



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS POR BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS**

Por

Camila Gonçalves Luz Nunes

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2019



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS POR BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Camila Gonçalves Luz Nunes

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N972e Nunes, Camila Gonçalves Luz.
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS POR BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS / Camila
Gonçalves Luz Nunes. - João Pessoa, 2019.
107 f. : il.

Orientação: Ricardo Almeida de Melo.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT-PPGECAM.

1. Asfalto-borracha. 2. Faixa de agregados dominantes.
3. Marshall. 4. SUPERPAVE. I. Melo, Ricardo Almeida de.
II. Título.

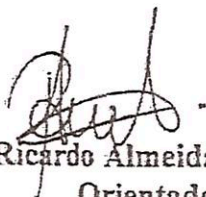
UFPB/BC

"ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS POR
BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS"

CAMILA GONCALVES LUZ NUNES

Dissertação aprovada em 26 de fevereiro de 2019

Período Letivo: 2018.2



Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo – UFPB
Orientador



Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo – UFPB
Examinador Interno



Prof. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco – UFPB *UFC*
Examinador Externo

João Pessoa/PB
2019

Dedico a Deus, meu guia em todas as situações, e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos que vem me concedendo, pelas pessoas que colocou no meu caminho e por nunca me desamparar;

Ao meu orientador, Professor Ricardo Almeida de Melo, pelo tempo que dispôs a contribuir com este trabalho; pelo conhecimento transmitido; pelas orientações e pelas palavras de incentivo e positividade em momentos de necessidade;

A CAPES pelo apoio financeiro ao longo do mestrado;

Aos meus pais, Raimundo e Isete, e aos meus irmãos, Devid e Cintia, por serem meus maiores exemplos de caráter e ética. Obrigada por acreditarem nos meus sonhos e por lutarem junto comigo para que eles venham se realizando;

A minha irmã de coração, Charlene, por ter me acolhido em João Pessoa e em seu coração;

Aos meus tios, padrinhos, madrinhas, primos e primas, por toda energia positiva, em especial a minha prima Priscila pelo apoio e abrigo em Campina Grande;

Ao meu namorado, Diógenes, pela ajuda com as compactações; pela paciência em me ouvir falar sobre asfalto-borracha, ensaios, resultados e prazos; por sempre acreditar no meu potencial e se fazer presente mesmo com a distância que nos separa. Gratidão por todos os momentos felizes que vivemos até agora;

A Rafael, pela amizade de sempre e pela ajuda durante as compactações;

Aos meus amigos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV), Pedro, Rafaela, Mariana, Maísa, Terceiro e Sérgio, gratidão pelo apoio, confiança e companheirismo dos últimos anos. Gratidão em especial a Pedro, que se tornou um irmão em João Pessoa e meu braço direito no laboratório;

Aos laboratoristas Marcos, Danilo, João, Sebastião e Cláudio, pela contribuição durante a realização dos ensaios em João Pessoa;

Aos amigos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), Daniel, Thamires, Valter, Christian, Ablênia, Jadilson e Ildinho pela ajuda durante os ensaios realizados em Campina Grande, e aos Professores John Kennedy e Lêda por permitirem a utilização do laboratório;

A Pedro Vidal, pela amizade, pelas conversas e pela ajuda com o transporte dos materiais até Campina Grande.

RESUMO

Diante da necessidade de obtenção de pavimentos com maior durabilidade, estudos são continuamente desenvolvidos para melhorar o desempenho das misturas asfálticas. Neste contexto, a incorporação de resíduos, como a borracha proveniente de pneus inservíveis às misturas asfálticas convencionais, se mostra como uma alternativa viável para o descarte desses resíduos e como uma possível forma de melhorar o desempenho das misturas. Neste trabalho, buscou-se identificar o comportamento físico e mecânico apresentado por misturas asfálticas com ligante asfalto-borracha produzido em laboratório, e agregados locais de origem granítica. Para a produção do asfalto-borracha foram incorporados teores de 10%, 15% e 20% de borracha ao ligante asfáltico convencional, sob elevada temperatura. Para a escolha da composição granulométrica das misturas, foi utilizada a Faixa C do DNIT ES 031/2006, com ajustes realizados por meio da metodologia de Faixa de Agregados Dominantes (FAD). Após a produção do asfalto-borracha e definição da composição dos agregados, foram realizados ensaios laboratoriais para avaliação do desempenho físico e mecânico das misturas. Para a realização dos ensaios mecânicos foram utilizados os métodos de compactação Marshall e SUPERPAVE, observando-se a influência do método de compactação no desempenho das misturas. Por meio dos resultados obtidos pode-se identificar que as misturas produzidas com incorporação de 10% de borracha ao ligante asfáltico, e compactadas por amassamento, segundo a metodologia SUPERPAVE, apresentaram melhor desempenho mecânico.

PALAVRAS-CHAVE: asfalto-borracha, faixa de agregados dominantes, Marshall, SUPERPAVE.

ABSTRACT

Due to the improvement of pavements with greater durability, studies have been continuously developed to improve the performance of asphalt mixtures. In this context, the incorporation of residues, such as rubber from tires unserviceable to conventional asphalt mixtures, is shown as a viable alternative for the disposal of these residues and as a possible way to improve the performance of the mixtures. This work aimed to identify the physical and mechanical performance of asphalt mixtures with asphalt-rubber binder, produced in the laboratory, and local aggregates of granitic origin. For the production of asphalt-rubber, 10%, 15% and 20% of rubber content was incorporated into the conventional asphalt binder under high temperature. For the sieve analysis of aggregates of the mixtures, DNIT ES 031/2006 Strip C was used, with adjustments made using the Dominant Size Aggregate Range (DSAR) methodology. After the production of rubber asphalt and definition of aggregate composition, laboratory tests were performed to evaluate the physical and mechanical performance of the mixtures. In order to perform the mechanical tests, the Marshall and SUPERPAVE compaction methods were used, observing the influence of the compaction method on the performance of the mixtures. From the obtained results it can be identified that the mixtures produced with incorporation of 10% of rubber to the asphalt binder, and compressed by kneading, according to the SUPERPAVE methodology, presented better mechanical performance.

KEYWORDS: asphalt rubber, Dominant Size Aggregate Range, Marshall, SUPERPAVE

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO TEÓRICA.....	4
2.1 PNEUS INSERVÍVEIS	4
2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM BORRACHA.....	6
2.3 MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO DA BORRACHA	7
2.3.1 <i>Processo Úmido</i>	8
2.3.2 <i>Processo Seco</i>	12
2.4 INTERAÇÃO ENTRE O ASFALTO E A BORRACHA	14
2.5 AGREGADOS	18
2.5.1 <i>Métodos de Seleção Granulométrica</i>	19
2.6 METODOLOGIAS MARSHALL E SUPERPAVE	22
2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS MODIFICADAS COM BORRACHA	25
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 MATERIAIS	27
3.2 MÉTODO DE TRABALHO.....	28
3.2.1 <i>1ª Etapa: Caracterização dos materiais</i>	29
3.2.2 <i>2ª Etapa: Caracterização do ligante asfalto-borracha</i>	31
3.2.3 <i>3ª Etapa: Escolha da composição granulométrica das misturas</i>	34
3.2.4 <i>4ª Etapa: Dosagem Marshall</i>	35
3.2.5 <i>5ª Etapa: Ensaio mecânicos</i>	36
3.2.6 <i>6ª Etapa: Análise de variância</i>	39
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
1. BORRACHA	41
4.2 AGREGADOS	43
4.2.1 <i>Escolha da Composição Granulométrica da Mistura</i>	46
3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LIGANTE ASFÁLTICO	50
4. DOSAGEM MARSHALL	59
4.4.1 <i>Determinação das Temperaturas de Usinagem e Compactação</i>	59

4.4.2	<i>Determinação das Propriedades Volumétricas das Misturas.....</i>	60
4.4.3	<i>Determinação do Teor de Projeto</i>	65
4.5	CÁLCULO DA POROSIDADE FAD APÓS A DOSAGEM	66
6.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	67
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de reaproveitamento de pneus inservíveis. Fonte: ODA (2000).	6
Figura 2: Esquema de produção de asfalto-borracha através do processo úmido. Fonte: Adaptado de PRESTI (2013).	8
Figura 3: Etapas do Processo Seco. Fonte: Adaptado de NETO <i>et al.</i> (2006).	13
Figura 4a: I) Inchamento da partícula de borracha; II) Início da despolimerização; III) fragmentação da partícula. Fonte: THIVES (2009).	15
Figura 5: Comportamento da Viscosidade do Asfalto-Borracha. Fonte: Adaptado de PRESTI, 2013.	16
Figura 6: Componentes da mistura asfáltica pelo método FAD. Fonte: KIM (2006) adaptado por FERREIRA <i>et al.</i> (2016).	20
Figura 7: Borracha triturada de pneus inservíveis em diferentes granulometrias. Fonte: Autoria Própria.	27
Figura 8: Fluxograma com as etapas da pesquisa. Fonte: Autoria Própria.	28
Figura 9: a) Frasco Chapman com 200 ml de água; b) Frasco Chapman com água e pó de pedra. Fonte: Autoria Própria.	31
Figura 10: Misturador Mecânico, FISATOM - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. Fonte: Autoria Própria.	32
Figura 11: Ilustração do Viscosímetro Brookfield - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. Fonte: Autoria Própria.	34
Figura 12: Equipamento utilizado para determinação da Gmm- Laboratório de Pavimentação e Geotecnia - LAPAV/UFPB. Fonte: Autoria Própria.	36
Figura 13: Prensa Hidráulica utilizada para realização do ensaio - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. Fonte: Autoria Própria.	38
Figura 14: AMPT- Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. Fonte: Autoria Própria.	39
Figura 15: Curva Granulométrica da Borracha. Fonte: Autoria Própria.	42
Figura 16: Curva Granulométrica dos Agregados. Fonte: Autoria Própria.	45
Figura 17: Diagrama de Interação. Fonte: Autoria Própria.	46
Figura 18: Curva Granulométrica da mistura. Fonte: Autoria Própria.	47
Figura 19: Descolamento parcial da película de asfalto. Fonte: Autoria Própria.	48
Figura 20: Resultados obtidos para o ensaio com a utilização do melhorador de adesividade em dois teores a) 0,2% e b) 0,4%. Fonte: Autoria Própria.	49
Figura 21: Resultados obtidos para o ensaio de penetração. Fonte: Autoria Própria.	50
Figura 22: Resultados - Ponto de Amolecimento. Fonte: Autoria Própria.	52
Figura 23: Resultados obtidos com o ensaio de Recuperação Elástica. Fonte: Autoria Própria.	54
Figura 24: Resultados obtidos do ensaio de Viscosidade. Fonte: Autoria Própria.	56
Figura 25: Curvas de Viscosidade versus Temperatura para os quatro ligantes. Fonte: Autoria Própria.	58
Figura 26: Densidade Aparente (Gmb). Fonte: Autoria Própria.	60
Figura 27: Volume de Vazios. Fonte: Autoria Própria.	61
Figura 28: Vazios do Agregado Mineral. Fonte: Autoria Própria.	62
Figura 29: Relação de Betume/Vazios. Fonte: Autoria Própria	62
Figura 30: Estabilidade Marshall. Fonte: Autoria Própria.	63
Figura 31: Representação gráfica dos resultados obtidos para o ensaio de RT. Fonte: Autoria Própria.	66

Figura 32: Representação gráfica dos resultados obtidos para o ensaio de MR. Fonte: Autoria Própria.	69
Figura 33: Volume de Vazios x Número de Golpes. Fonte: Autoria Própria.	72
Figura 34: Comparativo entre as metodologias Marshall e Superpave para o Ensaio de Dano por Umidade Induzida. Fonte: Autoria Própria.	73
Figura 35: Resultados do Ensaio de FN. Fonte: Autoria Própria.	76
Figura 36: Módulo Dinâmico à 4°C. Fonte: Autoria Própria.	77
Figura 37: Módulo Dinâmico à 21°C. Fonte: Autoria Própria.	78
Figura 38: Módulo Dinâmico à 37°C. Fonte: Autoria Própria.	78
Figura 39: Curvas Mestras. Fonte: Autoria Própria.	79
Figura 40: Ângulo de Fase à 4°C. Fonte: Autoria Própria.	80
Figura 41: Ângulo de fase à 21°C. Fonte: Autoria Própria.	80
Figura 42: Ângulo de Fase à 37°C. Fonte: Autoria Própria.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação para as propriedades físicas do Asfalto-Borracha produzido pela metodologia <i>Terminal Blend</i> . Fonte: NORMA DNIT 111/2009.	9
Tabela 2: Especificações para as propriedades físicas dos três tipos de asfalto-borracha. Fonte: ASTM D6114:2018.	10
Tabela 3: Análise granulométrica comum para a borracha. Fonte: PRESTI (2013).	17
Tabela 4: Limites para os parâmetros volumétricos para dosagem Marshall. Fonte: DNIT ES 031/2006.	23
Tabela 5: Análise Granulométrica da Borracha. Fonte: Autoria Própria.	41
Tabela 6: Densidade real da Borracha. Fonte: Autoria Própria.	42
Tabela 7: Resultados obtidos com os ensaios de caracterização dos agregados. Fonte: Autoria Própria.	43
Tabela 8: Resumo da Granulometria dos Agregados. Fonte: Autoria Própria.	44
Tabela 9: Tabela ANOVA para o ensaio de penetração. Fonte: Autoria Própria.	51
Tabela 10: Tabela ANOVA para o ensaio de Ponto de Amolecimento. Fonte: Autoria Própria.	52
Tabela 11: Resultados do Ensaio de Estabilidade à Estocagem. Fonte: Autoria Própria.	53
Tabela 12: Tabela ANOVA para o ensaio de Recuperação Elástica. Fonte: Autoria Própria.	55
Tabela 13: Tabela ANOVA para a viscosidade à 135°C. Fonte: Autoria Própria.	57
Tabela 14: Tabela ANOVA para a viscosidade à 150°C. Fonte: Autoria Própria.	57
Tabela 15: Tabela ANOVA para a viscosidade à 177°C. Fonte: Autoria Própria.	57
Tabela 16: Temperaturas de Usinagem e Compactação para cada tipo de Mistura. Fonte: Autoria Própria.	59
Tabela 17: Resumo das Propriedades Volumétricas para os teores de projeto. Fonte: Autoria Própria.	64
Tabela 18: Cálculo da porosidade FAD, após a dosagem. Fonte: Autoria Própria.	65
Tabela 19: Resultados do ensaio de RT para as metodologias Marshall e SUPERPAVE. Fonte: Autoria Própria.	66
Tabela 20: ANOVA para o ensaio de RT com compactação por impacto. Fonte: Autoria Própria.	67
Tabela 21: ANOVA para o ensaio de RT com compactação por amassamento. Fonte: Autoria Própria.	68
Tabela 22: Resultados do Ensaio de MR para as metodologias Marshall e Superpave. Fonte: Autoria Própria.	68
Tabela 23: Relação MR /RT. Fonte: Autoria Própria.	70
Tabela 24: ANOVA para o ensaio de MR - Marshall. Fonte: Autoria Própria.	71
Tabela 25: ANOVA para o ensaio de MR - SUPERPAVE. Fonte: Autoria Própria.	71
Tabela 26: Número de Golpes para cada tipo de mistura. Fonte: Autoria Própria.	72
Tabela 27: Resultados do Ensaio de Dano por Umidade Induzida. Fonte: Autoria Própria.	73
Tabela 28: ANOVA para o ensaio de RRT- Marshall. Fonte: Autoria Própria.	74
Tabela 29: ANOVA para o ensaio de RRT- SUPERPAVE. Fonte: Autoria Própria.	74
Tabela 30: Resultados <i>Flow Number</i> . Fonte: Autoria Própria.	75
Tabela 31: ANOVA para o ensaio de FN. Fonte: Autoria Própria.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
CALTRANS	<i>California Department of Transportation</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CTF	Cadastro Técnico Federal
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPR	<i>Extended Producer Responsibility</i>
FAD	Faixa de Agregados Dominante
Gmb	Densidade Aparente
Gmm	Densidade Máxima Medida
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
IP	Índice de Penetração
IST	Índice de Suceptibilidade Térmica
PG	<i>Performance Grade ou Grau de Desempenho</i>
MD	Módulo Dinâmico
MR	Módulo de Resiliência
NCM	Nomenclatura Comum no Mercosul
OICA	<i>Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles</i>
RBV	Relação Betume/Vazios
RT	Resistência à Tração por compressão diametral
Vag > FAD	Volume de agregados maior que FAD
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VIC, ag	Volume de agregados menores que a FAD
VTM	Volume Total da Mistura
Vv	Volume de vazios

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e os efeitos da urbanização acarretaram graves problemas de mobilidade urbana e geração de resíduos nas cidades contemporâneas. O incremento populacional e o aumento da frota de veículos geraram uma maior necessidade de infraestruturas capazes de atender às novas mudanças e um maior consumo de materiais, ocasionando uma maior formação de resíduos.

