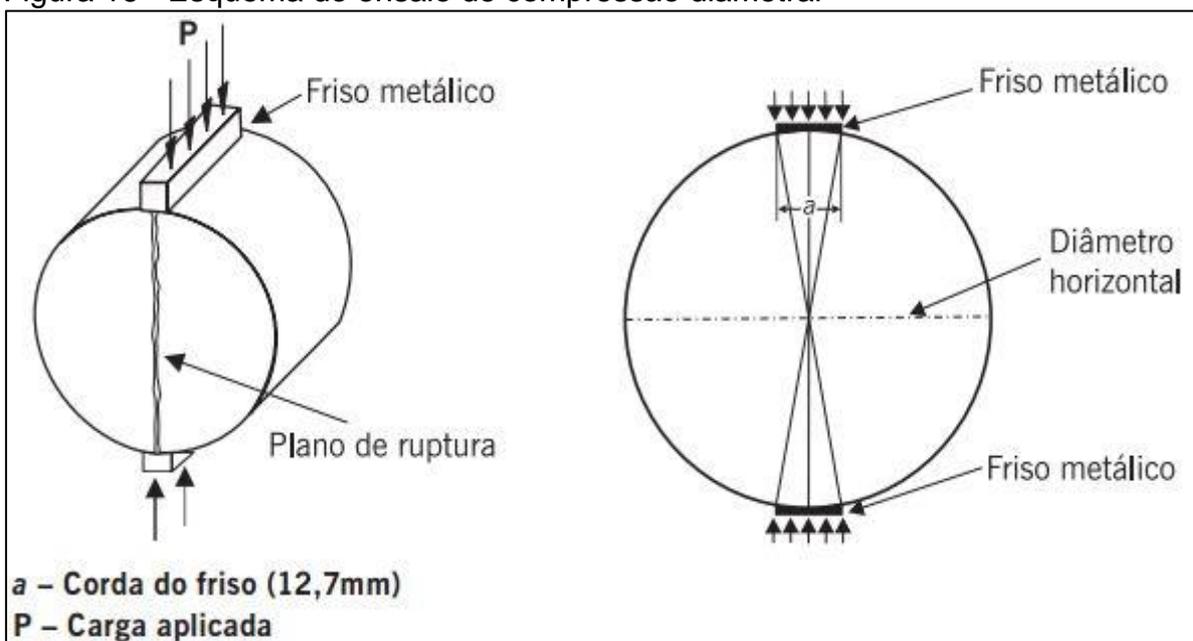
3.3.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio para aquisição dos resultados de resistência à tração por compressão diametral é normatizado pelo DNIT 136/2010 – ME.

Para Bernucci *et al.* (2008), o ensaio consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro, que geram ao longo do diâmetro solicitado tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro.

Para a realização do ensaio em misturas asfálticas é necessário posicionar o corpo de prova no equipamento com o auxílio de dois frisos metálicos com 12,7mm de espessura, sob os quais é aplicada a força. A Figura 16 apresenta uma simulação de como é o plano de ruptura por compressão diametral.

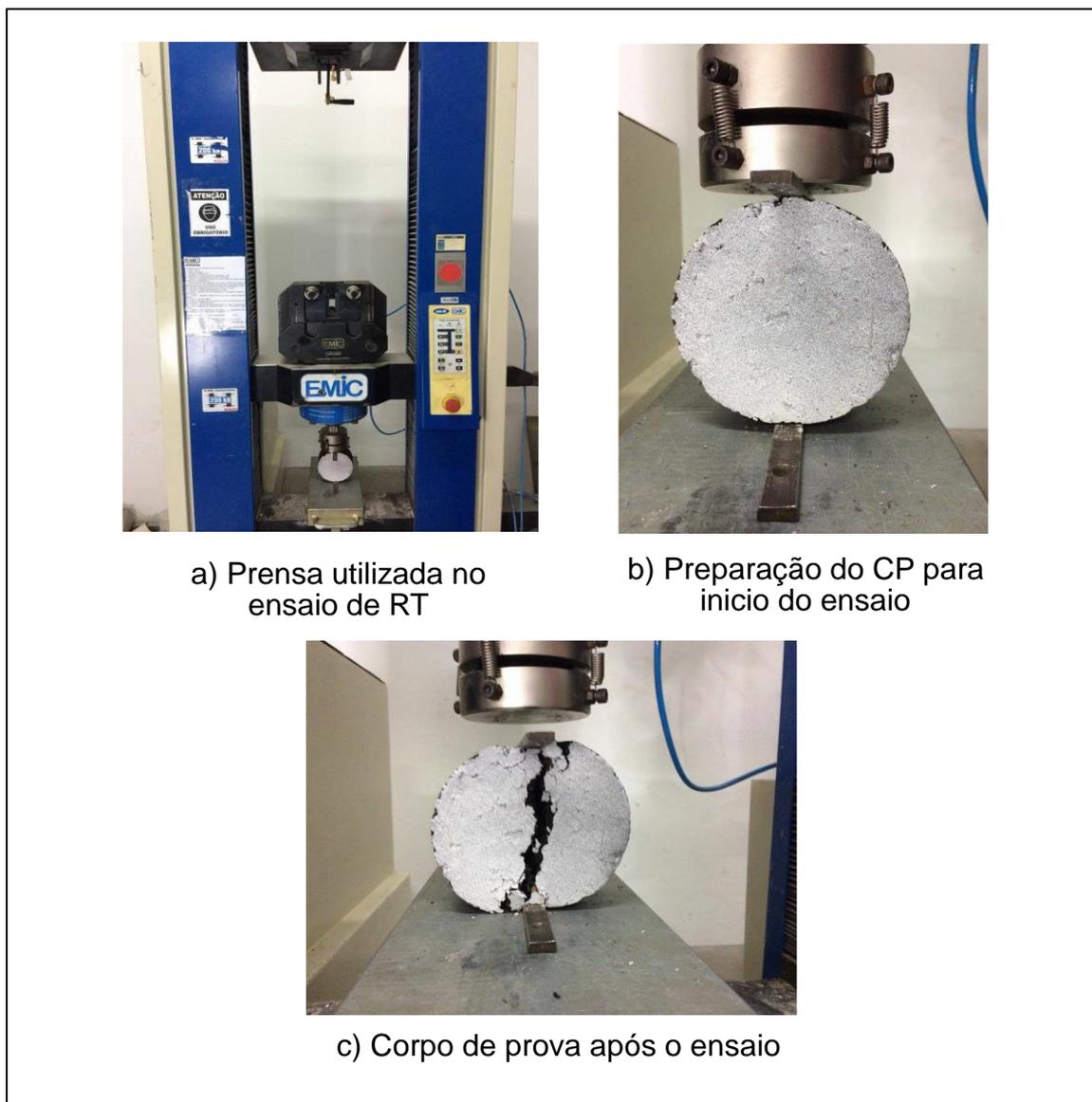
Figura 16 - Esquema do ensaio de compressão diametral



Fonte: Bernucci et al. (2008, p.309)

Para o estudo, o ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Os corpos de prova para este ensaio foram os mesmos utilizados no ensaio para o Módulo de Resiliência, isso só é possível porque o ensaio anterior é um ensaio que não causa danos no corpo de prova, podendo o mesmo ser reutilizado para coleta dos valores de Resistência a Tração por Compressão Diametral. Os mesmos foram condicionados em estufa em temperatura de 25°C por no mínimo 2 horas. Após, foram posicionados entre dois frisos metálicos de 12,7mm para que a carga fosse aplicada a uma velocidade de 0,8 mm/s até que houvesse o rompimento total do corpo de prova. A sequência do ensaio segue na Figura 17.

Figura 17 – Sequência do ensaio de RT



Fonte: Elaboração própria

O valor de resistência à tração é dado por:

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad \dots(6)$$

Onde:

RT- resistência à tração (kgf/cm²);

F - carga de ruptura (kgf);

D - diâmetro do corpo de prova (cm);

H – altura do corpo de prova (cm).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises volumétricas e dos ensaios mecânicos para aquisição dos valores de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, bem como compará-los a uma mistura convencional realizada por Junges (2017).

4.1 Caracterização Volumétrica das Misturas

Para determinar a massa específica aparente, foi utilizada a Equação 1, onde cada valor corresponde à média dos três corpos de prova ensaiados para cada teor de ligante. Para obter o valor da massa específica máxima para cada teor de ligante, foi usada a Equação 2. Após os ensaios de massa específica aparente e máxima, foi possível determinar o volume de vazios para cada uma das misturas, através da Equação 3.

Os resultados de massa específica aparente (G_{mb}), massa específica máxima (G_{mm}) e volume de vazios (V_v) para a mistura convencional e com adição de 1%, 3% e 5% de borracha, estão apresentados nas tabelas 9, 10, 11 e 12.