Com o intuito de atender às novas demandas surgiu um maior número de rodovias, e de tecnologias capazes de melhorar o seu desempenho. Devido às melhorias que a incorporação de borracha de pneu traz aos pavimentos ao longo de sua vida útil, juntamente com a questão ambiental sobre a disposição de pneus inservíveis, diversos países têm aderido à utilização de borracha em obras de pavimentação (NUNES, 2017).

O *California Department of Transportation* (Caltrans) iniciou o uso dessa tecnologia em 1970, e neste século aumentou o uso de borracha de pneu inservível em projetos de pavimentação, investindo recursos consideráveis no desenvolvimento de estratégias tecnicamente sólidas, econômicas e ambientalmente amigáveis para o uso desse material em aplicações rodoviárias (ZHOU; HOLIKATTI; VACURA, 2014).

Segundo SHENG *et al.* (2017), o uso de misturas modificadas com borracha reduz os custos de manutenção das rodovias, diminui o ruído pelo contato do pneu com o pavimento e aumenta a resistência ao aparecimento de fissuras e trilhas de rodas.

O processo de adição da borracha ao asfalto pode se dar por dois métodos: através do processo seco, onde a borracha substitui parcialmente os agregados da mistura asfáltica, que nesse caso passa a ser chamada de agregado-borracha; ou pelo processo úmido, onde a borracha é incorporada primeiramente ao asfalto, dando origem ao ligante asfalto-borracha.

Existe ainda um terceiro tipo de processo, denominado processo misto que ocorre de modo semelhante ao processo seco, porém com a utilização do ligante modificado por borracha (SALOMÃO *et al.* 2017).

No Brasil, apesar da resolução 416/2009 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) proibir o descarte de pneus no meio ambiente, o uso da borracha em obras de pavimentação como alternativa para disposição final desse material ainda não é uma prática muito comum no país.

As regiões Sul e Sudeste são as que possuem maior expressividade na aplicação da borracha de pneus em obras de pavimentação, sobretudo por meio do processo úmido. A

região Sul foi a pioneira no uso dessa prática, utilizando em 2001 asfalto-borracha para construção do Km 319 da BR 116, no Rio Grande do Sul (GRECA ASFALTOS, 2011).

Na região Nordeste, essa prática é pouco utilizada, apesar de alguns Estados como a Paraíba, possuírem incentivos legais para sua aplicação, como a Lei estadual 10164/2013, que estabelece prioridade para o uso de materiais reciclados como pneus e/ou aqueles oriundos de resíduos sólidos da construção civil em obras de pavimentação no Estado.

Dessa forma, a necessidade de melhorar a qualidade das rodovias brasileiras, associada à busca por alternativas para a destinação adequada dos resíduos de borracha e a pouca utilização desses resíduos em obras de pavimentação, a nível nacional e, sobretudo, local foram os fatores que motivaram o desenvolvimento dessa pesquisa.

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho foi identificar o comportamento físico e mecânico de misturas asfálticas a quente produzidas com asfalto-borracha, por meio do processo úmido. Foram utilizados materiais locais para produção de ligantes modificados com borracha, em diferentes teores, sendo estes: 10%, 15% e 20%. O desempenho das misturas produzidas com o ligante modificado foi comparado ao apresentado pela mistura com ligante convencional.

Para a escolha da composição granulométrica dos agregados foi utilizado o método do enquadramento em faixas granulométricas do DNIT e também a metodologia de Faixa de Agregados Dominantes (FAD). Para a avaliação do comportamento mecânico das misturas foram utilizados os métodos de compactação Marshall e SUPERPAVE.

2. Objetivos Específicos

- ✓ Produzir um ligante asfalto-borracha com materiais locais, de modo que este apresente propriedades que permitam o seu uso em obras de pavimentação;
- ✓ Obter por meio da utilização da metodologia FAD misturas com boa resistência a deformação permanente;
- ✓ Possibilitar uma alternativa para o descarte de pneus inservíveis.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Introdução, que contém uma breve abordagem sobre o tema em estudo, assim como os objetivos almejados no trabalho;

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica, onde foi feita a fundamentação teórica da dissertação, com base na literatura existente sobre o tema;

Capítulo 3 – Método de trabalho, onde foram apresentados os materiais da pesquisa e a metodologia utilizada para alcançar os objetivos desejados;

Capítulo 4 – Resultados e discussões, neste capítulo foram apresentados os resultados e suas análises com base na revisão bibliográfica realizada no capítulo 2.

Capítulo 5 – Conclusão, realizada com base na análise dos resultados do capítulo anterior.

Referências Bibliográficas.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO TEÓRICA

2.1 Pneus Inservíveis

Os pneus inservíveis correspondem aos pneus usados que não podem mais reaproveitados por meio de reformas, por apresentarem danos irreversíveis em sua estrutura. Apesar de serem classificados como resíduos inertes, os pneus inservíveis se tornam prejudiciais ao meio ambiente por serem não biodegradáveis, levando vários anos para se decompor. Além disso, devido ao alto volume e a poluição que geram ao serem queimados se tornam materiais de difícil descarte.

Durante muitos anos o descarte desses pneus foi negligenciado, sendo comum que fossem dispostos em depósitos a céu aberto, em rios e aterros sanitários sem o devido tratamento. Apesar do Brasil se configurar como um dos países com maior demanda e produção de veículos (OICA, 2017), a regulamentação para o descarte dos pneus inservíveis, só surgiu na década de 1990, meio século depois do início da instalação das primeiras indústrias de pneus no país e de terem sido gerados mais de 29 milhões de unidades de pneus.

Nessa época foi criada a resolução 258/99 do CONAMA que proibiu o descarte de pneus inservíveis de modo irregular e implantou a *Extended Producer Responsibility* (EPR) como modelo para regulamentação da gestão desses pneus, além de uma rede de logística reversa para coleta e destinação adequada (MENESES, 2018).

A gestão dos pneus inservíveis pode ocorrer através de três modelos:

- ✓ EPR, modelo adotado no Brasil, no qual os produtores e importadores de pneus são responsáveis pelo descarte adequado dos pneus. Por meio desse modelo, os responsáveis podem cumprir diretamente com a sua obrigação ou por intermédio de outras empresas ou organizações especializadas;
- ✓ Gestão baseada em um sistema fiscal onde os produtores e importadores cobram uma taxa de descarte acrescida ao valor do pneu novo. Esse valor é repassado aos órgãos públicos, que transferem a responsabilidade do descarte para os órgãos de recuperação/reciclagem financiados pelo Estado;
- ✓ Gestão baseada em um sistema de mercado livre, onde os pneus inservíveis são vistos como uma fonte de matéria-prima, cuja gestão pode ser lucrativa para as empresas (SIENKIEWICZ *et al.*, 2012).

Desde 1999, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) se configura como uma das principais instituições responsáveis pela gestão do descarte de pneus

inservíveis, com a criação do Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis. Em 2007, devido à abrangência nacional do programa foi criada a REICLANIP, uma entidade voltada exclusivamente para o gerenciamento desse programa no país (ANIP, 2015).

Em relação à política reversa também instituída pela resolução, ela começa quando os pneus são descartados em pontos de coleta chamados ecopontos, onde são levados para plantas de processamento, nas quais são realizadas diferentes atividades de reciclagem ou recuperação de valor. Pode ocorrer que entre os ecopontos e as plantas de processamento, existam centros intermediários, onde são realizadas atividades de triagem e trituração de pneus para diminuição dos custos com o transporte dos pneus (pneus triturados ocupam menos volume). Além de melhorar o transporte, a existência dos centros intermediários gera receitas pela retirada do aço presente nos pneus antes do processo de trituração (MENESES, 2018).

Atualmente, a resolução em vigor que rege a destinação dos pneus inservíveis é a 416/2009 do CONAMA. Essa resolução revogou a de 1999 e estabeleceu que para cada pneu produzido ou importado, os produtores ou importadores devem dar destinação adequada a um pneu inservível (proporção 1:1). Além disso, estabelece que os produtores e importadores devam fazer um Cadastro Técnico Federal (CTF), no Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), para que a cada ano seja declarada a quantidade de pneus inservíveis que foram destinados adequadamente.

As empresas fabricantes e importadoras de pneus novos têm de preencher dois relatórios disponíveis no CTF. No primeiro, devem informar suas atividades de produção, importação, exportação e envios de pneus às montadoras de veículos novos, indicando a nomenclatura comum no MERCOSUL (NCM, método pelo qual os pneus são classificados) e as quantidades em quilograma e unidade. No segundo, devem cadastrar as informações referentes aos pontos de coleta implementados (IBAMA, 2017).

Devido ao passivo ambiental que representam e à necessidade dos produtores de dar uma destinação adequada aos pneus inservíveis, faz com que a utilização desse material como fonte alternativa de matéria-prima em processos construtivos se torne um caminho viável para sua destinação.

A Figura 1 ilustra um fluxograma de reaproveitamento de pneus inservíveis desenvolvido por ODA (2000). Nele, o processo de incineração e a disposição inadequada são vistos como problemas ambientais e a disposição dos pneus em aterros sanitários como um problema econômico, já que eles comprometem a vida útil dos aterros (os pneus podem

absorver gases e estourar, além de possuírem baixa compressibilidade). Na Figura 1, também é possível observar que a reciclagem, a geração de energia e a utilização em materiais para pavimentação são formas de reutilização da borracha proveniente dos pneus inservíveis.

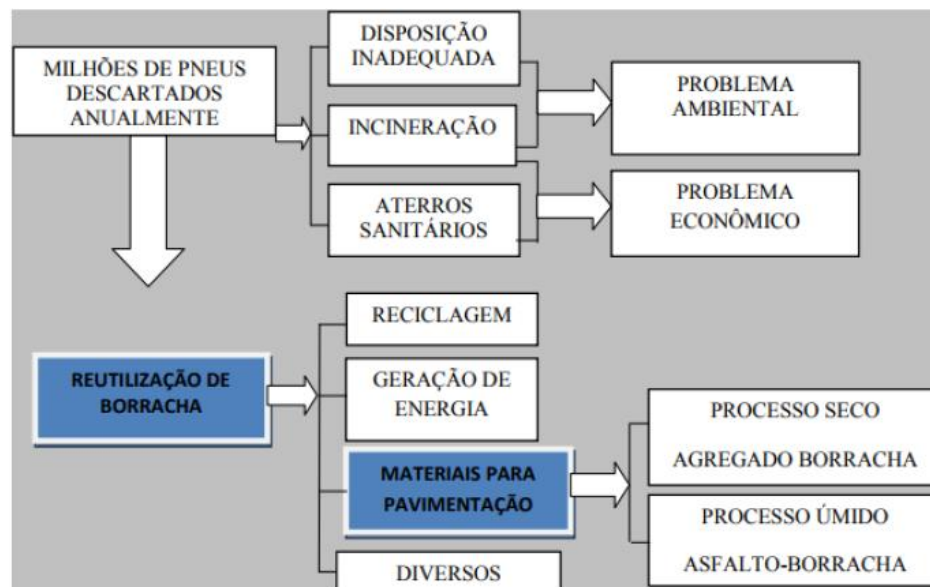


Figura 1: Fluxograma de reaproveitamento de pneus inservíveis. **Fonte:** ODA (2000).

2.2 Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha

As misturas asfálticas são normalmente compostas por agregados, ligante asfáltico e vazios preenchidos com ar. O asfalto é um material viscoelástico, por isso tem sua consistência e mecanismos de adesão afetados pela taxa de carregamento e pela temperatura. Em altas temperaturas e sob cargas lentas, o asfalto se comporta como líquido viscoso, enquanto a baixas temperaturas, ele se comporta como um sólido elástico.

Devido à sensibilidade à temperatura, problemas como trincas térmicas e deformações podem aparecer nos revestimentos asfálticos. Esses problemas podem diminuir a segurança do transporte e encurtar a vida útil do pavimento (SI *et al.*, 2015).

Com o objetivo de prolongar a vida útil de projeto dos pavimentos, agentes modificadores podem ser incorporados às misturas asfálticas convencionais para melhorar as propriedades dos seus componentes e o modo como eles interagem.

Vários estudos como os dos autores AL-HADIDY & TAN (2009), MORILHA JUNIOR (2004), MOON *et al.* (2014), PEREZ & PASANDÍN (2017), comprovam que a utilização

de agentes modificadores, como polímeros e materiais alternativos, promovem melhorias em relação ao desempenho das misturas asfálticas convencionais.

STEFANOVIĆ *et al.* (2014) afirmam que quando expresso em volume, os pneus automotivos são o principal item individual de resíduos. Com o objetivo de reduzir o passivo ambiental gerado por esses resíduos, sua utilização em obras de pavimentação começou a ser estudada em 1960, quando se notou que as propriedades elásticas da borracha tem o potencial de aumentar a resistência à deformação permanente e a durabilidade das misturas asfálticas convencionais (PSZCZOŁA *et al.*, 2017).

Em 1970, o *Caltrans* já utilizava misturas asfálticas modificadas com borracha de pneus inservíveis, por meio do processo úmido, propondo algumas especificações para as propriedades físicas do ligante asfalto-borracha:

- ✓ Viscosidade: deve permanecer acima do valor mínimo de 1500 cPs ao longo da interação entre o asfalto e a borracha e não deve manifestar queda drástica (ZHOU; HOLIKATTI; VACURA, 2014).
- ✓ Temperatura na qual é feita a mistura dos componentes: valores entre 190°C e 224°C, exigindo-se a manutenção da temperatura durante a reação da mistura, entre 190°C e 218°C, por pelo menos 45 minutos para permitir uma perfeita interação entre a borracha e o asfalto.
- ✓ Tempo de reação da mistura: determinado em função do teor e granulometria da borracha, do tipo de ligante e da temperatura da mistura (CALTRANS, 2006).

2.3 Métodos de Incorporação da borracha

A técnica de reaproveitamento da borracha de pneus inservíveis começa com a trituração e moagem dos pneus para separação do aço e do nylon, presentes em sua composição, pois apenas a borracha moída é reaproveitada.