Tabela 8 – Volume de vazios para a mistura convencional

Teor de ligante (%)	G_{mb} (g/cm ³)	G_{mm} (g/cm ³)	V_v (%)
5,5	2,328	2,499	6,8
6	2,337	2,478	5,7
6,5	2,351	2,464	4,6
7	2,363	2,45	3,5
7,5	2,386	2,446	2,5

Fonte: Adaptada de Junges (2017, p.78)

Tabela 9 – Volume de vazios para a mistura com 1% de borracha

Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Vv (%)
5,5	2,244	2,46	8,72
6	2,276	2,46	7,42
6,5	2,307	2,45	5,66
7	2,331	2,43	4,14
7,5	2,336	2,41	3,13

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Volume de vazios para a mistura com 3% de borracha

Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Vv (%)
5,5	2,139	2,43	12,05
6	2,157	2,40	10,12
6,5	2,141	2,38	9,98
7	2,173	2,36	7,80
7,5	2,215	2,35	5,72

Fonte: Elaboração própria

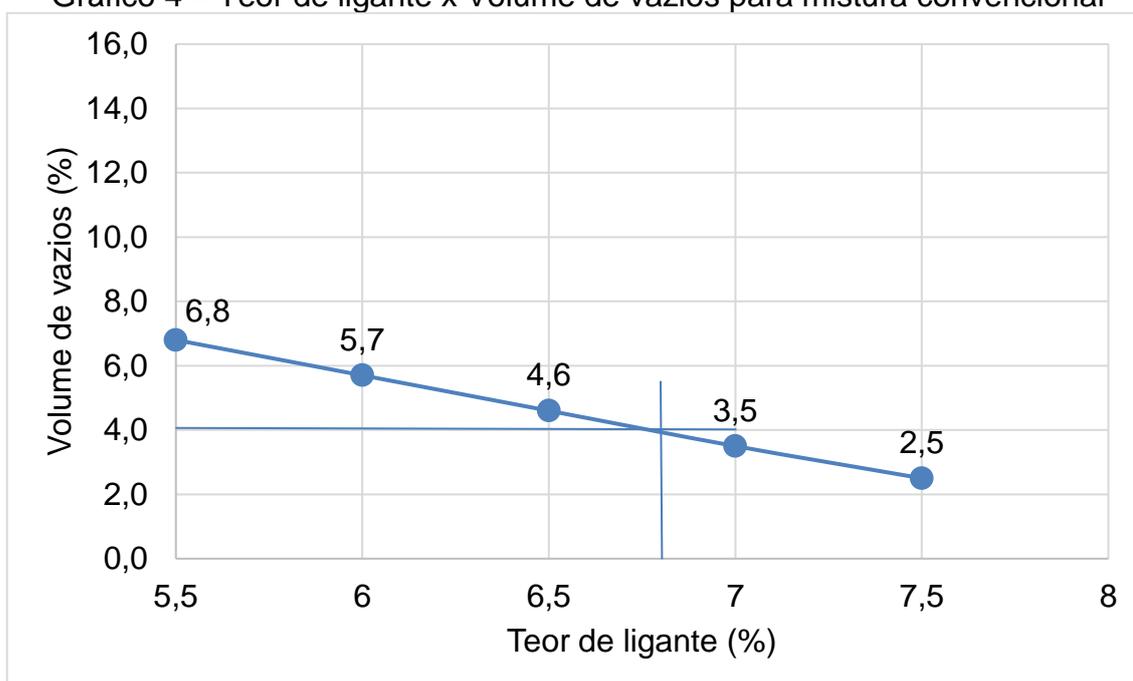
Tabela 11 – Volume de vazios para a mistura com 5% de borracha

Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Vv (%)
5,5	2,054	2,36	12,93
6	2,066	2,35	11,99
6,5	2,105	2,31	8,75
7	2,122	2,30	7,91
7,5	2,180	2,30	5,36

Fonte: Elaboração própria

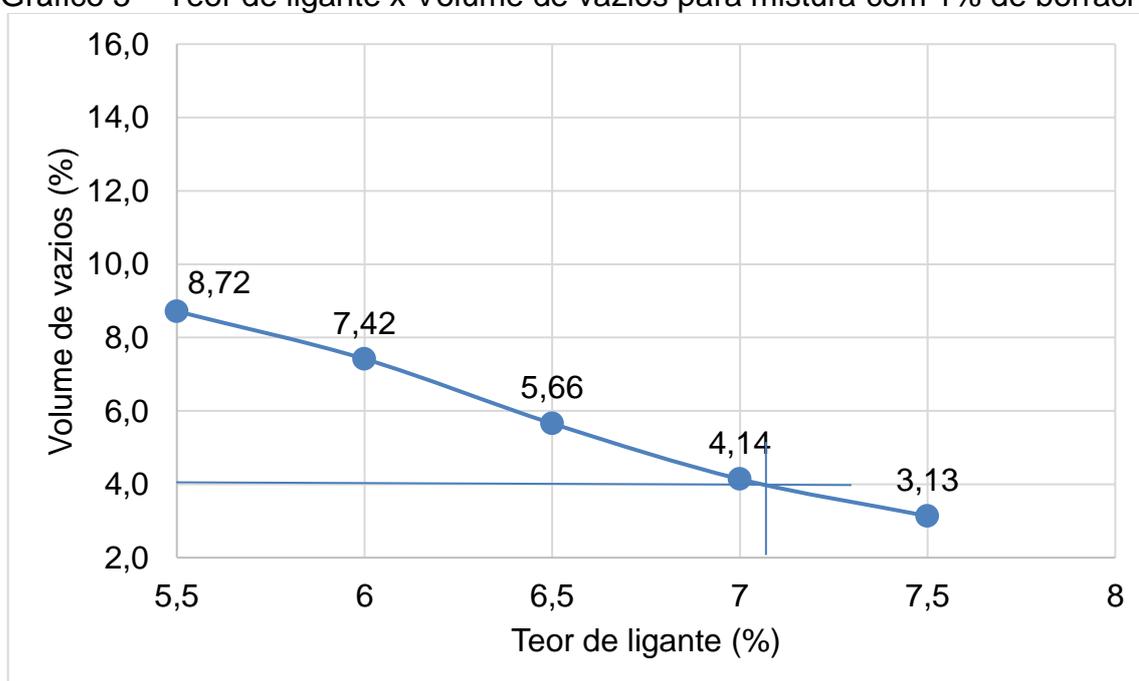
A relação de volume de vazios com teor de ligante das misturas convencionais, 1%, 3% e 5% são apresentadas nos Gráficos 4, 5, 6 e 7 respectivamente, conforme as Tabelas 9, 10, 11 e 12. Essa relação é realizada para determinar o teor de ligante ótimo das misturas.

Gráfico 4 – Teor de ligante x Volume de vazios para mistura convencional



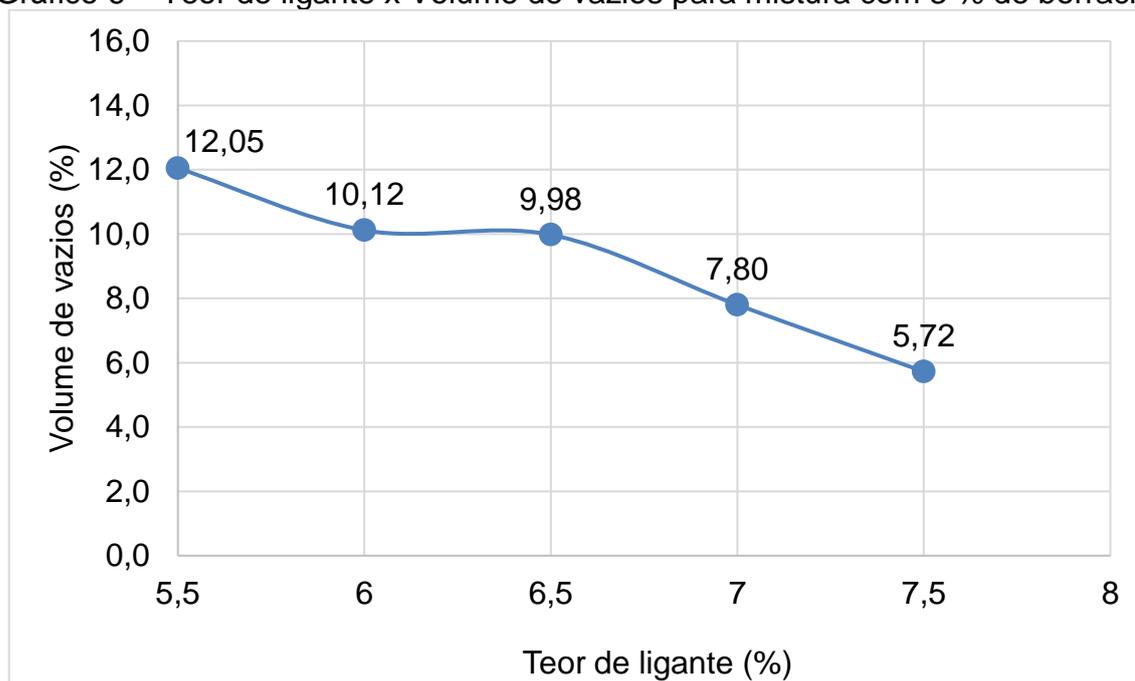
Fonte: Adaptado de Junges (2017)

Gráfico 5 – Teor de ligante x Volume de vazios para mistura com 1% de borracha



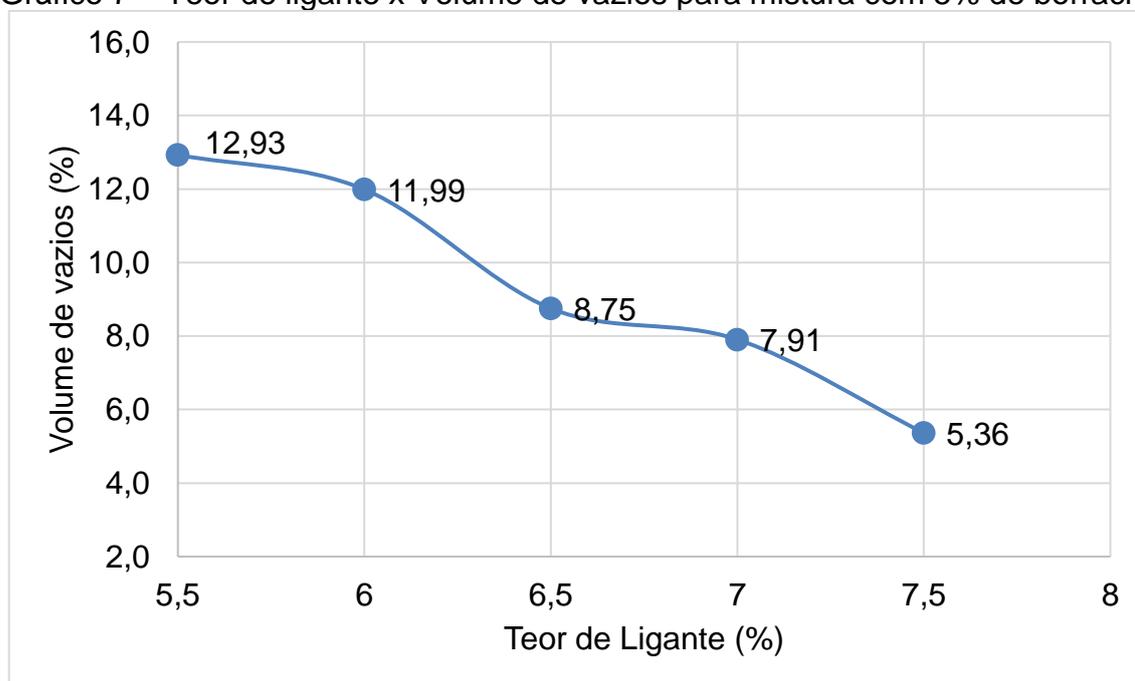
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 6 – Teor de ligante x Volume de vazios para mistura com 3 % de borracha



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 7 – Teor de ligante x Volume de vazios para mistura com 5% de borracha



Fonte: Elaboração própria

Os resultados de V_v obtidos para as três misturas experimentais foram comparadas ao resultado da mistura convencional obtido por Junges (2017). Analisando o gráfico 4, percebe-se que para a mistura convencional o teor de ligante

ótimo encontrado foi de aproximadamente 6,80%, teor de ligante que proporciona um volume de vazios igual a 4%.

Para a mistura com 1% de borracha o teor de ligante ótimo encontrado foi de aproximadamente 7,10%, e na mistura com 3% e 5% observa-se que o volume de vazios encontrado resultou em valores elevados, não se conseguindo estabelecer o teor de ligante ótimo que proporciona um volume de vazios igual a 4%. Percebe-se que quanto maior a porcentagem de borracha, maior o volume de vazios, uma vez que, quanto maior a quantidade de borracha, maior a dificuldade em compactar a mistura.

4.2 Caracterização Mecânica das Misturas

Para avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas com substituição de borracha moída, realizaram-se ensaios para obtenção dos resultados de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral com todos os corpos de provas moldados. A equação 5 foi utilizada para o cálculo desse parâmetro, os quais são apresentados nas Tabelas 12, 13, 14 e 15 para a mistura convencional e misturas com 1%, 3% e 5% respectivamente.

Tabela 12- Módulo de Resiliência da mistura convencional

Teor de ligante (%)	CP	MR (MPa)	MR (MPa)	Desvio Padrão
5,5	13	8043	8161	197,2
	14	8052		
	15	8389		
6	7	7723	7906	558,5
	8	8533		
	9	7462		
6,5	1	8977	7576	1626,1
	2	7959		
	3	5793		
7	4	6665	7385	694,1
	5	7439		
	6	8050		
7,5	10	6263	6488	349,5
	11	6891		
	12	6311		

Fonte: Adaptado de Junges (2017)

Tabela 13 – Módulo de Resiliência da mistura com 1% de borracha

Teor de Ligante (%)	CP	MR (MPa)	MR (MPa)	Desvio Padrão
5,5	15	7988	4174	3306,0
	14	2111		
	13	2425		
6	12	2920	3879	1014,0
	11	3778		
	10	4940		
6,5	9	2751	2277	601,9
	8	1600		
	7	2481		
7	6	2610	3015	573,8
	5	-		
	4	3421		
7,5	3	3876	3688	1394,0
	2	4979		
	1	2210		

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 – Módulo de Resiliência da mistura com 3% de borracha

Teor de Ligante (%)	CP	MR (MPa)	MR (MPa)	Desvio Padrão
5,5	15	3394	3057	757,8
	14	3588		
	13	2189		
6	12	4530	3991	828,9
	11	4407		
	10	3037		
6,5	9	1655	2924	1795,0
	8	4193		
	7	-		
7	6	1327	1513	169,2
	5	1555		
	4	1657		
7,5	3	1885	2200	685,1
	2	1730		
	1	2986		

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 – Módulo de Resiliência da mistura com 5% de borracha

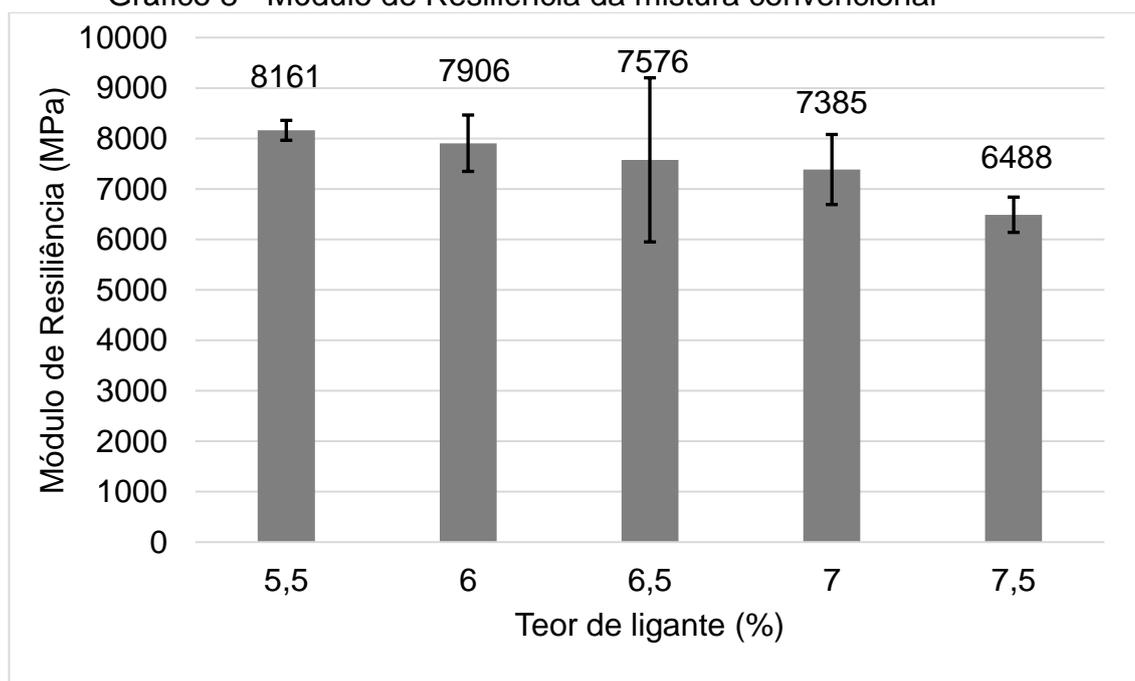
Teor de Ligante (%)	CP	MR (MPa)	MR (MPa)	Desvio Padrão
5,5	15	2540	3338	858,2
	14	2789		
	13	4135		
6	12	2526	2310	898,6
	11	1324		
	10	3082		
6,5	9	1286	1440	302,6
	8	1247		
	7	1789		
7	6	3324	2421	833,7
	5	2257		
	4	1681		
7,5	3	4372	4425	2793,9
	2	1658		
	1	7245		

Fonte: Elaboração própria

Os Gráficos 8, 9, 10 e 11 apresentam os dados das tabelas 12, 13, 14 e 15, onde relaciona o módulo de resiliência com os teores de ligante para cada mistura.

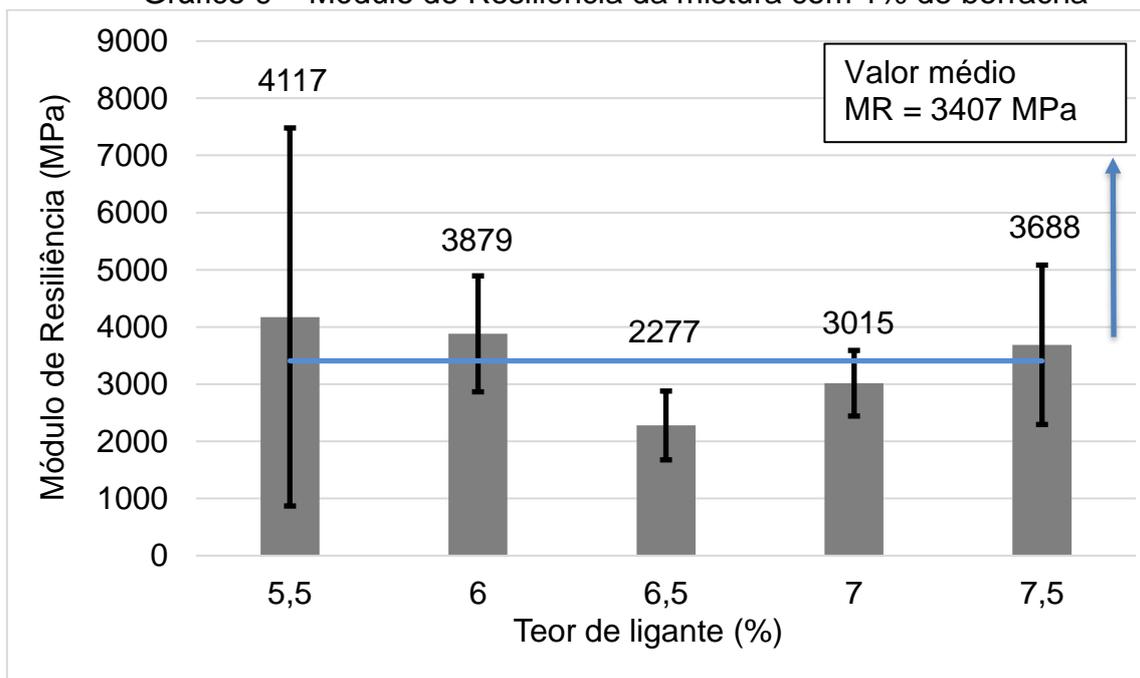
Para cada uma das médias dos gráficos, adicionou-se uma barra de erros, com os desvios padrão. Estes valores mostram a dispersão dos resultados encontrados.