A obtenção da borracha de pneus inservíveis pode ocorrer por meio de trituração em temperatura ambiente, onde os pneus são triturados por meio de granuladores e moinhos em temperatura ambiente; ou por meio do processo criogênico, onde os pneus são expostos a temperaturas negativas, inferiores a -120°C (arrefecimento criogênico) e posteriormente submetidos à moagem criogênica com o emprego de moinhos especiais. O estudo de THIVES *et al.* (2011) mostrou que a borracha obtida pelo processo ambiente apresentou menor granulometria e uma superfície específica mais elevada que a borracha criogênica.

Após a obtenção, a borracha pode ser incorporada às misturas asfálticas por meio de dois processos: úmido e seco.

2.3.1 Processo Úmido

No processo úmido, a borracha é misturada com o ligante asfáltico quente para produzir um aglutinante, chamado de asfalto-borracha. HUAYANG YU *et al.* (2018) afirmam que o asfalto-borracha é um ligante asfáltico modificado com no mínimo 15% de borracha em relação ao peso total de asfalto. Segundo esses autores, o alto consumo de borracha fragmentada para produção do asfalto-borracha ajudaria a resolver a preocupação ambiental com o descarte de pneus inservíveis, além disso, afirmam que o uso do asfalto-borracha diminui os níveis de ruído e melhora o desempenho do pavimento quanto à resistência à fadiga. A Figura 2 exemplifica as etapas da fabricação do asfalto-borracha.

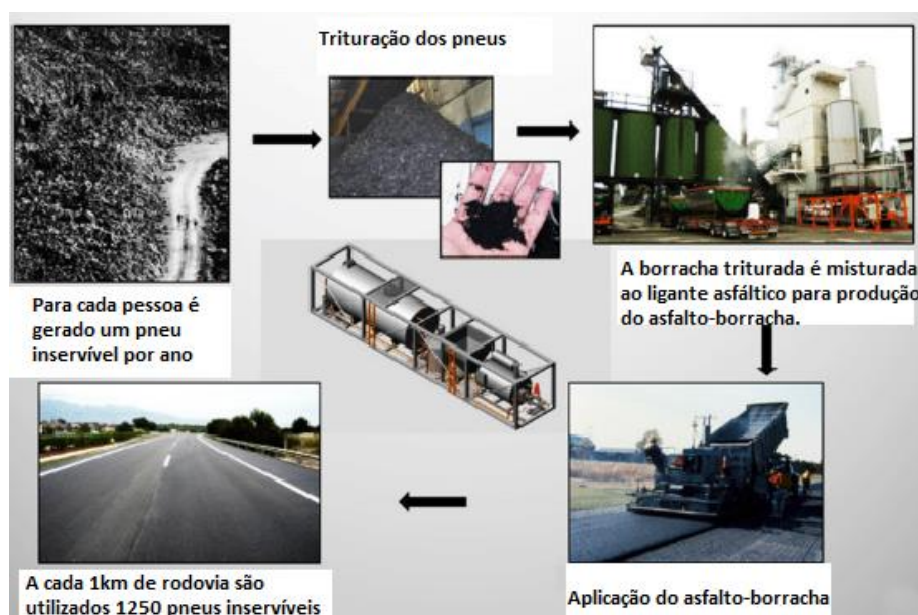


Figura 2: Esquema de produção de asfalto-borracha através do processo úmido.

Fonte: Adaptado de PRESTI (2013).

O asfalto-borracha pode ser produzido por meio de dois Sistemas: *Continuous Blend* e *Terminal Blend*. Por meio do método *Continuous Blend*, o asfalto-Borracha é produzido na própria obra, devendo ser misturado ao agregado e aplicado na pista imediatamente devido à instabilidade do material produzido. Por esse motivo esse procedimento é também conhecido como sistema “Não Estocável”. Ao contrário do *Continuous Blend*, no método *Terminal Blend*, a mistura entre o asfalto e a borracha é realizada em refinarias ou terminais

de distribuição, por meio de agitação mecânica e posterior digestão térmica em moinhos de cisalhamento. Esse processo resulta na produção de um asfalto-borracha com boa estabilidade, que pode ser armazenado (BALAGUER, 2012).

No Brasil, a produção de asfalto-borracha ocorre geralmente pela metodologia *Terminal Blend*. As normas DNIT 112/2009 e DNIT 111/2009 trazem as especificações para a produção do concreto asfáltico e do cimento asfáltico, respectivamente, produzidos por via úmida por meio desse sistema.

Geralmente, a determinação de que um ligante é adequado para uso na pavimentação ocorre por meio de ensaios simples para a caracterização de suas propriedades físicas. As características de dureza e resistência ao escoamento são as propriedades mais utilizadas para essa determinação e são determinadas por meio dos ensaios de penetração e viscosidade, respectivamente (BERNUCCI *et al.* 2008).

A Tabela 1 apresenta algumas especificações para as propriedades físicas do ligante asfalto-borracha, segundo as especificações da norma brasileira DNIT 111/2009.

Tabela 1: Especificação para as propriedades físicas do Asfalto-Borracha produzido pela metodologia *Terminal Blend*. **Fonte:** NORMA DNIT 111/2009.

Característica	Norma	Unid.	AB 08	AB 22
Penetração, 100g, 5s, 25°C	DNER ME 003/99	dmm	30-70	30-70
Ponto de Amolecimento, °C	DNER ME-247/94	°C	55	57
Viscosidade Brookfield, 175°C, 20rpm, Spindle 3	NBR 15529	cP	800-2000	2200-4000
Ponto de Fulgor, min	DNER ME 148/94	°C	235	235
Recuperação Elástica Ductilômetro, 25°C, 10 cm, min	NBR 15086:2006	%	50	55
Estabilidade à estocagem, máx	DNER ME384/99	°C	9	9
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C:				
Variação em massa, máx.	NBR 15235:2006	%	1	1
Variação do Ponto de Amolecimento, máx	DNER ME-247/94	°C	10	10

Porcentagem de Penetração Original, mín.	DNER ME 003/99	%	55	55
--	----------------	---	----	----

No Brasil os asfaltos são classificados com base no ensaio de penetração (CAP 50/70, CAP 55/75), ou por meio do ensaio de viscosidade (CAP 7, CAP 20). Já nos Estados Unidos, a classificação do ligante ocorre em função do seu desempenho, (*Performance Grade - PG*) para certos níveis de tráfego e condições climáticas específicas (SPECHT, 2004).

A norma norte-americana ASTM D6114:2018 especifica as propriedades do ligante asfalto-borracha com base em características do asfalto utilizado como base para a incorporação da borracha, dessa forma classifica-os em três tipos, segundo a metodologia SUPERPAVE:

- Tipo I: ligantes asfálticos duros recomendados para climas mais quentes, classificados como PG 64-16;
- Tipo II: ligantes asfálticos menos duros que o Tipo I, para climas moderados, classificados como PG 58-22;
- Tipo III: ligantes asfálticos mais moles, recomendados para climas mais frios, classificados como PG 52-28.

Esses três tipos de asfalto-borracha são considerados de alta viscosidade e devem atender as especificações da Tabela 2.

Tabela 2: Especificações para as propriedades físicas dos três tipos de asfalto-borracha.
Fonte: ASTM D6114:2018.

Característica	Norma	Unidade	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Viscosidade aparente, 177,5°C	ASTM D 2196	cP	1500-5000	1500-5000	1500-5000
Penetração, 25°C	ASTM D 5	Dmm	25-75	25-75	50-100
Penetração, 4°C	ASTM D 5	Dmm	Min. 10	Min. 15	Min. 25
Ponto de amolecimento	ASTM D 36	°C	Min. 57,2	Min. 54,4	Min. 51,7

Resiliência 25°C	ASTM D 5329	%	Min. 25	Min. 20	Min. 10
Ponto de Fulgor	ASTM D 93	°C	Min. 232,2	Min. 232,2	Min. 232,2
Penetração 4°C após RTFOT (ASTM D1754)	ASTM D 5	Dmm	Min. 75	Min. 75	Min. 75
Clima	-	-	Quente	Moderado	Frio

As propriedades físicas do asfalto-borracha encontram-se fortemente associadas aos teores de borracha utilizados para sua produção. ODA (2001) estudou a influência de diferentes teores de borracha sobre o desempenho físico apresentado pelo ligante. Para isso, modificou o ligante asfáltico sob as mesmas condições, para os teores de 0% , 6%, 12%, 18% e 24% de borracha. Os resultados obtidos por ODA, 2001, mostraram que a penetração aumenta para teores de 12% e estabiliza ou diminui para teores entre 18 e 24%. Para os ensaios de ponto de amolecimento, ponto de fulgor e viscosidade observou-se que os resultados obtidos aumentavam para maiores teores de borracha.

IRFAN *et al.* (2017) investigaram a influência dos teores de borracha sobre o desempenho das misturas asfálticas utilizando dois tipos de asfalto, com faixas de penetração 60-70 e 80-100, e cinco teores de borracha 0%, 4%, 8%, 12% e 16%. Com os resultados obtidos percebeu-se que a viscosidade é uma das propriedades que mais sofre influência do teor de asfalto, aumentando com o acréscimo dos teores de borracha.

A origem da borracha, a granulometria e a forma de obtenção das borrachas também são fatores que exercem influência sobre o desempenho do asfalto-borracha.

A borracha utilizada para produção do asfalto-borracha pode ser proveniente de pneus de automóveis ou de caminhões. A diferença entre ambas consiste basicamente na composição química, nos automóveis a borracha natural constitui cerca de 16% a 20%, e a borracha sintética, de 26% a 31%. Já os pneus de caminhões possuem uma maior proporção de borracha natural, cerca de 31% a 33%, enquanto a proporção de borracha sintética é de aproximadamente 18% (BERTOLLO, 2002).

Maiores proporções de borracha natural dão origem a ligantes de melhor desempenho, assim como borrachas de menor peso específico, pois possuem maior porosidade e melhor interação com o asfalto (ROBERTS *et. al.* 1989).

THIVES *et al.* (2011) estudaram os efeitos do processo de obtenção da borracha sobre as propriedades do ligante asfalto-borracha, observando que a utilização da borracha obtida por trituração ambiente resulta em um ligante mais viscoso, do que o obtido quando se utiliza a borracha obtida por meio do processo criogênico.

2.3.2 Processo Seco

No processo seco, as partículas de borracha são adicionadas aos agregados minerais pré-aquecidos antes da adição do ligante asfáltico, dando origem ao produto conhecido como agregado-borracha. A borracha, geralmente em proporções de 1 a 3% em peso do agregado total da mistura pode ser aplicada em misturas de granulometria do *tipo gap graded* (descontínua densa), *dense graded* (contínua densa) e *open graded* (descontínua aberta) (PRESTI, 2013).

No procedimento por via seca, a reação entre a borracha e o asfalto depende muito da granulometria da borracha. A utilização de uma borracha com elevada superfície específica aumenta a área de contato com o asfalto, favorecendo as reações entre esses materiais durante pequenos intervalos de tempo e a temperaturas relativamente baixas quando comparadas àquelas utilizadas no processo úmido (DANTAS NETO, 2004).

As metodologias existentes para aplicação do processo por via seca levam em consideração principalmente os teores de borracha, sua granulometria e o volume de vazios. As três principais existentes tecnologias de aplicação são: *PlusRide Technology*, *Generic System* e *Chunk Rubber*.

Na metodologia *PlusRide* são utilizados teores de 1 a 3% de borracha na mistura asfáltica. A borracha é colocada no misturador simultaneamente aos agregados, após a mistura entre esses dois componentes é adicionado o ligante asfáltico. Para esse processo são utilizadas borrachas com diâmetro variando entre 2mm até 4,2mm. O teor de ligante utilizado nesse tipo processo varia geralmente entre 7,5% e 9% para obtenção de volume de vazios entre 2 e 4% (ANTT, 2017).

No *Generic System* a borracha é utilizada em teores de até 3% em relação à massa total da mistura. As partículas de borracha empregadas são de uma granulometria mais fina em

relação a utilizada no método *PlusRide*, com diâmetros de 0,18mm até 2,0mm, permitindo uma modificação parcial do ligante (HASSAN *et al.*, 2014).

No método *Chunk Rubber*, as partículas de borracha possuem diâmetros maiores, variando de 4,75mm até 9,5mm (ANTT, 2017).

O processo seco é considerado mais econômico que o processo úmido, pois exige menores temperaturas para a mistura, porém ainda acarreta grandes discussões quanto à sua capacidade de melhorar o desempenho do pavimento (MACHADO, 2013).

A utilização do processo seco na construção de alguns trechos experimentais nos Estados Unidos revelaram um desempenho inferior ao apresentado pelas misturas asfálticas convencionais (VOLLE, 2000).

Para VAN KIRK E HOLLERAN (2000), o menor tempo de interação entre o asfalto e a borracha no processo seco é uma das razões pelas quais se pode explicar o desempenho inferior apresentado pelas misturas produzidas por esse método.

O estudo de ODA & FERNANDES JUNIOR (2001) apresenta melhorias nas propriedades de resistência à fadiga e a deformação permanente em misturas produzidas por meio do processo seco, com utilização de partículas de borracha com granulometria fina, inferiores a 1 mm.

Estudos recentes, como o de SILVA (2018) obtiveram melhorias nas propriedades de resistência à fadiga e a deformação permanente em misturas produzidas por meio do processo seco com utilização de partículas de borracha com granulometria fina, inferiores a 1 mm.

A Figura 3 ilustra o processo básico de incorporação da borracha por via seca.



Figura 3: Etapas do Processo Seco. **Fonte:** Adaptado de NETO *et al.* (2006).

2.4 Interação entre o asfalto e a borracha

O asfalto é constituído por contínuas associações tridimensionais de moléculas polares dispersas em um fluido de moléculas não polares ou de polaridade relativamente baixa. As propriedades viscoelásticas típicas do asfalto puro são o resultado da formação contínua e quebra dessas associações sob o efeito de fatores externos, tais como tensões de cisalhamento e variações de temperatura (RAGAB & ABDELRAHMAN, 2017).

A modificação das misturas asfálticas pela borracha ocorre por meio de dois processos simultâneos: digestão parcial da borracha no asfalto e absorção das frações leves do asfalto pelas cadeias poliméricas da borracha, que são os principais componentes da borracha, tanto natural, quanto sintética.

O processo de absorção dos óleos aromáticos ocorre a elevadas temperaturas entre 160-220°C e faz com que a borracha aumente de volume e amoleça. Durante a reação há uma redução na fração oleosa do asfalto e um aumento no tamanho das partículas de borracha com a consequente redução da distância entre as partículas. Esse processo dá origem a um material semelhante a um gel que pode aumentar a viscosidade do ligante em até 10 unidades (PRESTI, 2013).

Para SPECHT (2004), o inchamento da borracha ocorre por um processo de difusão, onde as frações leves do asfalto se movem para o interior da matriz polimérica da borracha, e não por reação química, já que não existem ligações livres na borracha para interação química com o asfalto.

O inchaço das partículas de borracha e o efeito que ele causa na estrutura e nas propriedades do asfalto-borracha foi investigado por DONG *et al.* (2012), medindo-se as alterações na quantidade dos quatro grandes grupos componentes do asfalto (asfaltenos, resinas, saturados e aromáticos), durante o processo de inchamento. Os resultados obtidos demonstram que o percentual de peso dos saturados e aromáticos no asfalto aumentam à medida que o tempo de inchamento aumenta e que o oposto ocorre para os asfaltenos e resinas.