Gráfico 8 - Módulo de Resiliência da mistura convencional



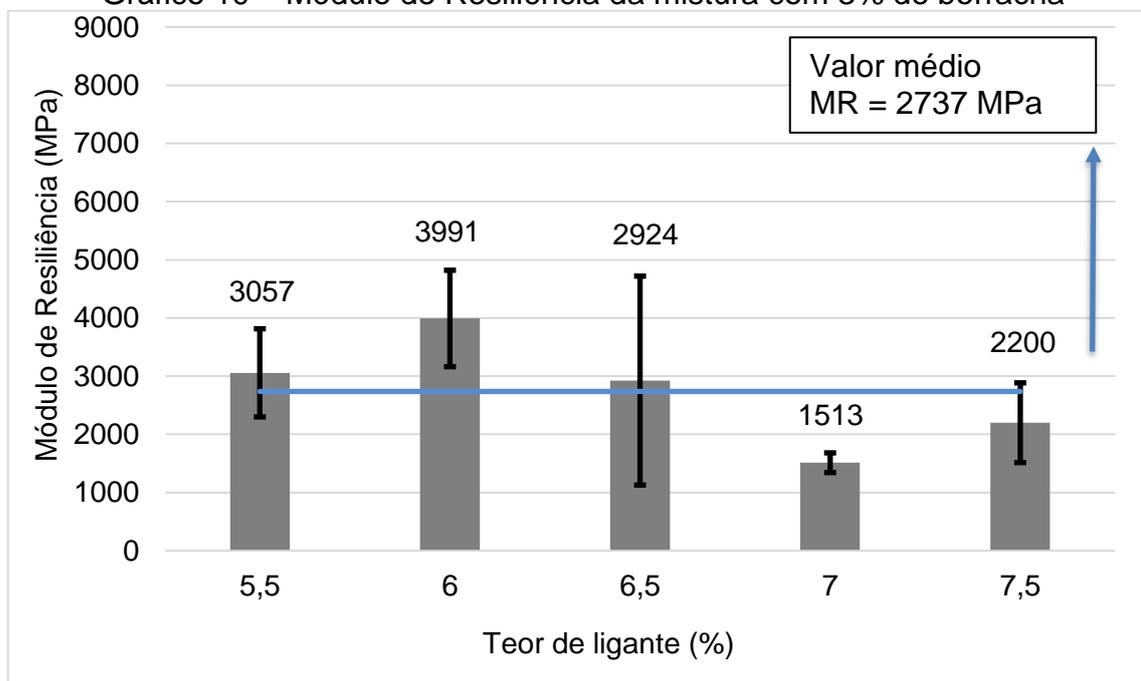
Fonte: Adaptado de Junges (2017)

Gráfico 9 – Módulo de Resiliência da mistura com 1% de borracha



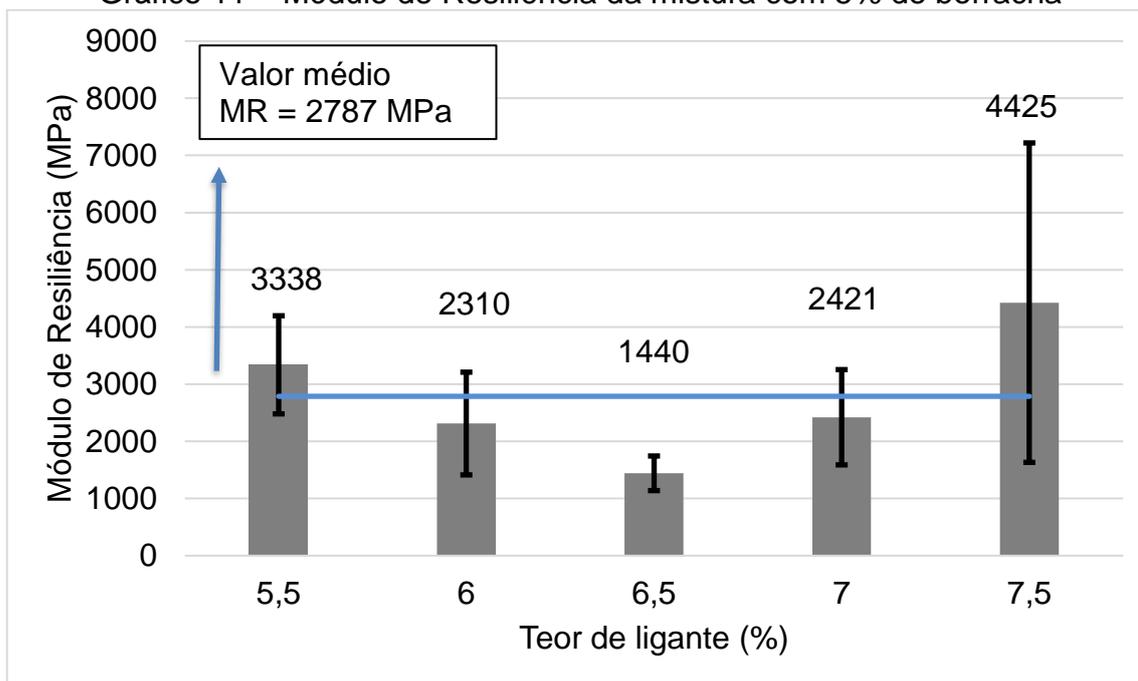
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 10 – Módulo de Resiliência da mistura com 3% de borracha



Fonte: Elaboração própria

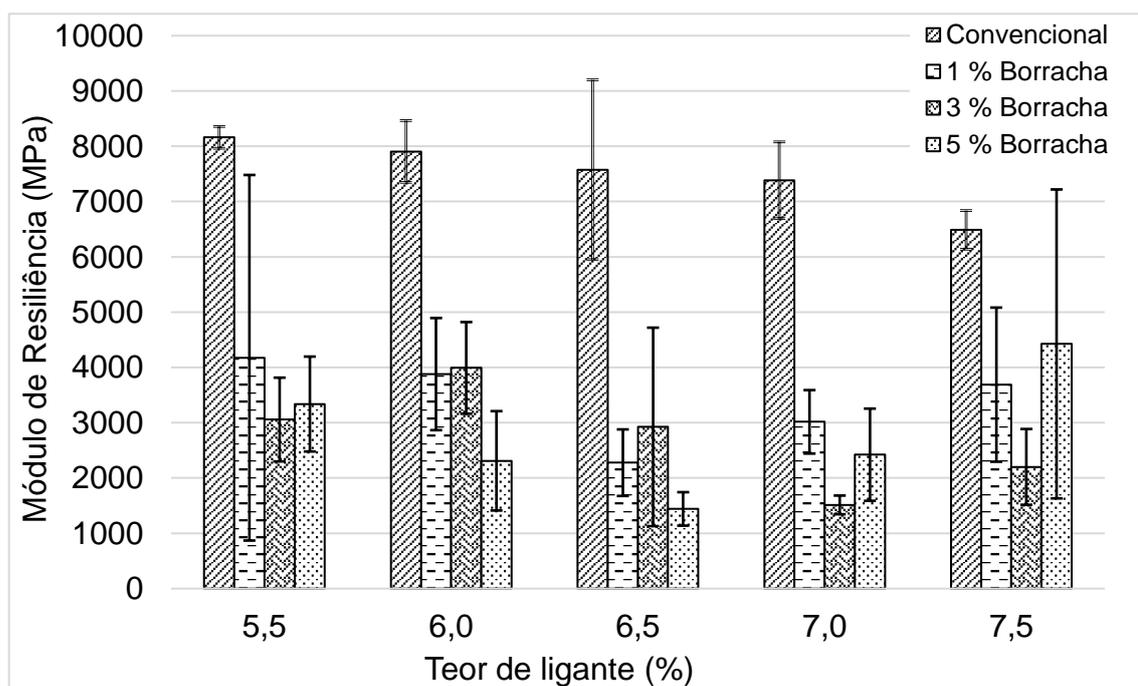
Gráfico 11 – Módulo de Resiliência da mistura com 5% de borracha



Fonte: Elaboração própria

Para tentar facilitar a visualização e comparação entre as diferentes misturas o Gráfico 12 apresenta os módulos de resiliências das misturas asfálticas.

Gráfico 12 - Módulo de Resiliência das misturas.



Fonte: Elaboração própria

Analisando o Gráficos 12 de módulo de resiliência, todas as misturas apresentam variação de MR, mostrando que o aumento da quantidade de incorporação de borracha nas misturas experimentais faz com que a média do MR diminua, isso acontece porque a borracha é elástica e apresenta uma deformação maior, fazendo com que os valores de MR reduzam. Em relação ao teor de ligante era esperado que quanto maior o teor de ligante, menor o MR das misturas, porém não foi o que aconteceu nas misturas experimentais.

A mistura com 1% de borracha e 7% de teor de ligante apresentou um MR de 3015,8 Mpa, esse valor é próximo, ao encontrado por Specht (2002) de 3120,0 MPa, para um mesmo teor de borracha e um teor de ligante de 6,6%. Fazendo uma comparação aos valores de módulo de resiliência da mistura convencional estudada por Junges (2017) com as misturas experimentais, percebe-se que a incorporação de borracha diminui a rigidez da mistura asfáltica.

As Tabelas 16, 17, 18 e 19 apresentam os valores encontrados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, da mistura convencional e das misturas com 1%, 3% e 5% respectivamente, são mostrados os valores de RT para cada corpo de prova, a média dos três corpos de prova para cada teor de ligante e o desvio padrão.

Tabela 16 - RT da mistura convencional

Teor de Ligante (%)	CP	RT (MPa)	RT (MPa)	Desvio Padrão
5,5	13	1,21	1,25	0,139
	14	1,40		
	15	1,13		
6	7	1,40	1,28	0,172
	8	1,08		
	9	1,35		
6,5	1	1,22	1,33	0,163
	2	1,26		
	3	1,52		
7	4	1,36	1,29	0,151
	5	1,40		
	6	1,12		
7,5	10	1,57	1,42	0,155
	11	1,42		
	12	1,26		

Fonte: Adaptado de Junges (2017)

Tabela 17 – RT da mistura com 1% de borracha

Teor de Ligante (%)	CP	RT (MPa)	RT (MPa)	Desvio Padrão
5,5	15	0,69	0,64	0,046
	14	0,61		
	13	0,62		
6	12	0,74	0,75	0,026
	11	0,77		
	10	0,72		
6,5	9	0,79	0,77	0,027
	8	0,74		
	7	0,77		
7	6	0,87	0,85	0,026
	5	-		
	4	0,83		
7,5	3	0,90	0,87	0,047
	2	0,89		
	1	0,82		

Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 – RT da mistura com 3% de borracha

Teor de Ligante (%)	CP	RT (MPa)	RT (MPa)	Desvio Padrão
5,5	15	0,48	0,49	0,025
	14	0,46		
	13	0,51		
6	12	0,48	0,53	0,051
	11	0,58		
	10	0,53		
6,5	9	0,53	0,54	0,017
	8	0,55		
	7	-		
7	6	0,55	0,55	0,021
	5	0,57		
	4	0,53		
7,5	3	0,60	0,61	0,038
	2	0,58		
	1	0,66		