Nesse estudo observou-se que a quantidade de componentes saturados tem grande influência sobre a ductilidade apresentada pelo asfalto-borracha, e que a quantidade de grupos aromáticos e asfaltenos exercem influência sobre a consistência do asfalto-borracha, afetando sua penetração e o seu ponto de amolecimento, respectivamente. Para as resinas, foi observado que mudanças em suas quantidades não afetam significativamente nenhuma propriedade do asfalto-borracha.

Os resultados obtidos permitem afirmar que:

- 1º) O inchamento da borracha ocorre de forma mais acelerada no início da interação com o asfalto, tendendo posteriormente a um estado de equilíbrio;
- 2º) Somente as frações leves do asfalto são absorvidas pela borracha;
- 3º) A temperatura e o tempo exercem forte influência sobre a interação entre o asfalto e a borracha.

Se a temperatura estiver muito alta ou o tempo de interação for muito longo, o aumento de volume da borracha continuará até ao ponto em que, devido à longa exposição a altas temperaturas, seja substituído pelo processo de despolimerização/desvulcanização que causa a fragmentação da borracha. A despolimerização começa a liberar os componentes de borracha de volta à fase líquida, causando uma diminuição no módulo complexo (G^*), que está relacionado com a rigidez do material, enquanto o ângulo de fase (δ), relacionado às propriedades elásticas, continua a modificar. O processo de despolimerização/desvulcanização pode evoluir de acordo com o aumento da temperatura ou do tempo, de modo a comprometer a capacidade aglutinante do ligante asfáltico (PRESTI, 2013), conforme ilustrado na Figuras 4 e 5.

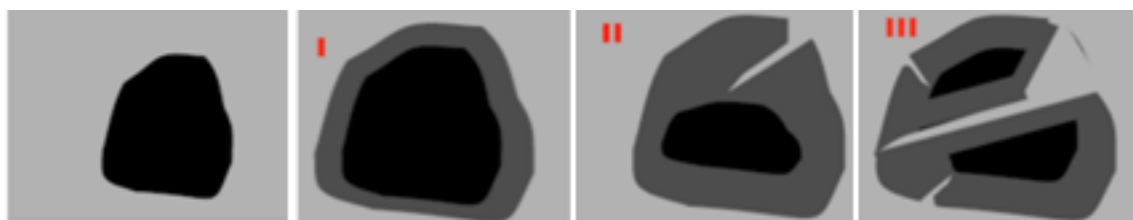


Figura 4: I) Inchamento da partícula de borracha; II) Início da despolimerização; III) fragmentação da partícula. **Fonte:** THIVES (2009).

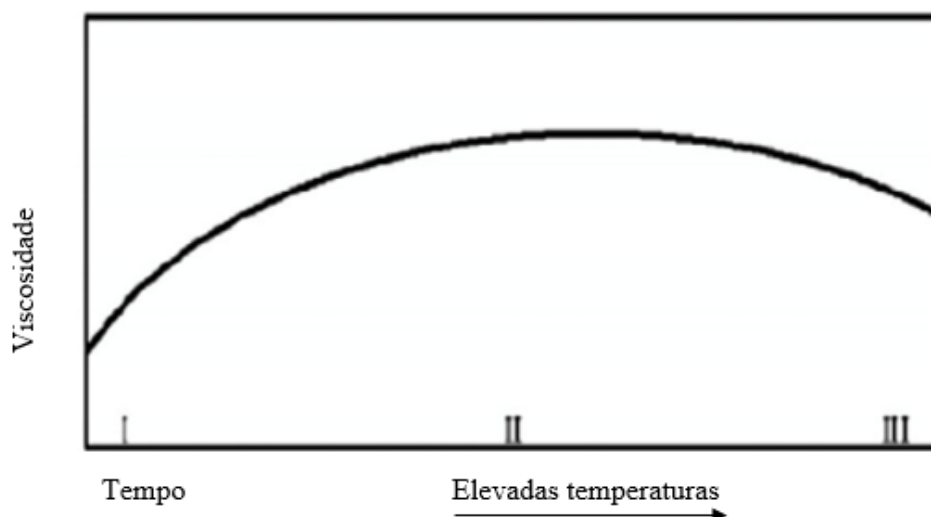


Figura 5: Comportamento da Viscosidade do Asfalto-Borracha. **Fonte:** Adaptado de PRESTI, 2013.

Além do inchamento, durante a interação entre o ligante asfáltico e a borracha, ocorre a transferência por meio do negro de fumo, de propriedades químicas da borracha vulcanizada para o ligante, como inibidores de raios ultravioletas e antioxidantes que contribuem para uma maior resistência ao envelhecimento e uma maior resistência ao aparecimento de fissuras. De modo geral a interação entre o asfalto e a borracha depende de fatores como: compatibilidade molecular entre o asfalto e a borracha, do tempo de digestão, da viscosidade do asfalto e também da granulometria da borracha, além de fatores como temperatura e tempo de mistura (SPECHT, 2004).

A compatibilidade entre o asfalto e borracha pode ser verificada por meio do ensaio de estabilidade à estocagem, preconizado pela norma DNER ME-384/99. Este ensaio tem por objetivo verificar a ocorrência de separação de fases entre o asfalto e o agente modificador em condições estáticas.

Para a determinação do tempo de digestão deve-se levar em consideração a granulometria da borracha, quanto mais fina a borracha, maior a área específica e menor o tempo necessário para homogeneização da mistura. A borracha pode se apresentar como um pó muito fino ($< 0,1\text{mm}$) ou como partículas mais grossas ($> 5\text{mm}$), sua granulometria interfere nas propriedades elásticas da mistura, na viscosidade e no tempo de digestão (KARACASU *et al.*, 2015).

Partículas grossas de borracha aumentam a viscosidade do asfalto-borracha, enquanto que as partículas finas (que passam na peneira nº 50) resultam em um menor tempo de

digestão, correspondendo este ao tempo de interação entre o asfalto e a borracha a elevadas temperaturas (CALTRANS, 2005).

A Tabela 3 mostra os intervalos típicos de granulometria apresentados para a borracha obtida de pneus inservíveis, determinados por PRESTI (2013).

Tabela 3: Análise granulométrica comum para a borracha. **Fonte:** PRESTI (2013).

Peneira	Abertura (mm)	% Passante
10	2,36	100
16	1,18	75-100
30	0,59	25-100
50	0,30	0-45
100	0,15	0-10
300	0,075	0

A especificação ASTM 6114 (1997) recomenda os seguintes requisitos para a borracha utilizada para produção do asfalto-borracha:

- menos de 0,75% de umidade;
- massa específica de $1,15 \pm 0,05$;
- sem partículas visíveis de metais não ferrosos;
- não mais do que 0,01% de partículas de metais ferrosos por peso;
- o teor de fibras não pode exceder 0,5% em peso;
- não recomenda a utilização de partículas de borracha retidas na peneira de partículas de 2,36 mm.

Por meio da análise das referências observou-se que os intervalos comuns utilizados para produção do asfalto-borracha (processo úmido) variam geralmente entre 0,80-0,15mm (SPECHT *et al.* 2007; ODA & FERNANDES JUNIOR, 2001; PINHEIRO, 2004).

PINHEIRO (2004) utilizou em seu trabalho granulometrias de borracha variando entre 0,42-0,18mm, para modificação de misturas asfálticas através do processo úmido. Segundo o autor, a utilização de frações mais finas de borracha promove uma modificação mais efetiva. O autor observou também que a utilização da fração 0,42-0,18mm apresentou

resultados satisfatórios e próximos aos resultados obtidos com a utilização da fração entre 0,18 – 0,075mm.

2.5 Agregados

Os agregados são os componentes presentes em maiores proporções nas misturas asfálticas, sendo os responsáveis por boa parte da resistência do pavimento.

Os agregados utilizados na pavimentação podem ser classificados, quanto a sua origem, tamanho e distribuição dos grãos. Quanto à origem os agregados podem ser: naturais, formados por compostos de diferentes minerais em proporções variadas; artificiais, correspondentes aos resíduos de processos industriais ou reciclados, provenientes da reutilização de materiais diversos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Agregados naturais provenientes de rochas ácidas, como os de origem granítica do Estado da Paraíba utilizados nessa pesquisa, tendem a não apresentar uma boa adesividade ao ligante asfáltico, devido à baixa atração que seus átomos exercem sobre a película de asfalto. Resultados obtidos por ASSIS (2015) demonstraram a necessidade do uso de melhoradores de adesividade com esse tipo de agregado.

Quanto ao tamanho, os agregados que compõem as misturas asfálticas podem ser classificados como: graúdos, miúdos e material de enchimento ou fíler (DNIT ES 031/2006).

São considerados agregados graúdos aqueles com dimensões superiores a 2mm; agregados miúdos aqueles que possuem dimensões inferiores a 2mm e superiores a 0,075mm; são classificados como materiais de enchimento aqueles que possuem 65% de suas partículas passantes na peneira nº200 (0,075mm). O tamanho máximo das partículas pode afetar consideravelmente o desempenho da mistura. A utilização de tamanhos máximos muito pequenos pode comprometer a estabilidade das misturas, já tamanhos máximos excessivamente grandes podem comprometer a trabalhabilidade e promover a segregação das misturas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A norma ES DNIT 031/2006 estabelece os ensaios de caracterização que devem ser realizados para determinação física e mecânica dos agregados graúdos, miúdos e de enchimento, assim como os valores limites que devem ser alcançados em cada ensaio.

Para misturas asfálticas com asfalto-borracha, produzidas pelo método *Terminal Blending* as especificações para as propriedades dos materiais são definidas pela norma DNIT 112/2009.

Em relação à distribuição granulométrica, considera-se esta como uma das principais características dos agregados, pois exerce influência sobre quase todas as propriedades das misturas, dentre elas: como a estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à deformação permanente, resistência à fadiga e ao dano por umidade induzida (CUNHA *et al.* 2004).

A distribuição granulométrica é definida por meio do ensaio de granulometria definido na norma DNIT-ME 083/98. De acordo com os resultados obtidos com esse ensaio a graduação dos agregados pode ser classificada, em: densa, quando a curva apresentar uma distribuição contínua; aberta, quando houver insuficiência de material fino; uniforme, quando houver concentração de material em uma faixa estreita de peneiras; ou descontínua quando apresenta pequenas quantidades de partículas com tamanhos intermediários.

Assim como as misturas convencionais, as misturas modificadas com borracha também sofrem influência da distribuição granulométrica dos agregados, sobretudo quando se utiliza o processo por via seca, onde a borracha interage primeiramente com os agregados.

Para as misturas modificadas por meio da metodologia *PlusRide* recomenda-se a utilização de misturas com granulometrias descontínuas para obtenção de uma melhor estabilidade, devido ao processo de inchamento das partículas de borracha. Para misturas produzidas por meio da metodologia *Generic System* podem ser utilizadas curvas descontínuas ou até densas, desde que ajustes sejam feitos para melhor incorporação com a borracha. Para o método *Chunk Rubber* recomenda-se que a escolha das curvas granulométricas deve ser feita de modo que forneça espaço suficiente para a adição da borracha (ANTT, 2017).

Para o processo por via úmida a norma DNIT 112/2009 especifica as faixas granulométricas que podem ser utilizadas para misturas com ligante asfalto-borracha produzido por meio da metodologia *Terminal Blend*.

2.5.1 Métodos de Seleção Granulométrica

No Brasil, as especificações para a seleção granulométrica das misturas fundamentam-se, basicamente, no enquadramento dos agregados em faixas granulométricas (faixas granulométricas do DNIT). Este método consiste em um procedimento de tentativa e erro, onde as proporções dos agregados componentes da mistura são ajustadas para o enquadramento nos limites dessas faixas.

Esse método não leva em consideração o efeito que a distribuição dos agregados possui no comportamento mecânico das misturas asfálticas, o que gera a possibilidade de composições de misturas com esqueleto pétreo de baixa estabilidade, com menor grau de intertravamento e, conseqüentemente, com menor capacidade de resistência à deformação permanente (FERREIRA *et al.* 2016).

Para ALMEIDA JR (2018), essa metodologia de escolha dos agregados mostrou-se satisfatória no passado, mas que com o aumento das solicitações provenientes do tráfego devem ser priorizadas metodologias que levem em consideração o desempenho das misturas asfálticas, que tenham como objetivo mitigar o aparecimento de defeitos e prolongar a vida útil do pavimento.

KIM (2006) desenvolveu uma metodologia baseada na interação entre os agregados para composição de um esqueleto pétreo estável, com boa resistência à deformação permanente, por meio de um contato adequado entre as partículas.

Para KIM (2006), todos os tipos de misturas asfálticas são formados por uma Faixa de Agregados Dominantes (FAD) e pelo Volume Intersticial (VI), constituído pelos agregados de granulometria menor que a FAD, pelo asfalto e pelos vazios preenchidos com ar, conforme ilustra a Figura 6.

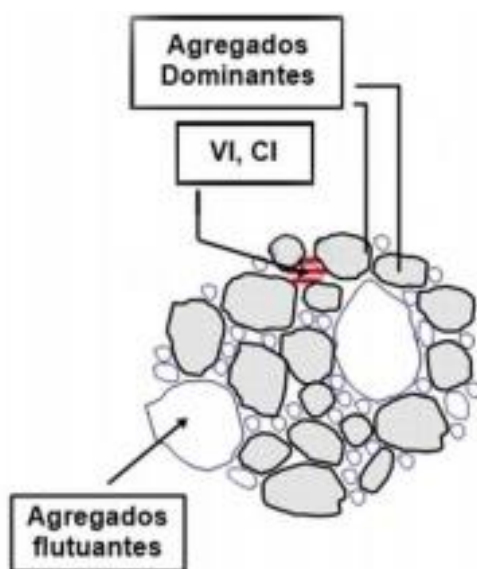


Figura 6: Componentes da mistura asfáltica pelo método FAD. **Fonte:** KIM (2006) adaptado por FERREIRA *et al.* (2016).

A FAD é responsável pela resistência à deformação permanente da mistura asfáltica e o volume intersticial pela resistência à tração, adesão e resistência à fadiga.

Por essa metodologia considera-se que somente partículas passantes na peneira de abertura 2,36 mm e retidas na de abertura 1,18 mm podem compor a FAD e que, as partículas de tamanho superior a FAD flutuam na matriz de agregados, desse modo, não são relevantes para a resistência à deformação permanente.

Para a análise da interação entre os agregados, KIM (2006) utilizou diagramas que mostram graficamente as proporções relativas entre o percentual retido entre peneiras contíguas de uma mistura asfáltica, permitindo uma visão geral das peneiras que estão contribuindo para a formação da FAD.

Os resultados obtidos com esses diagramas mostraram que o espaçamento entre os agregados retidos entre quaisquer duas peneiras consecutivas aumenta rapidamente quando a proporção relativa entre elas é menor que 0,43 ou maior que 2,33. Isso indica que dentro desse intervalo, os agregados mantêm um espaçamento constante, capaz de garantir um contato efetivo entre eles e formar um esqueleto pétreo resistente à deformação permanente (KIM 2006 *apud* BASTOS, 2016).

Nesse método, o conceito de porosidade dos solos é aplicado às misturas asfálticas, considerando que a FAD corresponde aos grãos do solo e que o VI é equivalente aos vazios entre esses grãos. Dessa forma associa a porosidade FAD com a capacidade de resistência à deformação permanente das misturas, considerando que misturas asfálticas com porosidade abaixo de 50% apresentam boa probabilidade de resistência à deformação permanente.