Fonte: Elaboração própria

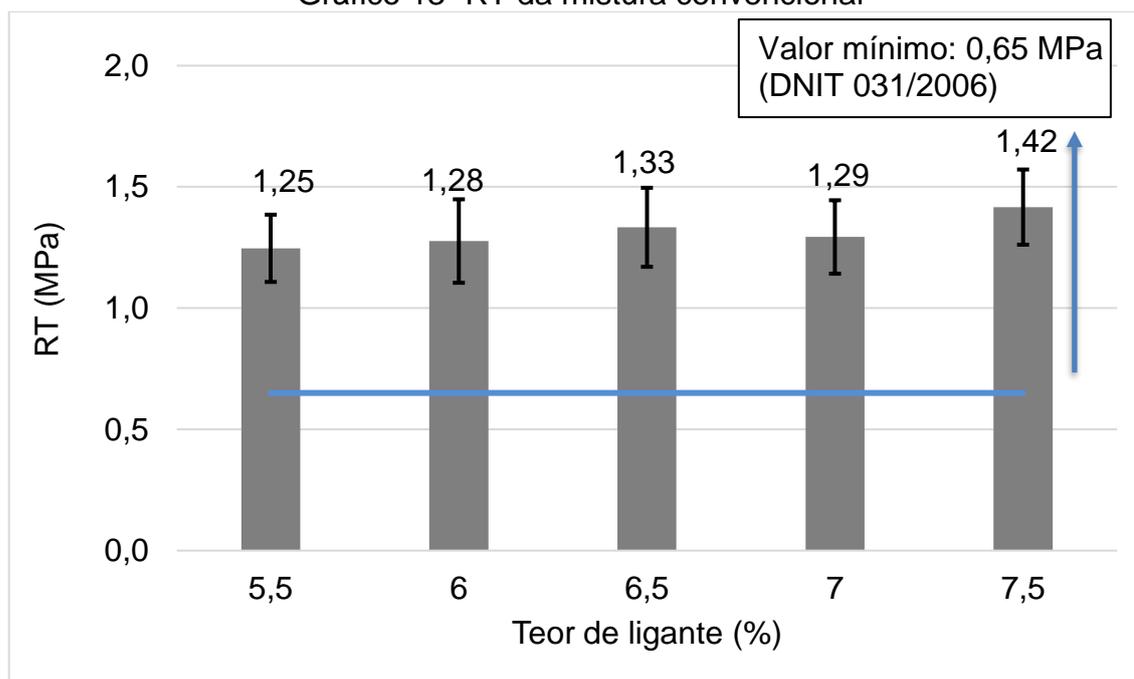
Tabela 19 – RT da mistura com 5% de borracha

Teor de Ligante (%)	CP	RT (MPa)	RT (MPa)	Desvio Padrão
5,5	15	0,31	0,33	0,042
	14	0,29		
	13	0,37		
6	12	0,40	0,40	0,002
	11	0,39		
	10	0,40		
6,5	9	0,49	0,46	0,033
	8	0,43		
	7	0,48		
7	6	0,52	0,52	0,004
	5	0,52		
	4	0,53		
7,5	3	0,53	0,59	0,063
	2	0,65		
	1	0,60		

Fonte: Elaboração própria

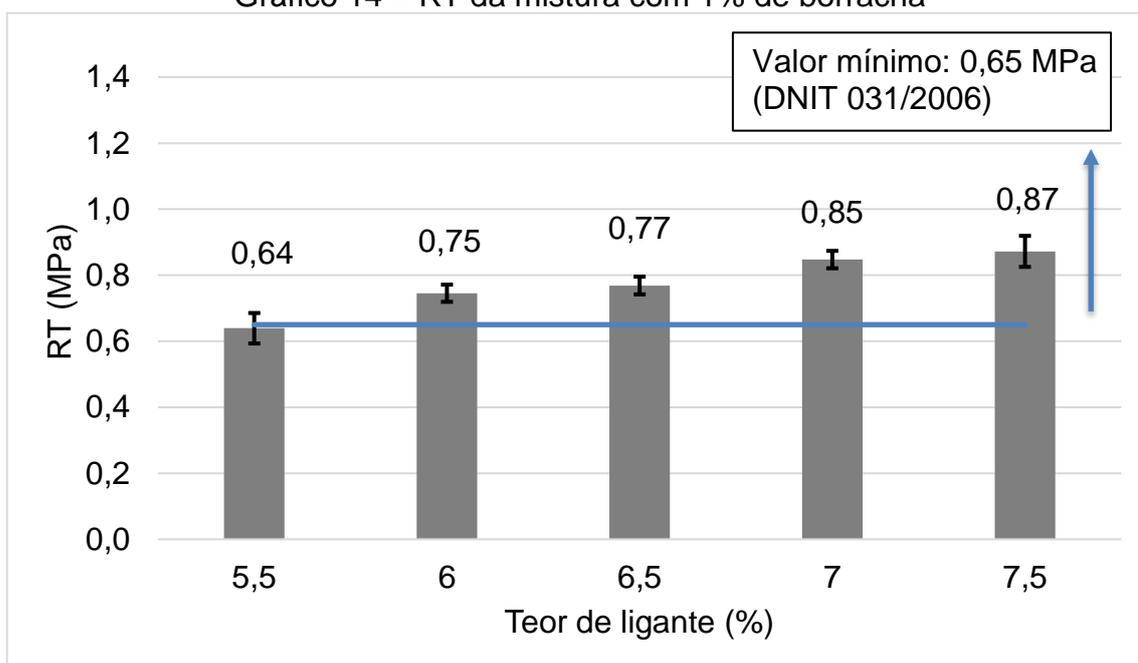
Os gráficos 13, 14, 15 e 16 retratam os dados das tabelas 16, 17, 18 e 19 respectivamente, relacionando a média do valor de RT com o teor de ligante correspondente para cada mistura. Como realizado para o módulo de resiliência, também considerou a dispersão dos valores encontrados, adicionando uma barra de erros nos gráficos, com os desvios padrão.

Gráfico 13- RT da mistura convencional



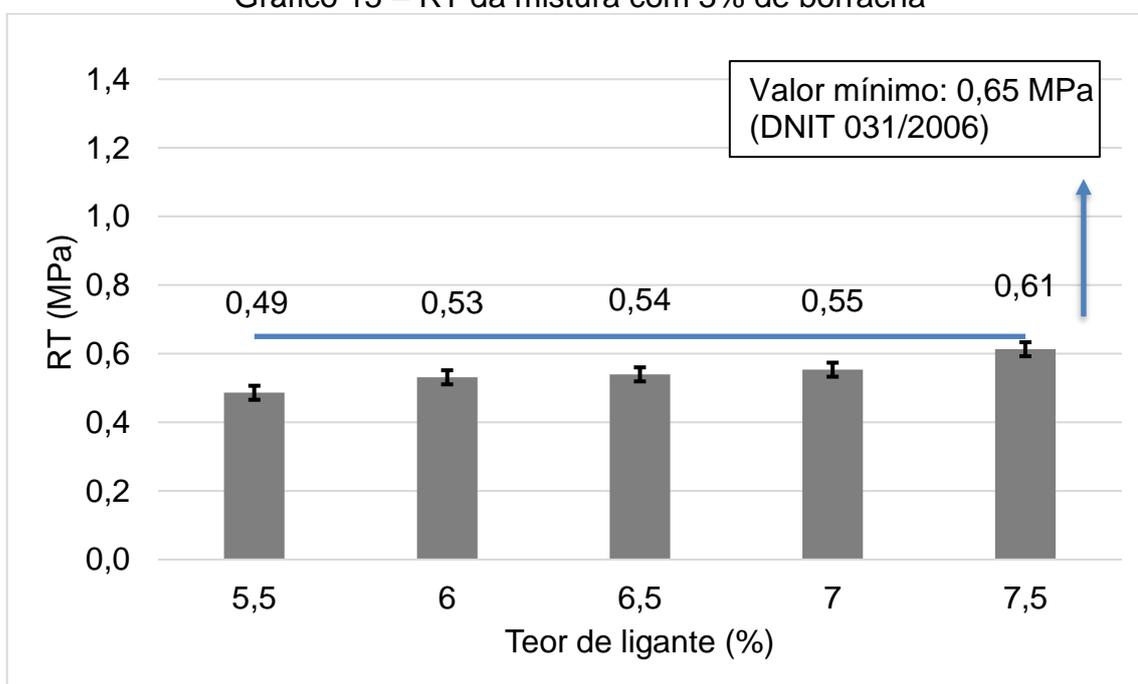
Fonte: Adaptado de Junges (2017)

Gráfico 14 – RT da mistura com 1% de borracha



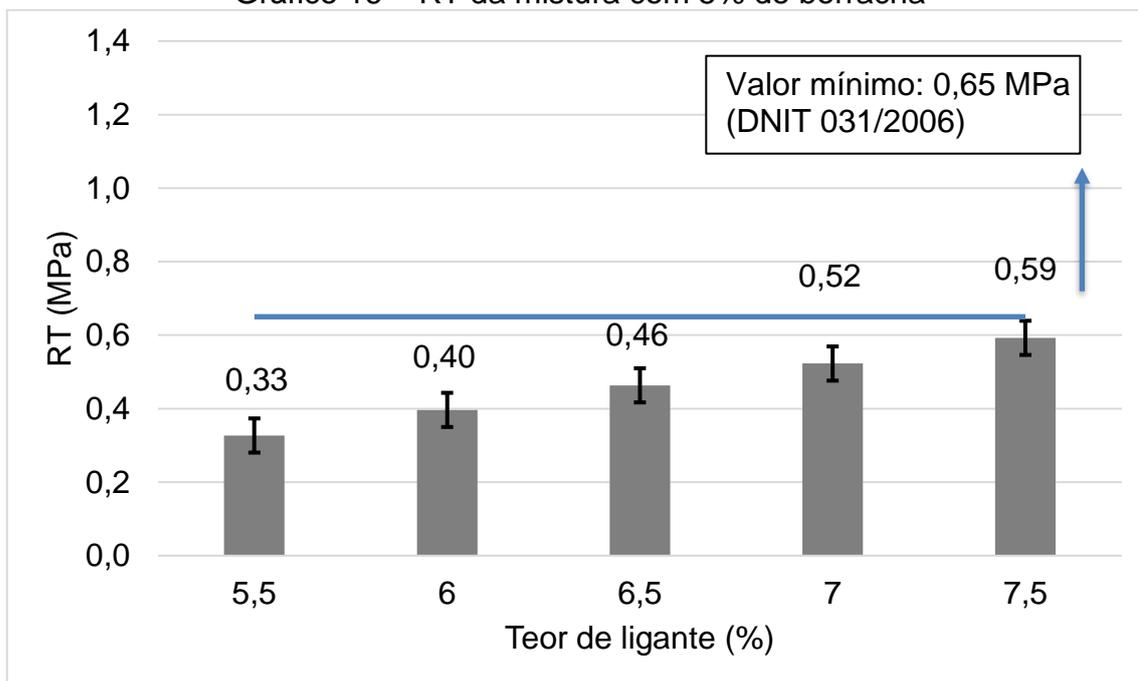
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 15 – RT da mistura com 3% de borracha



Fonte: Elaboração própria

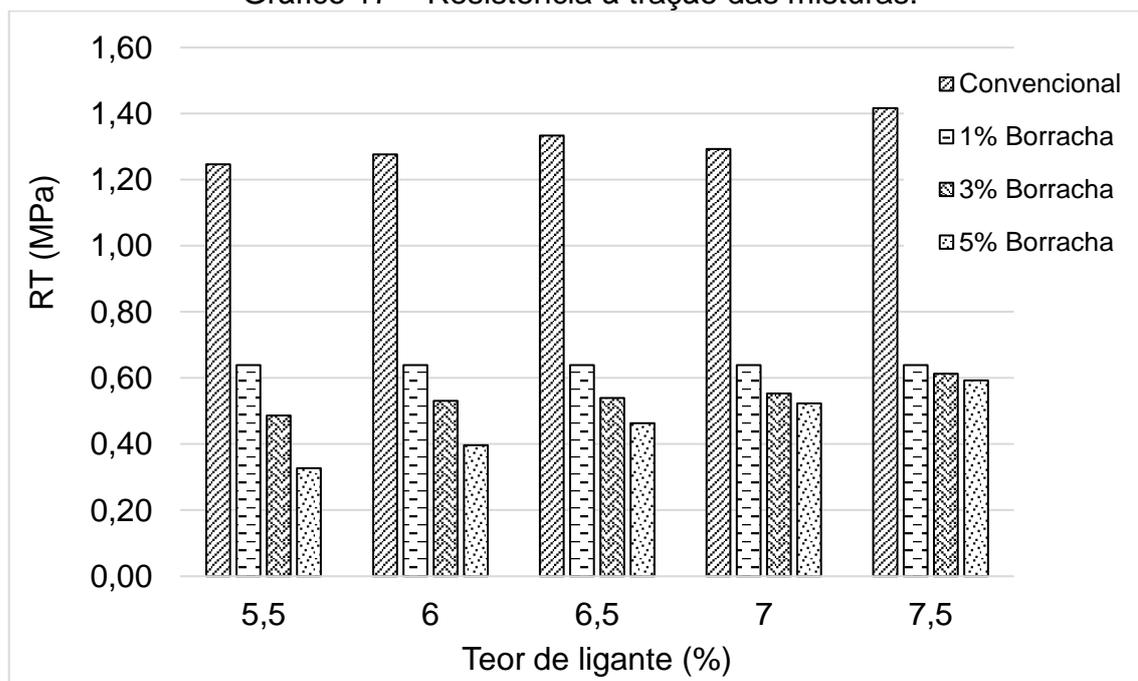
Gráfico 16 – RT da mistura com 5% de borracha



Fonte: Elaboração própria

Para tentar facilitar a visualização e comparação entre as diferentes misturas o Gráfico 17 apresenta as resistências à tração das misturas asfálticas.

Gráfico 17 – Resistência à tração das misturas.



Fonte: Elaboração própria

De acordo com as normativas estabelecidas pelo DNIT 031/2006 os valores de RT encontrados no ensaio não deveriam ser inferiores a 0,65 Mpa, para uma temperatura a 25 °C e volume de vazios igual a 4%.

No projeto de mistura com 1% de borracha, que pode ser observado no Gráfico 14, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com todos os teores de ligante, porém o valor encontra-se entre 0,85 e 0,87 Mpa, o qual corresponde ao teor ótimo de projeto desta mistura. Em todos os teores analisados, pode se observar que com o teor de ligante de 5,5% o valor de RT foi inferior ao recomendado por norma, o mesmo explica-se pelo fato de que o teor de ligante na amostra era muito baixo, não permitindo aderência entre todos os materiais que compõe a matriz da mistura.

No caso da mistura com 3% e 5% de borracha (gráficos 15 e 16), conforme os resultados encontrados, as misturas não atenderam o valor mínimo exigido pelo DNIT. É importante salientar que o ensaio de RT foi realizado para todos os corpos de prova, pois não foi possível determinar o teor ótimo de ligante ao volume de vazios correspondentes a 4% dessas duas misturas.

Para a pesquisa de Junges (2017) a mistura convencional apresentou valor de RT entre 1,33 e 1,29 MPa, considerando o valor correspondente ao teor ótimo de ligante. Num comparativo, a redução de RT, indica perda da capacidade estrutural das misturas com borracha. Essa perda de capacidade estrutural pode acarretar patologias inesperadas na estrutura do pavimento de forma prematura.

Outra análise que pode ser realizada é a relação MR/RT, que vem sendo usada como um indicador da vida de fadiga de misturas, uma vez que agrega informações de rigidez e resistência, sendo mais desejável um valor pequeno da razão, dado que com frequência busca-se (i) baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões, que levam ao trincamento prematuro do revestimento, e (ii) alta resistência à tração, uma vez que em geral uma maior resistência na ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga (BERNUCCI *et al.*,2008).

Porém, deve haver uma coerência nos valores de MR e RT, com valores de RT não tão baixos a ponto de perder a estabilidade de tração da mistura e nem valores muito altos de MR para que a mistura não seja flexível. A Tabela 20 representa os valores da relação MR/RT das misturas asfálticas, considerando a relação para cada

teor de ligante. Os valores de MR e RT para cada teor de ligante apresentado na tabela já representa a média dos três corpos de prova.

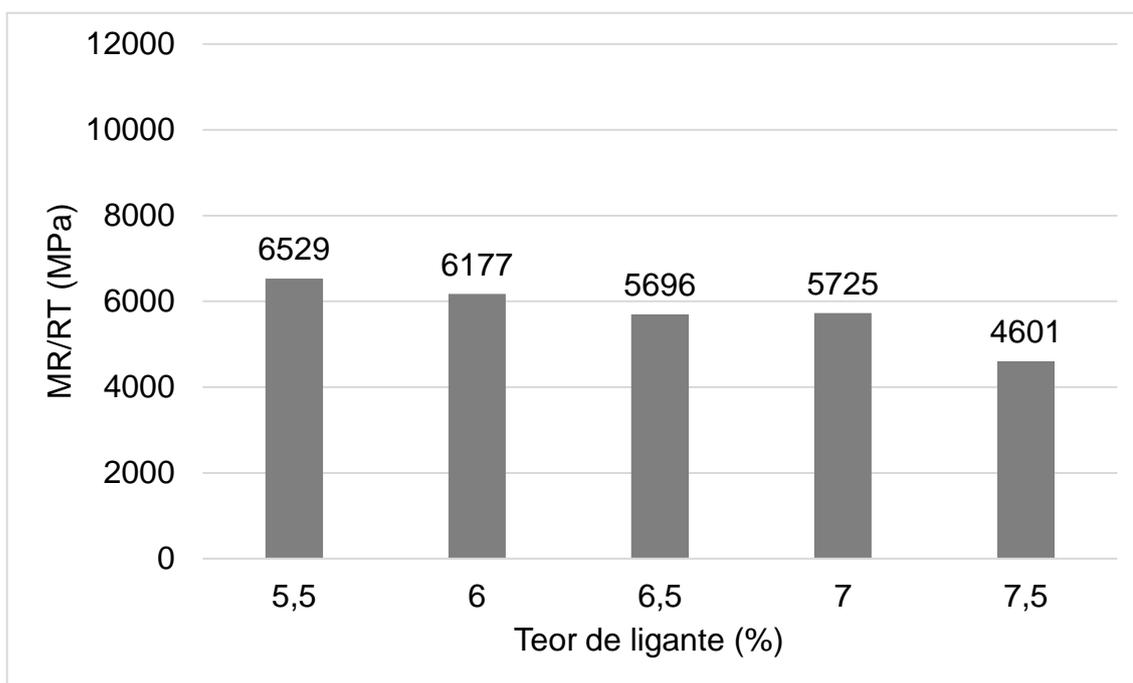
Tabela 20 – Relação MR/RT das misturas

Mistura	Teor de ligante (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT (MPa)
Convencional	5,5	8161	1,25	6529
	6	7906	1,28	6177
	6,5	7576	1,33	5696
	7	7385	1,29	5725
	7,5	6488	1,41	4601
1% borracha	5,5	4174	0,64	6530
	6	3879	0,75	5204
	6,5	2277	0,77	2962
	7	3015	0,85	3558
	7,5	3688	0,87	4229
3% borracha	5,5	3057	0,49	6290
	6	3991	0,53	7517
	6,5	2924	0,54	5420
	7	1513	0,55	2735
	7,5	2200	0,61	3590
5% borracha	5,5	3338	0,33	10212
	6	2310	0,40	5825
	6,5	1440	0,46	3107
	7	2421	0,52	4632
	7,5	4425	0,59	7467