O primeiro passo para a determinação da porosidade FAD corresponde a escolha das peneiras que irão compor a FAD. Após a escolha das peneiras e do processo de dosagem da mistura asfáltica pode-se determinar a porosidade FAD, por meio da equação 1.

$$FAD = \frac{V_v(FAD)}{V_t(FAD)} = \frac{VIC, ag + VAM}{VTM - Vag > FAD} \quad (1)$$

Em que:

FAD: Porosidade (adimensional);

VIC, ag: Volume de agregados menores que a FAD;

VAM: Vazios do agregado mineral;

VTM: Volume total da mistura;

Vag > FAD: Volume de agregados maior que FAD.

Por meio das equações 2 e 3 pode-se calcular os valores de VIC e $Vag > FAD$, correspondentes respectivamente ao numerador e denominador da equação 1.

$$VIC, ag = \frac{\Sigma \%ret < FAD}{Gsb} \times 100 \quad (2)$$

$$Vag > FAD = \frac{\Sigma \%ret > FAD}{Gsb} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$\Sigma \%ret < FAD$: soma dos percentuais retidos nas peneiras menores que a FAD;

$\Sigma \%ret > FAD$: soma dos percentuais de massa retidos nas peneiras maiores que a FAD;

Gsb: massa específica aparente dos agregados.

Após o cálculo da porosidade FAD pode-se categorizar as misturas em três grupos (CHUN, *et. al.* 2017):

- Grupo 1 (bom desempenho): misturas com porosidade entre 38% e 48%;
- Grupo 2 (desempenho marginal): misturas com porosidade entre 48% e 52%, devido a proximidade com o valor limite de 50%, não se pode estimar um comportamento bom ou ruim para as misturas;
- Grupo 3 (desempenho ruim): misturas com porosidade acima de 52%.

Apesar de não levar em conta o desempenho dos agregados menores e do asfalto, espera-se que através da metodologia FAD seja possível avaliar o comportamento das misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente. Nessa pesquisa, estimativas foram feitas para determinação do VAM, para que essa metodologia fosse aplicada previamente ao processo de dosagem das misturas.

2.6 Metodologias MARSHALL e SUPERPAVE

O processo de dosagem das misturas asfálticas corresponde ao estabelecimento de proporções adequadas de agregados e ligantes, de modo que estes quando misturados satisfaçam os requisitos estabelecidos pelas especificações. O teor de projeto do ligante asfáltico é função de diversos fatores, tais como: a energia de compactação, o tipo de mistura e a temperatura. Para a definição desse teor são comumente utilizadas as metodologias Marshall e Superpave.

O método Marshall foi desenvolvido pelo engenheiro Bruce Marshall e tem como base a escolha do teor de ligante de acordo com a determinação dos seguintes parâmetros volumétricos: Densidade Aparente da Mistura (Gmb), Densidade Máxima Teórica (DMT), Volume de vazios (Vv), Vazios do Agregado Mineral (VAM), Relação de Betume/Vazios (RBV) e Estabilidade Marshall.

A norma DNIT ES 031/2006 determina alguns limites para os parâmetros volumétricos determinados na metodologia Marshall, sendo eles citados na Tabela 4:

Tabela 4: Limites para os parâmetros volumétricos para dosagem Marshall. **Fonte:** DNIT ES 031/2006.

Características	Camada de Rolamento	Método de Ensaio
Porcentagem de Vazios %	3 a 5	DNER-ME 043
Relação Betume/Vazios (RBV)	75-82	DNER-ME 043
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	500	DNER-ME 043
Resistência à Tração por Compressão Diametral a 25°C, mínima, MPa	0,65	DNER-ME 043

Segundo a metodologia Marshall a determinação do teor de projeto do ligante pode ser feita de várias maneiras: considerando apenas o volume de vazios; por meio da massa específica aparente da mistura e pelo volume de vazios; utilizando-se a máxima estabilidade e um volume de vazios de 4% ou por meio dos parâmetros RBV e Vv (BERNUCCI *et al.*, 2008). Independentemente do método escolhido os limites estabelecidos para todos os parâmetros volumétricos devem ser atendidos para o teor de projeto.

O estudo de PILATI *et al.* (2008) demonstraram que misturas com asfalto-borracha, sobretudo aquelas com maiores porcentagens de borracha, dão origem a misturas com elevado volume de vazios, de modo que para atingir os valores especificados pela norma, entre 3-5% é necessária à utilização de altos teores de ligante.

Segundo SPECHT (2004), as misturas com asfalto-borracha necessitam de maiores teores de ligante, devido a algumas de suas características:

1º) O asfalto-borracha é mais viscoso que o ligante convencional;

2º) Caso não haja uma boa homogeneização da mistura entre o asfalto e a borracha, esta irá se comportar como partícula sólida, aumentando o volume de asfalto.

A metodologia Marshall é muito empregada no Brasil uma vez que, a análise realizada garante adequada proporção volumétrica. Essa metodologia utiliza a energia de compactação por impacto e é regulamentada no país pela norma DNER ME 043/95, que recomenda que o esforço de compactação utilizado seja de 75 golpes para uma pressão de 7 kgf/cm² a 14 kgf/cm², não havendo ressalvas sobre a frequência dos golpes (MENSCH, 2017).

Apesar de ser o método mais utilizado acredita-se que a compactação por impacto utilizada na metodologia Marshall dê origem a corpos-de-prova com densidades que não condizem com as densidades do pavimento em campo. Dessa forma, entre outubro de 1987 e março de 1993, nos Estados Unidos foi desenvolvido o *Strategic Highway Research Program* (SHRP) que teve como principal objetivo a elaboração de especificações e a concepção de novos equipamentos para ensaios em cimentos asfálticos e em misturas asfálticas a quente. Assim foi desenvolvido um conjunto de normas e equipamentos denominados *SUPERPAVE* (*Superior Performing Asphalt Pavements*) (SILVA, 2011).

A dosagem *SUPERPAVE* exige em todas as suas etapas uma seleção dos materiais, definindo-se o ligante asfáltico e os agregados a serem utilizados com base nos fatores ambientais e de tráfego, definidos no projeto. Seleciona-se o PG do ligante asfáltico requerido no projeto pelas condições climáticas, e os agregados são selecionados com base no volume de tráfego e na espessura de camada.

A metodologia *SUPERPAVE* apresenta vantagens quando comparada a metodologia Marshall. O método de seleção dos materiais empregado no método Marshall baseia-se apenas nas propriedades volumétricas, enquanto no método de dosagem *SUPERPAVE*, além das propriedades volumétricas, também são considerados os fatores climáticos e de tráfego. Além disso, a energia de compactação por amassamento empregada na dosagem *SUPERPAVE* simula melhor as condições de campo (SOARES, 2014).

Quanto ao emprego das metodologias Marshall e *SUPERPAVE* em misturas asfálticas modificadas com borracha, encontram-se, nas referências, ressalvas quanto ao processo seco. Estudos conduzidos por HAFEZ & WITCZAK (1995) *apud* BERTOLO (2002) recomendam que a compactação por amassamento não seja utilizada para misturas asfálticas modificadas com borracha por meio desse processo, devido a dois aspectos:

1) Natureza resiliente da borracha: segundo esses autores a borracha pode se comportar durante a compactação por amassamento como uma série de “molas” elásticas, que

tendem a retornar a sua configuração original após as alterações volumétricas sofridas durante a compactação;

- 2) Expansão do corpo-de-prova após a compactação: esse processo depende da interação entre o asfalto e a borracha, das porcentagens de borracha e de ligante, e da temperatura. Acredita-se que a utilização desse tipo de compactação para misturas produzidas por via seca conduza a interpretações incorretas para os resultados obtidos em laboratório.

Nesse estudo a definição do teor de projeto para o ligante asfáltico foi realizada por meio da dosagem Marshall. Após a definição do teor de ligante os corpos-de-prova para os ensaios mecânicos foram moldados com energia de compactação por impacto e por amassamento, comparando-se os resultados obtidos para ambas.

2.7 Propriedades Mecânicas das Misturas Modificadas com Borracha

Diante do crescente aumento das solicitações impostas ao pavimento torna-se importante a análise de suas propriedades mecânicas. Essas propriedades são comumente caracterizadas por meio de ensaios laboratoriais que simulam as condições de campo.

O ensaio de estabilidade Marshall especificado pela norma DNER – ME 043/95 foi um dos primeiros a ser utilizado para investigação das propriedades mecânicas das misturas. Esse ensaio consiste na aplicação de cargas crescentes de compressão, até um valor que provoca a perda da estabilidade do corpo-de-prova devido ao deslocamento ou ruptura dos agregados (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A norma DNIT ES 031/2006 estabelece o limite mínimo de 500 kgf para as misturas asfálticas com ligante convencional. Para as misturas asfálticas produzidas com ligante asfalto-borracha pela metodologia *Terminal Blending* a norma DNIT 112/2009 determina um valor mínimo de 800 kgf.

PILATI *et al.* (2008) estudaram a influência dos teores de borracha e de ligante sobre as propriedades volumétricas e de estabilidade Marshall das misturas asfálticas. Desse modo, verificou que a adição de borracha ao ligante asfáltico aumenta a estabilidade dos corpos-de-prova.

Além do ensaio de estabilidade, outros são comumente realizados para caracterizar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, sendo eles: ensaio de dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, resistência à tração por compressão diametral, fadiga e *Flow Number*.

O ensaio de dano por umidade induzida tem por objetivo avaliar o comportamento das misturas asfálticas quando expostas à umidade, evidenciando possíveis problemas de adesividade do ligante aos agregados.

Para misturas com asfalto-borracha os autores divergem sobre os efeitos que ele causa sobre a capacidade de resistência ao dano por umidade. Alguns afirmam que o asfalto-borracha melhora essa propriedade (PARTL *et al.*, 2010; HOSSAIN *et al.*, 2015), enquanto outros afirmam que o uso do asfalto-borracha piora a sensibilidade à umidade (XIAO & AMIRKHANIAN, 2009).

Quanto aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e ao módulo de resiliência, estudos, como os de IRFAN *et al.* (2017), indicaram um incremento dessas propriedades para diferentes teores de borracha.

Para a vida de fadiga e a resistência à deformação permanente medida por meio do ensaio *Flow Number*, a literatura aponta um incremento dessas propriedades quando se utiliza o ligante asfalto-borracha. SPETCH (2004) observou que teores de incorporação de 12% a 18% de borracha promovem melhorias na capacidade de resistência à fadiga e à deformação permanente das misturas, além de proporcionarem uma maior durabilidade.

Em relação ao ensaio de módulo dinâmico este consiste na aplicação de carga em diferentes frequências e a diferentes temperaturas aos corpos-de-prova. Resultados obtidos por THIVES (2009) indicam uma redução do módulo dinâmico de misturas com ligante asfalto-borracha.

Apesar da literatura citada vale a ressalva de que misturas com asfalto-borracha sofrem influência de muitos fatores, tais como: temperatura, tempo de digestão e granulometria dos agregados, por isso torna-se difícil à previsão de um padrão de comportamento para esse tipo de mistura.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram: borracha proveniente de pneus inservíveis, agregados (brita ¾", brita 3/8" e pó de pedra) e CAP 50/70.

A borracha triturada foi coletada em uma renovadora de pneus na cidade de João Pessoa e submetida a um peneiramento preliminar na peneira de abertura 1,18 mm (peneira #16) para remoção das partículas maiores. Para a pesquisa foram utilizadas as frações de borracha com granulometria entre 0,15 e 0,59 mm. A Figura 7 ilustra a fração granulométrica utilizada na pesquisa e as frações retidas.



Figura 7: Borracha triturada de pneus inservíveis em diferentes granulometrias. **Fonte:** Autoria Própria.

Os agregados: brita 3/8", brita 3/4" e pó de pedra possuem origem granítica e foram obtidos em uma usina de asfalto localizada na cidade de João Pessoa. O CAP 50/70, ligante asfáltico de uso comum no estado da Paraíba, foi obtido na mesma usina onde foram coletados os agregados.

3.2 Método de Trabalho

A pesquisa foi dividida em seis etapas conforme ilustrado no fluxograma da Figura 8.

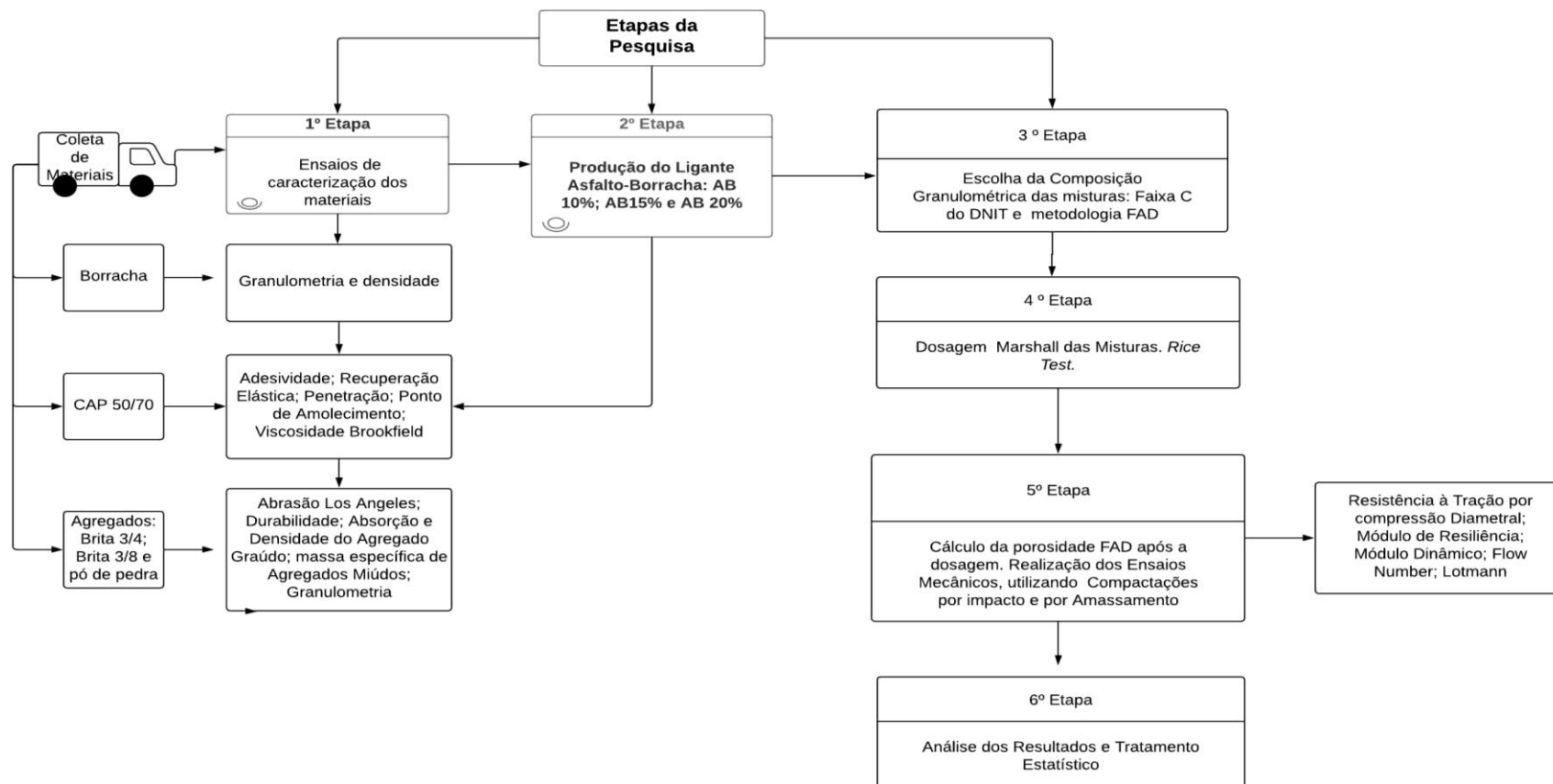


Figura 8: Fluxograma com as etapas da pesquisa. **Fonte:** Autoria Própria.

O método de trabalho adotado teve como base a realização de ensaios laboratoriais para verificar as mudanças provocadas nas misturas convencionais pela adição da borracha em três teores: 10%, 15% e 20% ao ligante convencional, por meio do processo úmido. O desempenho das misturas com adição de borracha foi comparado ao desempenho apresentado pela mistura convencional.

Para a realização de alguns ensaios contou-se com o apoio do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), da Universidade Federal de Campina Grande.

3.2.1 1ª Etapa: Caracterização dos materiais

Durante a primeira etapa foi realizada a coleta e a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. Os seguintes ensaios foram realizados:

- Para a borracha: granulometria e determinação da massa específica real;
- Para os agregados: granulometria, absorção e densidade do agregado graúdo, determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, durabilidade, abrasão Los Angeles e adesividade do ligante ao agregado;
- Para o ligante asfáltico: ponto de amolecimento, ensaio de penetração, viscosidade *Brookfield* e recuperação elástica.

3.2.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado segundo as prescrições da norma DNIT-ME 083/98, tanto para o ensaio realizado com a borracha quanto para o ensaio com os agregados minerais. Para o ensaio com a borracha foram utilizados foi utilizada uma amostra de 1000g de borracha, massa exigida pela norma para os agregados miúdos.

Foram feitas três repetições do ensaio para cada material, após a média aritmética da porcentagem passante em cada uma das peneiras foi calculada, obtendo-se assim a granulometria representativa dos materiais.

3.2.1.2 Determinação da massa específica real para a borracha

Pelo fato de inexistir uma normatização específica, a determinação da densidade real da borracha foi efetuada com base no método utilizado por SALINI (2000). Nesse método, a densidade é medida através do deslocamento de fluido (querosene) gerado pela borracha a uma temperatura constante de 25°C. Assim, foram colocados 12 ml de querosene em um recipiente graduado e determinado o seu peso inicial. A seguir foram adicionados 2 ml de borracha e o conjunto foi novamente pesado (peso final). Conhecendo-se o volume de borracha adicionado e a diferença entre o peso final e inicial foi possível determinar a densidade da borracha.

A aplicação desse método mostrou-se de fácil execução e conferiu uma boa precisão ao ensaio.

3.2.1.3 Absorção e densidade do agregado graúdo

O ensaio de absorção e densidade do agregado graúdo foi realizado para a brita 3/8, brita 3/4, com massas iniciais de 3000g para a brita 3/8 e 2000g para a brita 3/4, conforme o procedimento descrito na norma DNIT – ME 081/98.

3.2.1.4 Massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco Chapman

A determinação da massa específica dos agregados miúdos por meio do frasco *Chapman*, foi realizada conforme a norma DNIT – ME 194/98. O ensaio foi realizado três vezes para a fração pó de pedra. A Figura 9 ilustra o procedimento utilizado para o ensaio, onde a determinação da massa específica é obtida com base no volume de líquido deslocado pelo material.



Figura 9: Determinação da massa específica por meio do Frasco *Chapman*.
Fonte: Autoria Própria.

3.2.1.5 Durabilidade

O ensaio de durabilidade foi realizado com amostras das frações 19 mm e 12 mm, de acordo com as especificações da norma DNIT – ME 089/94, em quantidade de 1.000 g, com 67% da fração 19 mm e 33% da fração 12 mm, submetidas ao ataque por cloreto de bário.

3.2.1.6 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão “Los Angeles” simula a resistência ao desgaste dos agregados. Sua realização seguiu as especificações da norma DNIT – ME 035/98, com peneiramento para obtenção da graduação B, para quantidade de 5000g.

3.2.2 2ª Etapa: Caracterização do ligante asfalto-borracha

3.2.2.1 Produção do Asfalto-Borracha

A mistura do ligante asfáltico com a borracha foi realizada em um misturador mecânico FISATOM, modelo 72, ilustrado na Figura 10.



Figura 10: Miturador mecânico FISATOM, modelo 72 do LEP. **Fonte:** Autoria Própria.

A borracha foi acrescentada ao asfalto em três teores, seguindo as especificações a seguir:

<u>Formulação AB10</u>	<u>Formulação AB15</u>	<u>Formulação AB 20</u>
90% CAP 50/70	85% CAP 50/70	80% CAP 50/70
10% borracha	15% borracha	20% borracha

- ✓ Rotação de 2000rpm (limite máximo apresentado pelo equipamento);
- ✓ Temperatura de 170°C;
- ✓ Tempo de mistura de 60 min.

Para essa formulação inicial foi feita uma mistura com cada teor para que pudesse ser feito o ensaio de adesividade com o asfalto modificado. Após a realização desse ensaio percebeu-se a necessidade do uso de melhoradores de adesividade, dessa forma o asfalto-borracha foi produzido com a seguinte formulação:

<u>Formulação AB10%</u>	<u>Formulação AB15%</u>	<u>Formulação AB20%</u>
89,8% CAP 50/70	84,8% CAP 50/70	79,8% CAP 50/70
10% borracha	15% borracha	20% borracha
0,2% Dope	0,2% Dope	0,2% Dope

A escolha dos teores de borracha, assim como da velocidade e do tempo de mistura ocorreu por meio de valores comuns encontrados nas referências (ROSA *et al.*, 2012; ODA & FERNANDES JÚNIOR; FAXINA, 2006; DNIT 111/2009).

3.2.2.2 Ensaio de Adesividade

O ensaio de adesividade tem por objetivo verificar a adesão do asfalto ao agregado. Nesse ensaio, 500g de agregados foram cobertos com ligante asfáltico e colocados em um frasco de vidro com água, submetendo-os a 72 horas de exposição à temperatura de 40°C na estufa, conforme descrito pela norma DNIT – ME 078/94.

Após esse período verificou-se se houve descolamento total ou parcial da película de asfalto

3.2.2.3 Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento foi realizado segundo as diretrizes da norma DNIT – ME 131/2010, através do método anel e bola. O ensaio foi repetido três vezes, considerando-se a média dos resultados como valor representativo para o ponto de amolecimento.

3.2.2.4 Penetração

O ensaio de ponto de amolecimento foi realizado segundo as diretrizes da norma DNIT – ME 131/2010, através do método anel e bola. O ensaio foi repetido três vezes, considerando-se a média dos resultados como valor representativo para o ponto de amolecimento.

3.2.2.5 Viscosidade Brookfield

A Figura 11 ilustra o viscosímetro utilizado para a realização desse ensaio. O ensaio foi realizado com base na norma ASTM D4402/D4402M – 12, fornecendo os valores da viscosidade do ligante asfáltico quando submetido às temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C. Este ensaio foi realizado em triplicata e serviu como base para a determinação da temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas, por meio da elaboração das curvas de temperatura *versus* viscosidade conforme procedimento especificado em (BERNUCCI *et al.*, 2008)



Figura 11: Ilustração do Viscosímetro Brookfield - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. **Fonte:** Autoria Própria.

3.2.2.6 Recuperação Elástica

O ensaio de recuperação elástica foi realizado em um ductilômetro com amostra imersa em solução aquosa a uma temperatura de 25 °C, conforme as diretrizes da norma DNIT 131/2010.

3.2.2.7 Estabilidade a Estocagem

Além dos ensaios anteriormente citados, para o asfalto-borracha também foi realizado o ensaio de estabilidade, com base na norma DNER-ME 384/1999, com o objetivo de verificar a homogeneidade da mistura entre o asfalto e a borracha.

3.2.3 3ª Etapa: Escolha da composição granulométrica das misturas

Para determinação da composição dos agregados utilizou-se o método de tentativas e erro para o enquadramento da mistura na faixa C do DNIT. Também foi utilizada a metodologia FAD para estimar se a granulometria escolhida forneceria uma boa capacidade de resistência à deformação permanente à mistura. Essa estimativa foi realizada por meio do cálculo da porosidade FAD.

Para o cálculo da porosidade antes do processo de dosagem, foram utilizados os valores médios sugeridos na norma DNIT 031/2006 – ES para o volume de vazios (Vv) e para a relação de betume/vazios (RBV). Desse modo, foi possível estimar um VAM e a porosidade FAD.

A composição granulométrica foi escolhida de modo que a sua porosidade FAD ficasse dentro dos limites do grupo 1, de bom desempenho, categorizado por CHUN, *et. al.* 2017. Desse modo, utilizou-se uma composição, pertencente a classe C do DNIT, que apresentou porosidade FAD igual a 39%, valor que para o autor é fator que indica uma provável capacidade da mistura de apresentar boa resistência à deformação permanente.

3.2.4 4ª Etapa: Dosagem Marshall

Nessa etapa foram realizadas as dosagens das misturas pelo método Marshall, determinando-se o teor de projeto segundo esse método.

Foram realizadas quatro dosagens, uma com o ligante asfáltico convencional e outras três para o ligante modificado (uma dosagem para cada teor de borracha incorporado). Para o ligante puro foram moldados corpos-de-prova com teores de ligante: 4%, 4,5%, 5%, 5,5% e 6% em relação ao peso total da mistura asfáltica.

Para os ligantes modificados partiu-se de um maior teor inicial, visto que as referências sugerem um maior teor de ligante (THIVES, 2009). Desse modo, utilizaram-se para dosagem os teores de 5%, 5,5%, 6%, 6,5% e 7%.

Para cada teor foram moldados um conjunto com três corpos-de-prova e calculados os parâmetros volumétricos da Tabela 4. A determinação da densidade máxima (Gmm) da mistura foi feita pelo ensaio preconizado na metodologia *SUPERPAVE*, o *Rice test*, por meio do procedimento estabelecido na norma ASTM D2041, segundo a equação 5:

$$Gmm = \frac{A}{A - (C - B)} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

A = massa da amostra seca ao ar;

B = massa do recipiente metálico imerso em água (g);

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

A Figura 12 ilustra o equipamento utilizado para a determinação da Gmm.

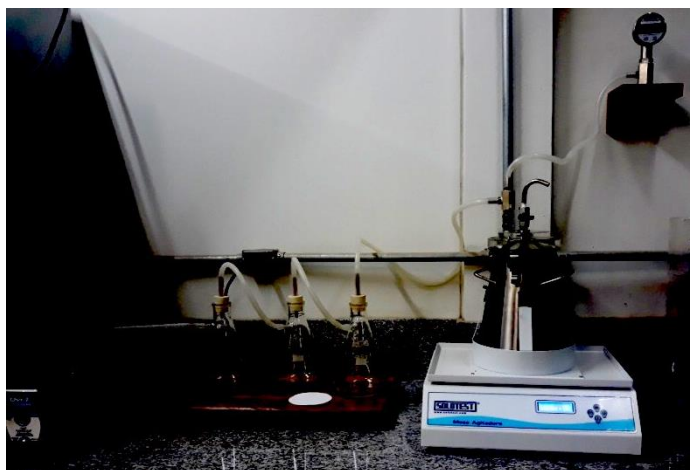


Figura 12: Equipamento utilizado para determinação da Gmm- Laboratório de Pavimentação e Geotecnia - LAPAV/UFPB. **Fonte:** Autoria Própria.

O teor de projeto do ligante asfáltico foi escolhido com base na porcentagem de volume de vazios igual a 4%, na máxima densidade aparente e na máxima estabilidade.

3.2.5 5ª Etapa: Ensaios mecânicos

Após a definição do teor de projeto do ligante asfáltico para cada mistura foram moldados os corpos-de-prova para realização dos ensaios mecânicos.

Os ensaios mecânicos realizados foram: resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, módulo dinâmico, *Flow number* e dano por umidade induzida. Nessa fase, para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e dano por umidade induzida, os corpos-de-prova foram moldados tanto pelo método Marshall, quanto pela metodologia Superpave.

Para o teor de 20% de borracha não foi possível à realização da compactação pela metodologia SUPERPAVE, pois se percebeu uma reação súbita dos corpos-de-prova, como se estes estivessem se comportando como um conjunto de molas elásticas, que quando comprimidas, diminuem de volume, mas após retirada a força de compressão retornam subitamente a sua condição inicial. Fato semelhante foi observado por HAFEZ & WITCZAK (1995) *apud* BERTOLO (2002) que trabalharam com o processo por via seca.

Os ensaios de módulo dinâmico e *Flow Number* foram realizados apenas pela metodologia SUPERPAVE e, portanto, somente para as misturas com ligante convencional, AB 10% e AB15%.

Nesta etapa também foram utilizados os parâmetros volumétricos determinados na dosagem da fase anterior para encontrar a porosidade real das misturas produzidas, segundo a metodologia FAD.

3.2.5.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral (RT) foi desenvolvido pelo professor brasileiro, Lobo Carneiro no Rio de Janeiro.

Esse ensaio consiste na aplicação de cargas de compressão por meio de frisos metálicos ao longo do diâmetro do corpo-de-prova que provocam a ruptura por tração. O ensaio foi realizado conforme a norma DNIT ME 136/2010, e a produção dos corpos-de-prova feita com utilização das compactações por impacto e por amassamento.

A resistência à tração foi determinada pela Equação 6:

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

Onde:

σ_t = resistência à tração (MPa);

F = carga de ruptura (kgf/cm²);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm).

3.2.5.2 Módulo de Resiliência

Esse ensaio foi realizado na prensa hidráulica UTM-25, seguindo os preceitos da norma brasileira NBR 16018/2011. Durante o ensaio, pulsos de carga são aplicados no plano diametral vertical dos corpos-de-prova com uma frequência de 1Hz e duração de 0,1s, seguidos de 0,9s de repouso. Por meio dos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) colocados nos corpos-de-prova mediu-se a deformação recuperável na direção correspondente a tensão aplicada (CARVALHO, 2018).

Para o ensaio foi aplicada uma força correspondente a 10% do valor encontrado para a RT. Assim como para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para este ensaio também foram moldados corpos-de-prova por meio do método de compactação Marshall e Superpave. A Figura 13 ilustra o equipamento utilizado para o ensaio.

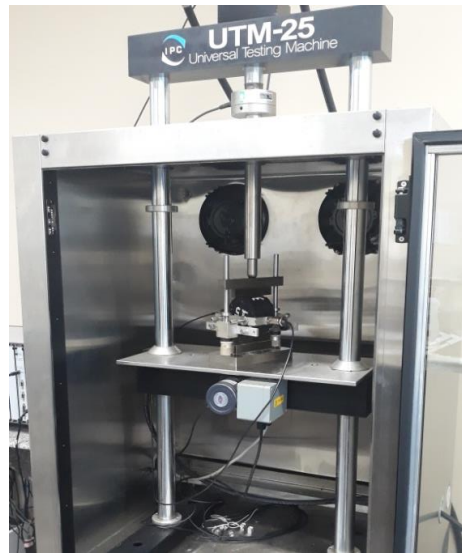


Figura 13: Prensa Hidráulica utilizada para realização do ensaio - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. **Fonte:** Autoria Própria.

3.2.5.3 Ensaio de Dano Por Umidade Induzida

Esse ensaio tem como objetivo determinar os efeitos deletérios provocados pela umidade, para simular esse efeito o corpo-de-prova é moldado de modo que obtenha volume de vazios em torno de $7 \pm 1\%$.

Para o ensaio foram moldados seis corpos-de-prova para cada teor, metade desses corpos de prova foi submetida a uma condição de confinamento, passando por ciclos de gelo e degelo. Após o período de confinamento obteve-se o dano por umidade por meio da razão entre a resistência à tração apresentada pelos corpos confinados e os não-confinados.