Fonte: Elaboração própria

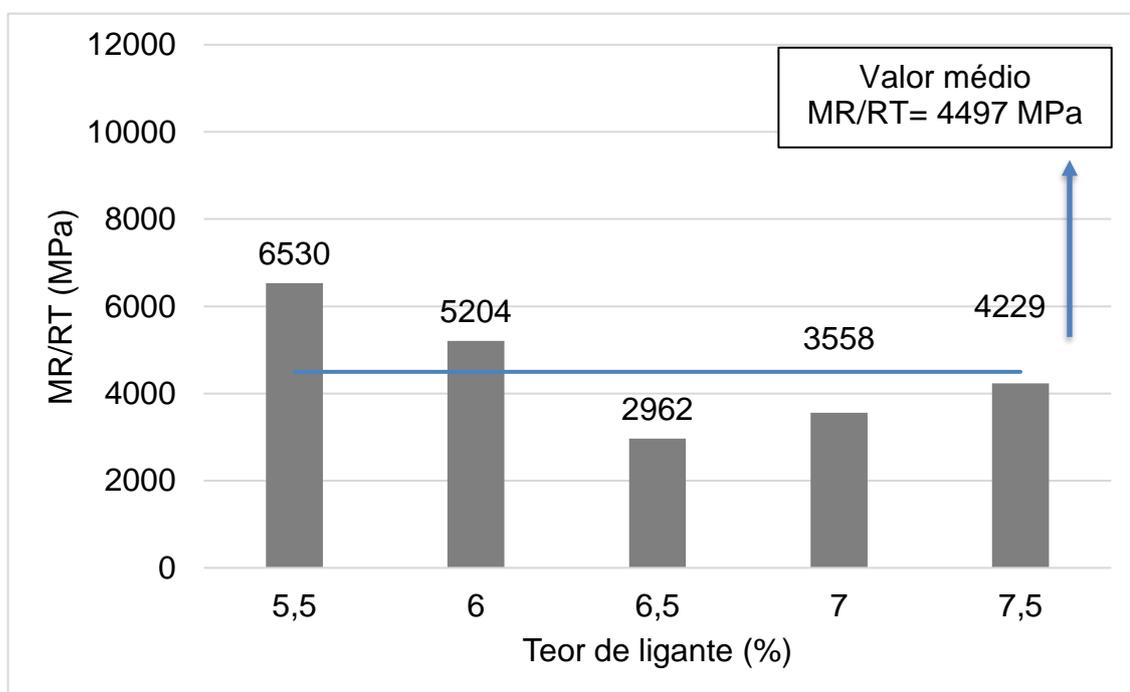
Os Gráficos 18, 19, 20 e 21 retratam os dados da Tabela 20, relacionando os valores de MR/RT com o teor de ligante para cada mistura da pesquisa.

Gráfico 18 - Relação MR/RT da mistura convencional



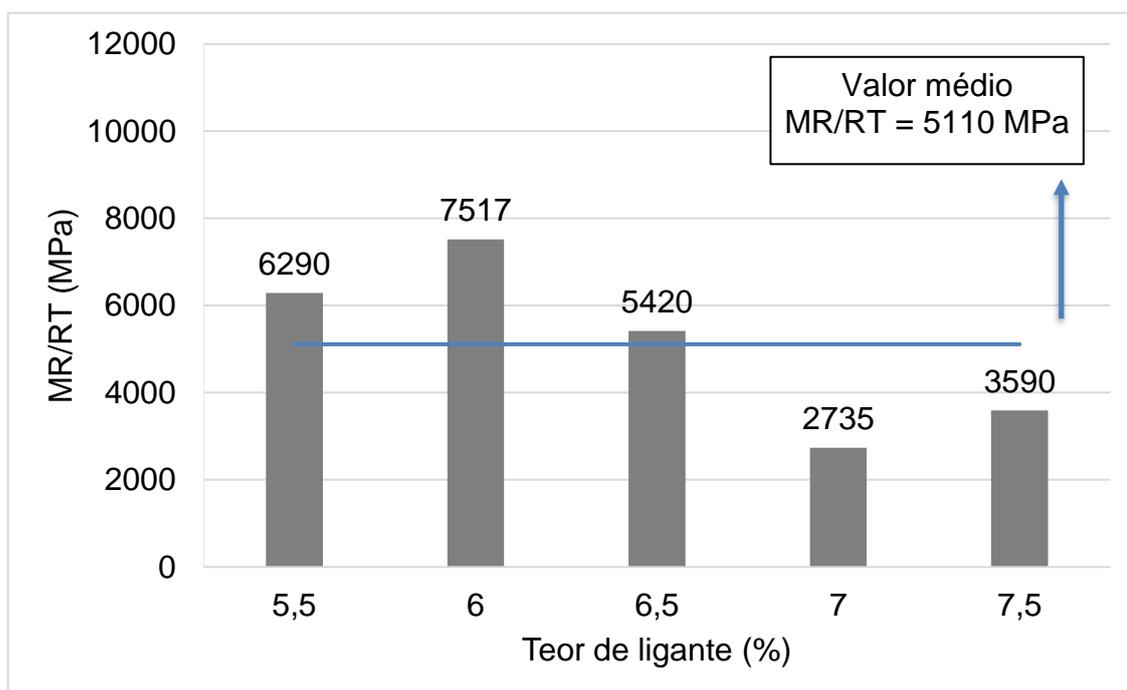
Fonte: Adaptado de Junges (2017)

Gráfico 19 – Relação MR/RT da mistura com 1% de borracha



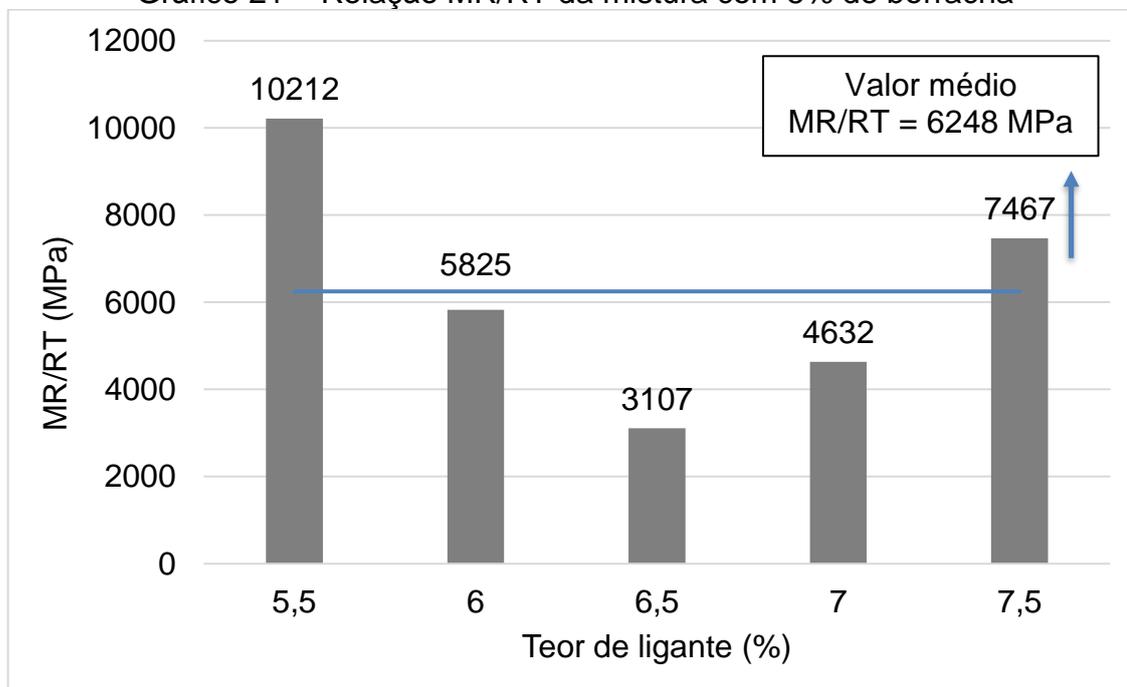
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 20 – Relação MR/RT da mistura com 3% de borracha



Fonte: Elaboração própria

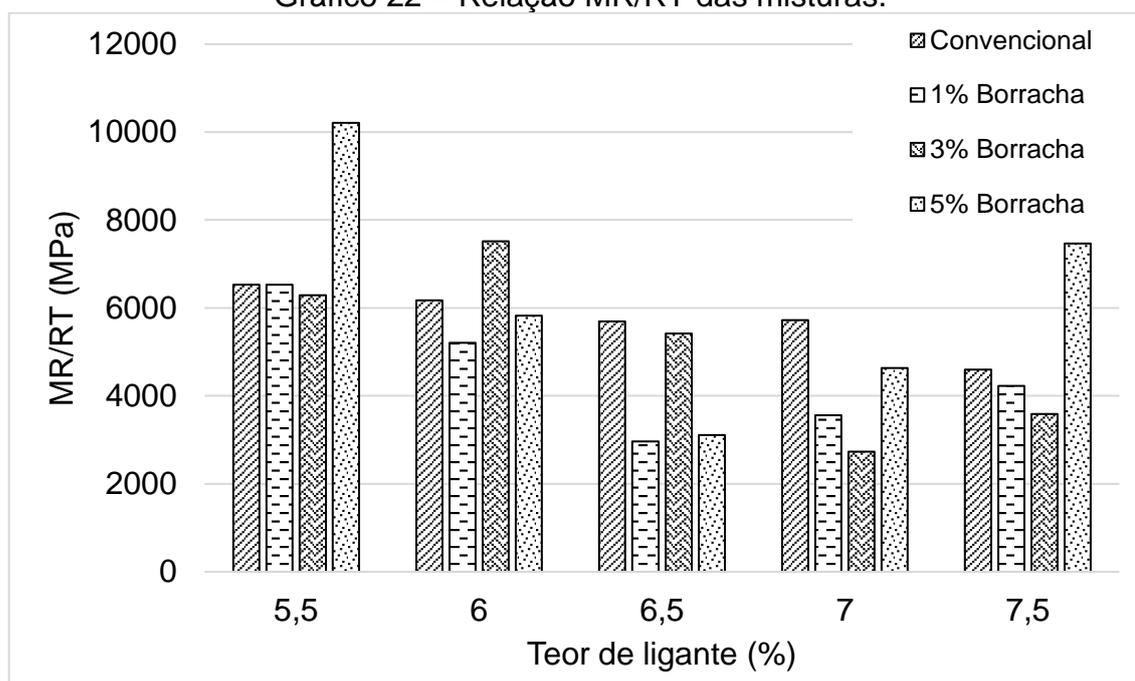
Gráfico 21 – Relação MR/RT da mistura com 5% de borracha



Fonte: Elaboração própria

Para tentar facilitar a visualização e comparação entre as diferentes misturas o Gráfico 22 apresenta as relações MR/RT das misturas asfálticas.