O ensaio foi realizado com base na norma AASHTO T 283/2002 e para a moldagem dos corpos-de-prova foram utilizadas as compactações Marshall e SUPERPAVE.

3.2.5.4 Flow Number

Este ensaio fornece dados sobre a capacidade da mistura de resistir à deformação permanente. Para sua realização foram utilizados ciclos de carga uniaxial compressiva da ordem de 204 kPa, com base na norma brasileira NBR 16505/2016.

Os corpos-de-prova moldados para o ensaio tem dimensões de aproximadamente 100mm de diâmetro e 150mm de altura e volume de vazios de 7%.

Devido à falta de molde para a compactação Marshall com essas dimensões, para este ensaio não foram moldados corpos-de-prova com energia de compactação por impacto, apenas por amassamento. A Figura 14 apresenta o equipamento utilizado para realização do ensaio.

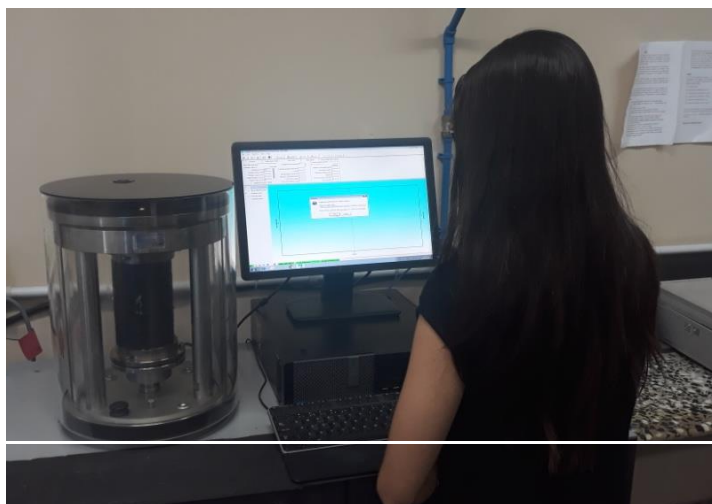


Figura 14: AMPT- Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.
Fonte: Autoria Própria.

3.2.5.5 Módulo Dinâmico

Esse ensaio foi realizado segundo os preceitos da norma AASHTO TP-62/2009, utilizando corpos-de-prova semelhantes aos utilizados para o ensaio de *Flow Number*. Dessa forma, este ensaio também só foi realizado pela metodologia *SUPERPAVE*.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial compressiva sobre o corpo-de-prova submetido a diferentes temperaturas e sob diferentes frequências de aplicação de carga, tendo como objetivo caracterizar a rigidez e as propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas.

3.3.6 6ª Etapa: Análise de variância

Nesta etapa foi feita a análise estatística dos resultados, com a utilização do software PAST. Como nessa pesquisa o interesse foi à análise do desempenho das misturas com a adição de diferentes teores de borracha (tratamentos) foi feita uma análise da variância (ANOVA) e aplicação da estatística F (Fisher Snedcor), para verificar se haviam diferenças significativas entre as médias obtidas durante os ensaios para cada tipo de

mistura, em caso afirmativo foi aplicado o teste de Tukey para verificar quais ligantes ocorriam diferenças significativas.

A análise de variância baseia-se na decomposição da variação total da variável resposta em partes que podem ser atribuídas aos tratamentos (variação entre os grupos), e ao erro experimental (variação dentro dos grupos). Essa variação é medida por meio das somas de quadrados definidas para esses componentes.

Este trabalho limitou-se a verificar se haviam diferenças significativas entre as médias apresentadas para cada tipo de ligante durante para cada ensaio realizado, não foram realizados testes para indicar qual o tratamento utilizado.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Borracha

4.1.1 Granulometria

A Tabela 5 apresenta os dados obtidos com o ensaio de granulometria para a borracha. Com os resultados obtidos foi possível traçar a curva granulométrica da borracha, ilustrada na Figura 15.

Tabela 5: Análise Granulométrica da Borracha. **Fonte:** Autoria Própria.

Peneira	Abertura (mm)	% Passante (Média obtida)
16	1,18	100,00
30	0,59	30,17
40	0,42	15,42
50	0,30	6,89
60	0,25	3,37
80	0,18	0,56
100	0,15	0,30

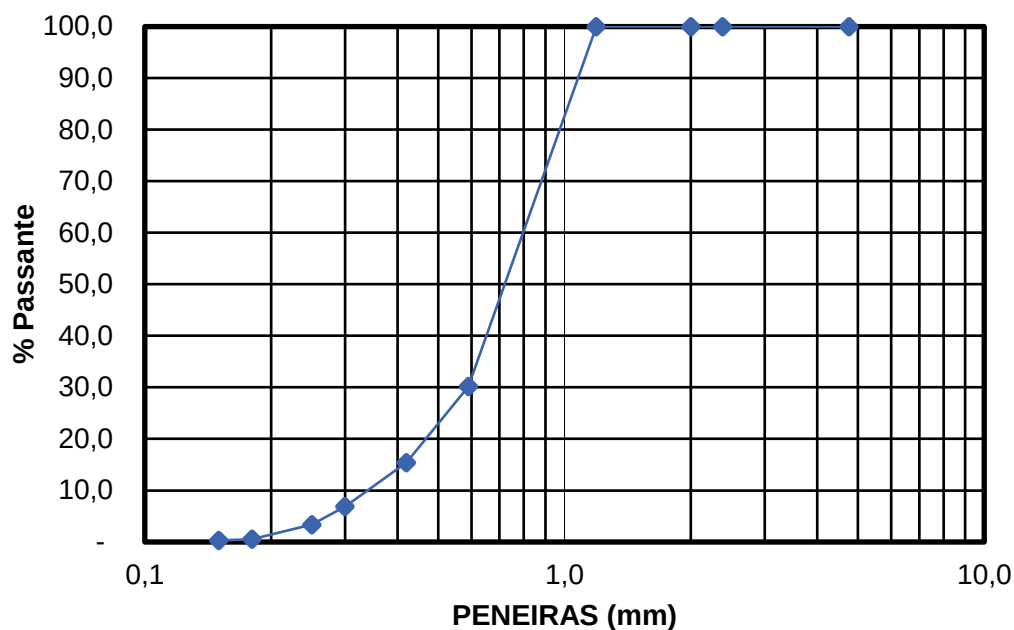


Figura 15: Curva Granulométrica da Borracha. **Fonte:** Autoria

Com os resultados obtidos percebe-se que quase 70% do material ensaiado tem granulometria entre 1,18 e 0,59 mm. O intervalo entre 0,42 e 0,59 mm é o segundo com maior porcentagem, representando 14,75% do material. Dessa forma, percebe-se que os intervalos menores representam a menor parte da granulometria dos agregados. De acordo com a Tabela 5 observa-se que a borracha utilizada na pesquisa se encontra dentro dos limites comuns verificados por PRESTI (2013), na Tabela 3.

4.1.2 Densidade

Os resultados obtidos com a aplicação do método de SALINI, 2000 para determinação da densidade real da borracha encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Densidade real da Borracha. **Fonte:** Autoria Própria.

Leitura	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Densidade	Densidade Média
1	9,63	11,62	1,00	0,99
2	9,61	11,56	0,98	
3	9,58	11,56	0,99	
4	9,49	11,49	1,00	

Foram realizadas quatro repetições para o ensaio obtendo-se por meio da média aritmética dos resultados a densidade real representativa para a borracha utilizada na pesquisa.

A densidade média encontrada de 0,99 aproximou-se do valor de 1,05 encontrado por BARBOSA (2016), que utilizou em seu estudo sobre a incorporação de borracha por meio do processo seco, uma borracha proveniente da mesma renovadora de pneus que forneceu a borracha para esta pesquisa. Acredita-se que o valor um pouco abaixo se deu por conta das diferenças entre as granulometrias utilizadas.

4.2 Agregados

A Tabela 7 apresenta o resumo das médias obtidas para os ensaios de: massa específica no frasco Chapman para agregados miúdos, abrasão Los Angeles e durabilidade, assim como os limites estabelecidos pelas normas para utilização desses materiais.

Tabela 7: Resultados obtidos com os ensaios de caracterização dos agregados.**Fonte:** Autoria Própria.

Ensaio	Unid	Limites	Resultado
Abrasão Los Angeles	%	< 50% DNIT ES 031/2006	27,53
Durabilidade	%	< 12% DNIT ES 031/2006	1
Massa específica agregados miúdos	g /cm ³	MOGHADDAM <i>et al.</i> (2014) = 2,60	2,64
Massa específica brita ¾”	g /cm ³	NEJAD <i>et al.</i> (2013) = 2,65	2,63
Absorção brita ¾”	%	NETO (2011) = 0,5	0,51
Massa específica brita 3/8”	g /cm ³	NEJAD <i>et al.</i> (2013) = 2,65	2,67
Absorção brita 3/8”	%	ASSIS (2015) = 0,7	0,79

A norma DNIT ES 031/2006 estabelece limites máximos de 50 e 12%, respectivamente para o desgaste por abrasão Los Angeles e para a perda de material ocorrida no ensaio de durabilidade. Desse modo, por esses parâmetros os agregados utilizados na pesquisa possuem os requisitos para serem utilizados em obras de pavimentação.

Os valores médios encontrados para as massas específicas dos agregados mostraram-se próximos aos valores presentes nas referências para os agregados graníticos. Autores como MOGHADDAM *et al.* (2014) e NEJAD *et al.* (2013), por exemplo, encontraram valores entre 2,60 e 2,65 g/cm³ para as frações graúdas e miúdas.

A absorção apresentada pelos agregados também se apresentou em conformidade com a literatura existente para os agregados graníticos. Valores da ordem 0,5% para o agregado graúdo foram observados por NETO (2011). ASSIS (2015) encontrou valores da ordem de 0,7% para a brita ¾” e de 1,1% para a brita 3/8”.

4.2.1 Granulometria

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos com a análise granulométrica do pó de pedra, da brita $\frac{3}{4}$ " e da brita $\frac{3}{8}$ ". Com estes resultados pode-se obter a curva granulométrica desses materiais, conforme ilustra a Figura 15.

Tabela 8: Resumo da Granulometria dos Agregados. **Fonte:** Autoria Própria.

Peneira	Abertura (mm)	Pó de Pedra	Brita $\frac{3}{8}$ "	Brita $\frac{3}{4}$ "
		% Passante	% Passante	% Passante
1 $\frac{1}{2}$ "	38,10	100	100	100
1"	25,40	100	100	100
$\frac{3}{4}$ "	19,10	100	100	98,13
$\frac{1}{2}$ "	12,70	100	100	42,75
$\frac{3}{8}$ "	9,50	100	96,25	14,53
Nº4	4,80	97,24	30,93	1,06
Nº10	2,00	65,48	8,51	0,81
Nº40	0,42	28,87	4,53	0,78
Nº80	0,18	14,33	3,16	0,66
Nº200	0,075	4,71	1,32	0,39

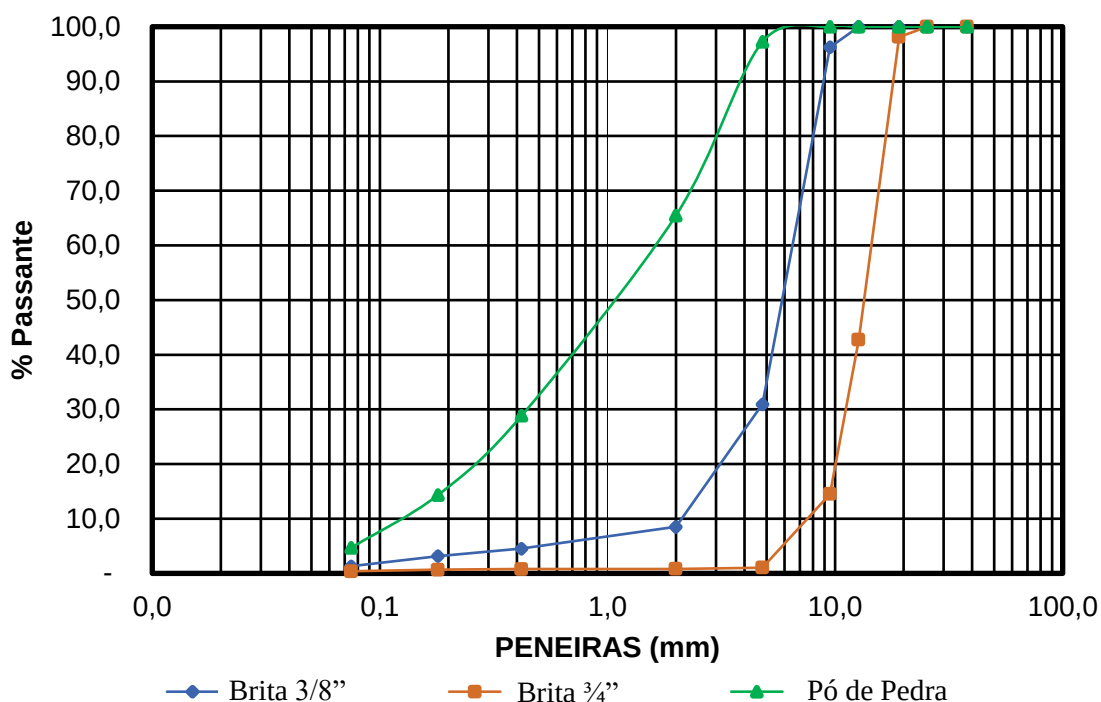


Figura 16: Curva Granulométrica dos Agregados. **Fonte:** Autoria Própria.

De acordo com a Figura 16, a análise da granulometria de cada material permite observar que há uma concentração de material em determinadas peneiras de acordo com a variação de tamanho de cada agregado. O pó de pedra, por ser o material de menor granulometria possui concentração de material em peneiras de menor abertura que a brita 3/8'' e 3/4''. Da mesma forma, a brita 3/4'' por ser o maior dos agregados utilizados apresenta concentração de material em peneiras de maior abertura.

Por meio da análise do formato da curva granulométrica do pó de pedra pode-se afirmar que este possui uma curva bem graduada, com ampla variação de abertura de peneiras. O formato íngreme das curvas granulométricas das brita 3/8'' e brita 3/4'' permitem classificá-las como uniformes. Nesse tipo de curva o formato íngreme se deve a concentração de material em uma pequena faixa de abertura de peneiras.

4.2.2 Escolha da Composição Granulométrica da Mistura

Após a realização desses ensaios foi determinada a composição da mistura. Essa composição foi determinada de modo que atendesse aos limites da faixa C do DNIT, prescritos na norma DNIT 031/2006 – ES.

Baseando-se na granulometria dos materiais e por meio do método de tentativas e erro chegou-se a uma composição com proporções de: 21% de brita 3/4'', 30% de brita 3/8'' e

49% de pó de pedra atenderia aos requisitos da faixa C. Essa composição inicial foi testada segundo a metodologia FAD, quanto a sua capacidade de resistir à deformação permanente.

Para aplicação dessa metodologia utilizou-se para a mistura um volume de vazios de 4% e um RBV igual a 79%, esses valores correspondem às médias dos limites apresentados pela norma DNIT 031/2006 – ES para esses parâmetros.

Por meio desses valores foi calculada uma estimativa para o VAM, encontrando-se um valor igual a 18,6%. Após a determinação do VAM foi feito o esboço do diagrama de interação (Figura 17) para escolha da FAD.