Gráfico 22 – Relação MR/RT das misturas.



Fonte: Elaboração própria

Analisando o Gráfico 22, percebe-se que nas misturas a relação MR/RT teve variação nos valores conforme teor de ligante e porcentagem de borracha. Seguindo as características apresentadas nas análises de MR, porém de forma inversamente proporcional, onde com o aumento do teor de borracha há variação crescente no valor médio da relação MR/RT.

SOARES *et al.* (2002), diz que para misturas na faixa C do DNER para CAUQ que utilizam o CAP 50/70 a relação MR/RT varia de 3.000 a 3.500 MPa, em que valores nessa ordem representam materiais que são flexíveis enquanto possuem uma boa resistência à tração. Assim os teores de ligante de 6,5 e 7% foram os que apresentaram a relação MR/RT mais próximos desses valores, para a mistura com 1% e 5% de borracha.

Para a mistura com 3% de borracha, os teores de ligante com 7 e 7,5% foram os que obtiveram relação MR/RT mais baixas e próximos da variação de (3000 a 3500 MPa). Já a mistura convencional estudada por Junges (2017), e que serviu como parâmetro para esta pesquisa, percebe-se que para todos os teores de ligante a relação MR/RT resultou em valores altos.

Estas análises comprovam que a mistura mais adequada avaliada neste trabalho foi a mistura que teve a substituição de parte do agregado miúdo por 1% de borracha. Esta foi a única mistura estudada que se encontrou o teor ótimo de ligante pela metodologia convencional que é através do volume de vazios de 4%. Além disso, esta mistura apresentou bons valores de Módulo de Resiliência em todos os teores de ligante, com média em torno de 3407,2 MPa. Os valores de Resistência a Tração estão de acordo com o mínimo exigido pela norma do DNIT e o a relação MR/RT está de acordo com o que é sugerido pela literatura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para encontrar o teor ótimo de ligante de cada mistura, foram analisadas as características volumétricas dos corpos de prova. Para a mistura com 1% de borracha foi possível determinar o teor de ligante, obtendo-se um teor de 7,1% de ligante aproximadamente. Já para as misturas com 3 e 5% de borracha não foi possível determinar o teor ótimo de ligante correspondente aos 4% de volume de vazios. O elevado volume de vazios encontrado para essas misturas pode ser justificado pela dificuldade em compactar, já que a borracha é um material elástico e tende a voltar no seu formato original depois da compactação.

Foi realizado ensaios e assim obtidos valores de módulo de resiliência para as três misturas, sendo que as misturas apresentaram variação nos valores quanto ao teor de ligante e porcentagem de borracha. Observou-se que os maiores valores ficaram com as misturas modificadas com 1% de borracha.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, os resultados indicaram que a mistura com 1% de borracha obteve maiores valores em relação as demais misturas, seguidas das misturas 3% e 5%. Somente a mistura com 1% de borracha atendeu o limite mínimo de RT aplicada para a camada de rolamento.

Quanto à relação MR/RT das misturas, encontrou-se valores elevados, mas também obteve valores baixos, sendo desejável um valor pequeno, pois busca-se baixa rigidez para evitar elevada absorção que levam ao trincamento precoce do pavimento, e alta resistência à tração, ocasionando uma maior resistência à fadiga. Porém, deve-se realizar outras análises e outros ensaios, como vida de fadiga.

Comparando os resultados com a mistura convencional de Junges (2017), as misturas modificadas com borracha apresentaram volume de vazios superiores a mistura convencional. Também foi possível observar que os valores de RT e MR das misturas experimentais foram inferiores as misturas convencionais. Já a relação MR/RT encontradas neste estudo foram menores que das misturas convencionais.

Dessa forma, este trabalho procurou avaliar a substituição de agregado por borracha moída em misturas asfálticas densas, sendo que a mistura com 1% de borracha foi a que se mostrou mais adequada para utilização na pavimentação.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a inserção de diferentes teores de borracha diretamente na curva granulométrica, sem exclusão de agregados minerais;
- Realizar um estudo inserindo à borracha em temperatura ambiente na mistura asfáltica;
- Avaliar a utilização de borrachas em outros tipos de misturas asfálticas;
- Realizar ensaios de adesividade e vida de fadiga;
- Avaliar a utilização de borracha em misturas com outros tipos de ligante;
- Avaliar outras granulometrias de borracha moída em misturas asfálticas;
- Avaliar a mistura asfáltica modificada com outros tipos de agregados minerais.

REFERÊNCIAS

ABEDA. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas – Soluções para pavimentar sua cidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001. 136p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11341: Derivados de petróleo - **Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**. Rio de Janeiro, 2014, 18p.

_____. NBR 15086: Materiais betuminosos - **Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro**. Rio de Janeiro, 2006, 4p.

_____. NBR 15184: Materiais betuminosos - **Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2004, 4p.

_____. NBR 15617: Materiais betuminosos – **Determinação do dano por umidade induzida**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos - **Determinação da massa específica e densidade relativa**. Rio de Janeiro, 2012, 6p.

_____. NBR 6576: Materiais asfálticos - **Determinação da penetração**. Rio de Janeiro, 2007, 7p.

_____. NBR 6560: Materiais betuminosos - **Determinação do ponto de amolecimento** – Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2008, 6p.

ARAÚJO, D. H. **Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Formiga 2015.

BAGATINI, Felipe. **Resíduos de Construção Civil: Aproveitamento como Base e Sub-Base na Pavimentação de Vias Urbanas**. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011. 72pg.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARROS, R.F. **Utilização do revestimento fresado da BR-104 como material de reforço da camada de base e/ou sub-base.** / Rafael Falcão Barros. - Caruaru: O Autor, 2013.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BERTOLLO, Sandra A. Margarido. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados.** 2016. 101f. Doutorado (Qualificação de doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**, 3 ed., São Paulo, Fazendo Arte Editora, 2007.

CAMPOS, P.S.; **Aproveitamento Industrial da Borracha Reciclada de Pneus Usados.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Largo do Paço. Portugal, 2006.

CAVALCANTI, L.; **Efeito de Alguns Modificadores de Ligante na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas.** Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2010.

CHAVES, F. J. **Estudo de Misturas de areia de asfalto a frio em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego no Estado do Ceará – Contribuição ao Método de Dosagem.** 2010. 74 338p. Tese (Doutorado). Programa de Engenharia. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CLERMAN, D. S. **Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas a Frio Produzidas com Incorporação de Borracha de Pneus.** Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2004.

DANTAS NETO, S. A. **Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 024/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, (2004).

D'ANGELO, J. et al. **Warm-Mix Asphalt: European Practice**. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE DNIT 153 ES: **Pavimentação Asfáltica – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional** – Especificação de Serviço. 2010

_____.DNIT-ES 031: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**, Rio de Janeiro, 2004.

_____.DNER-ME 035: **Agregados- determinação abrasão “Los Angeles”**, Rio de Janeiro, 1998, 6p.

_____.DNER-ME 043: **Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall**, Rio de Janeiro, 1995, 11p.

_____.DNER ME 054: **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997, 10p.

_____.DNER ME 081: **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1998, 6p.

_____.DNER ME 083: **Agregados - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998, 5p.

_____.DNER ME 084: **Agregados miúdo – determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1995, 3p.

_____.DNER ME 086: **Agregados – determinação do índice do forma**. Rio de Janeiro, 1994, 5p.

_____.DNER ME 089: **Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Rio de Janeiro, 1994, 6p.

_____. DNER ME 135: **Misturas asfálticas – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010, 6p.

_____. DNER 386. **Pavimentação – Pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

FAZIO, José A.; OLIVEIRA, Sérgio A. G. **Utilização do pó de borracha de pneu reciclado em misturas betuminosas para pavimentação urbana e rodoviária**. Brasília – DF, 2014.

GOUVEIA, L. T. **Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FFA) da Especificação Superpave**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

IYOMASA, F. B. M. **Utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil em camadas de pavimentos de tráfego leve: estudo de caso no município de Americana**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013

JUNGES, L. B. **Verificação do potencial de utilização de fibras vegetais em misturas de concreto asfáltico**. 2017. f. Monografia apresentada Universidade Federal do Pampa para o grau de Bacharel em Engenharia Civil.

MACHADO, A. F. A. **Análise da Interação betume borracha em misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus pelo processo a seco**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

MARQUES. G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**, 2004. 490f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MELLO, D. **Avaliação da adição do evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

MOTHÉ, M.G. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

MOREIRA, J. P. V; GOMES, A. C; PEREIRA, P. **Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento**. Lisboa, 2006.

MOTTA, R. S. **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA.** Tese (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 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.

PATRIOTA, M. B. **Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus - processo seco.** Dissertação(mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação Asfáltica.** 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

PROWELL, B.D., **Evaluation of Aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt.** - NCAT Report 05-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn, 2005.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Warm-mix asphalt: Best Practices.** National Asphalt Pavement Association – NAPA. Quality Improvement Publication 125. Lanham, 2007.

RIVOIRE Jr., Larry. **Avaliação de misturas mornas com emprego de simulador de tráfego linear.** Tese (Dotourado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimento.** Tese (Dotourado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

RUBIO, M. C. et al. **Warm mix asphalt: an overview.** Journal of Cleaner Production. University of Granada. Granada,2012.

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.

SANCHES, F. G. et al. **Avaliação da Viabilidade Financeira de Projetos com Utilização do Asfalto-borracha em Relação ao Asfalto Convencional** 2012. 73p. Trabalho de Conclusão de Curso – (Curso Superior em Engenharia de Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba.

SANTANA, H. **Manual de Pré-misturados a frio**. 298p. Instituto Brasileiro de Petróleo, Comissão de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 1993.

SANTOS, E. L. **Análise Histórica de Medição de Atrito das Pistas do Aeroporto Santos Dumont – RJ**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2004.

SOARES, R. A.; ASSIS, E. M. **O uso da Borracha de Pneus na Pavimentação como uma Alternativa Ecologicamente Viável**. 2008. 15 p. Universidade Católica de Salvador, Salvador, BA, 2008

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2004

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1530, p. 51-58, 1996.