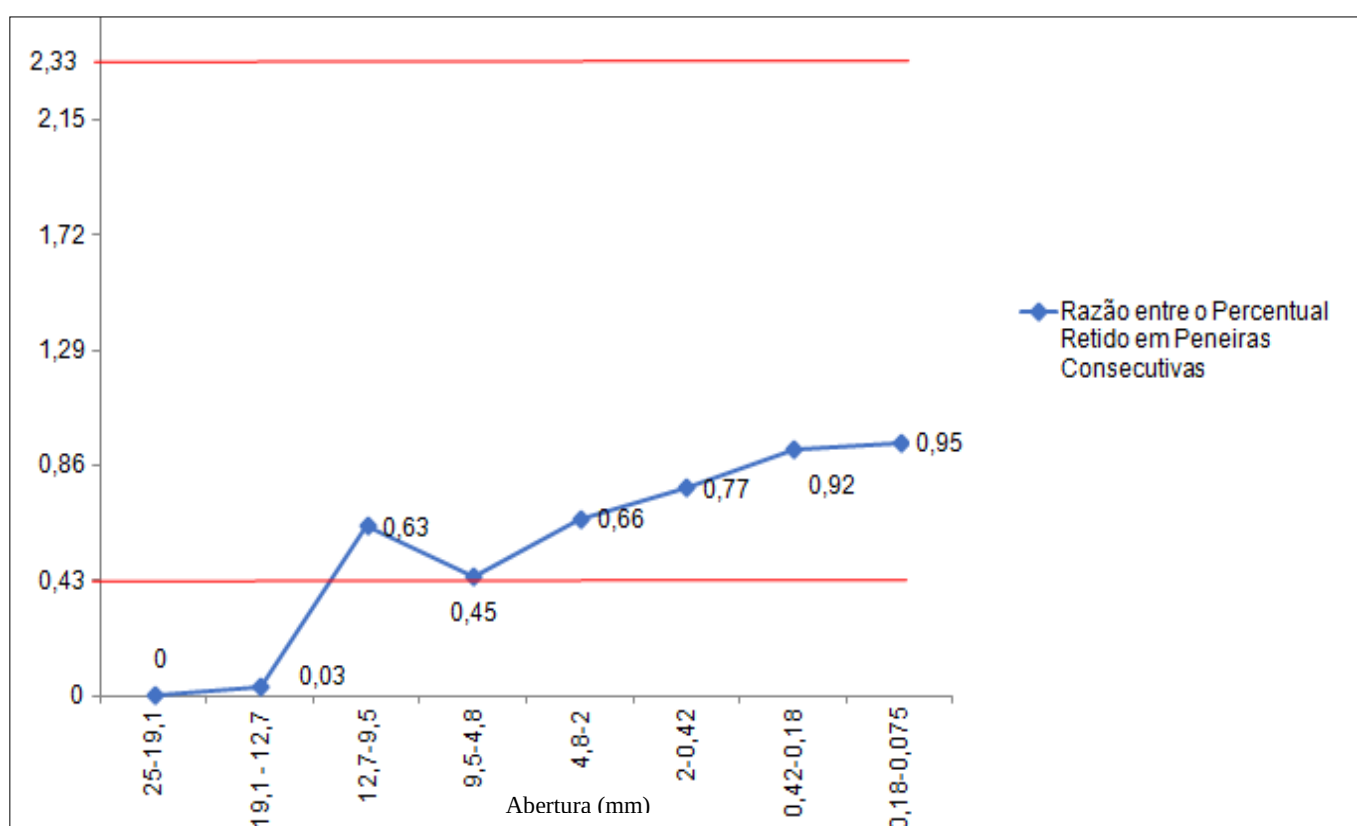


Figura 17: Diagrama de Interação. **Fonte:** Autoria Própria.

Para a construção do diagrama de interação foram utilizadas as porcentagens de materiais retidos em peneiras contíguas. Para a escolha da FAD, valores com razão de material retido abaixo ou acima dos limites entre 0,43 e 2,33 não podem ser escolhidos, assim como agregados com granulometria inferior a 1,18 mm.

Diante dessas especificações, foi escolhido o intervalo entre 2 e 4,8 mm para composição da FAD. Após a escolha da FAD foi realizado o cálculo da sua porosidade por meio da equação 1, obtendo-se o valor de 39%.

Como o valor obtido foi enquadrado no grupo 1, determinado como de bom desempenho segundo CHUN *et al.* (2017), não foram feitas mudanças nas proporções da composição granulométrica da mistura.

Desse modo, a curva granulométrica determinada para a mistura foi à ilustrada na Figura 18.

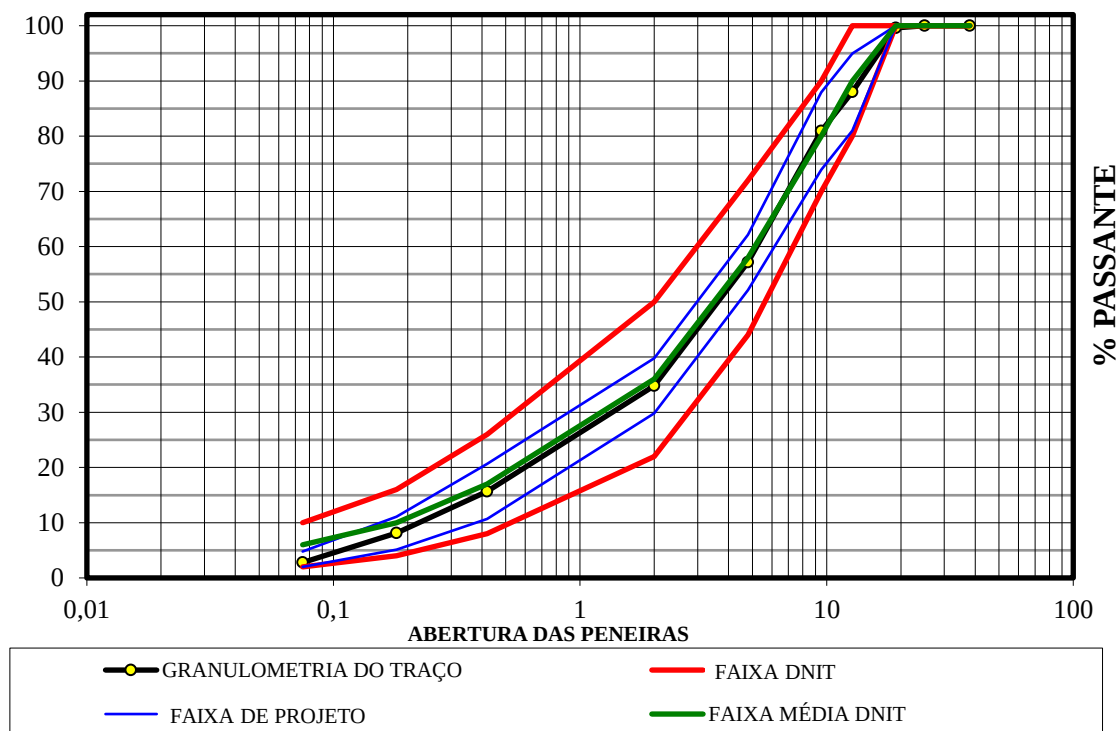


Figura 18: Curva Granulométrica da mistura. **Fonte:** Autoria Própria.

Por meio da Figura 18, observa-se que a curva granulométrica do traço escolhido, é bem graduada e se encontra quase ao meio dos limites máximo e mínimo da Faixa do DNIT.

4.2.3 Adesividade

A Figura 19 ilustra o resultado obtido para o ensaio de adesividade com o CAP 50/70, com deslocamento parcial da película de asfalto.



De acordo com a Figura 19 pode-se perceber que a adesividade foi insatisfatória, pois ocorreu descolamento da película de asfalto que recobria os agregados. A origem granítica dos agregados é um dos fatores que justificam esse comportamento, já que este tipo de agregado não possui uma boa afinidade ao asfalto.

Para melhorar a capacidade de adesão do asfalto ao agregado foi utilizado um melhorador de adesividade. Para a escolha do teor de adição do melhorador foram avaliados os efeitos de sua adição nos teores de 0,2% e 0,4% em substituição parcial ao ligante asfáltico. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 20.



Figura 20: Resultados obtidos para o ensaio com a utilização do melhorador de adesividade em dois teores a) 0,2% e b) 0,4%. **Fonte:** Autoria Própria.

De acordo com a Figura 20, pode-se constatar o resultado satisfatório para os dois teores de DOPE, pois não ocorreu descolamento da película de asfalto. Como foi verificado um bom desempenho para os dois teores analisados optou-se pelo uso do menor teor de DOPE, para que fosse minimizado o risco de interferência desse produto em outras propriedades da mistura ou do ligante asfáltico.

O ensaio de adesividade também foi realizado com os ligantes AB 10%, AB 15% e AB 20%, sendo observado que estes possuíram uma melhor adesão aos agregados em relação ao CAP 50/70, porém ocorreu descolamento da película asfalto-borracha com os três ligantes. Dessa forma foi também acrescentado a estes ligantes o melhorador de adesividade no teor de 0,2%.

4.3 Caracterização Física do Ligante Asfáltico

Os ensaios de caracterização foram realizados para os quatro tipos de ligantes asfálticos utilizados na pesquisa, sendo eles:

- ✓ CAP 50/70 + 0,2% DOPE;
- ✓ AB 10% + 0,2% DOPE;
- ✓ AB 15% + 0,2% DOPE;
- ✓ AB 20% + 0,2% DOPE.

Para uma maior praticidade, a partir daqui foram denominados como CAP 50/70, AB 10%, AB 15% e AB 20%, respectivamente.

4.3.1 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração, assim como os demais ensaios foi realizado com três repetições para obtenção de uma média. Os resultados obtidos para o ensaio encontram-se ilustrados no gráfico da Figura 20.

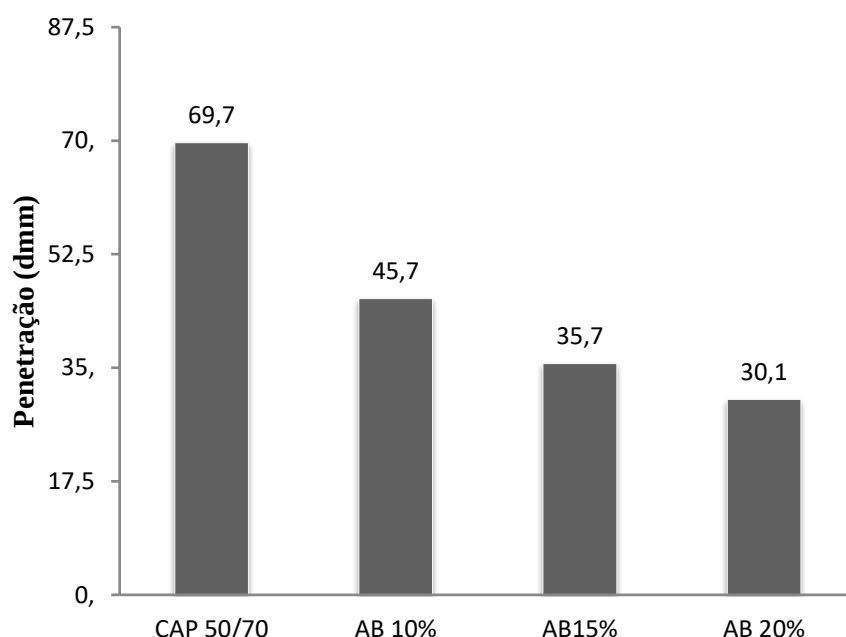


Figura 21: Resultados obtidos para o ensaio de penetração. **Fonte:** Autoria Própria.

Pela Figura 21, pode-se perceber que com o acréscimo do teor de borracha, o valor da penetração tende a reduzir, o que indica um aumento da consistência do asfalto com o aumento dos teores de borracha. Essa tendência encontra-se em conformidade com a tendência observada em outros estudos (SPETCH, 2004; ODA, 2001) e com limites estabelecidos para o ensaio, pela norma DNIT 111/2009 para o asfalto-borracha *Terminal Blend*, por representar o tipo de asfalto-borracha comumente comercializado e por não existirem normas específicas para o asfalto-borracha do tipo *Continuos Blend*.

Para o CAP 50/70 observa-se que este apresenta uma penetração próxima ao limite de sua classificação (70 dmm), indicando que este possui uma menor consistência. Cada cada tipo de ligante o ensaio de penetração foi realizado três vezes, para que fosse realizada posteriormente a análise da variância e aplicada a estatística F (Fisher Snedecor), considerando-se uma distribuição normal. Os resultados obtidos foram representados na Tabela 9.

Tabela 9: Tabela ANOVA para o ensaio de penetração. **Fonte:** Autoria Própria.

Varição	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	2757,0	3,0	919,0	1391,1
Dentro	5,3	8	0,7	
Total	2762,3	11		

Para o nível de significância de 5% e para os graus de liberdade 3 e 8 encontra-se um F tabelado igual a 7,56. Como o valor F calculado é maior que o F tabelado pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre os tipos de ligante com relação à penetração. O teste de Tukey aplicado por meio do Software *PAST*, permitiu verificar que as maiores diferenças ocorreram entre o CAP 50/70 e os asfaltos modificados.

Por meio da Tabela 9, observa-se ainda que o fator tipo de ligante influencia em cerca de 99% os valores obtidos para a penetração.

4.3.2 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Os resultados obtidos para o ensaio de ponto de amolecimento foram ilustrados na Figura 22.

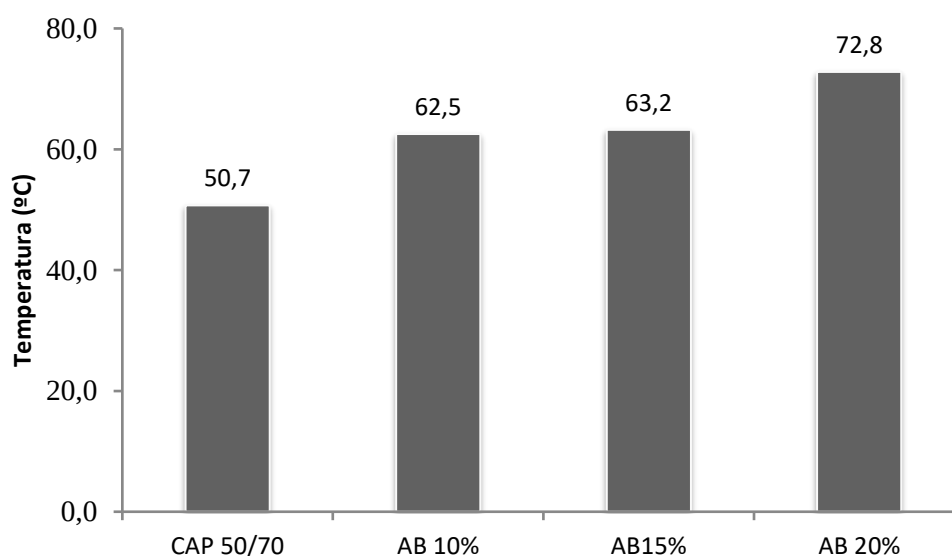


Figura 22: Resultados - Ponto de Amolecimento. **Fonte:** Autoria Própria.

Por meio dos resultados observados na Figura 22, pode-se afirmar que o aumento da temperatura do ponto de amolecimento é diretamente proporcional à adição de borracha. Comportamento semelhante foi verificado por SPETCH (2004). Isso pode ocorrer devido ao aumento da consistência dos ligantes, fator que exige maiores temperaturas para a mudança de fase do ligante. Ainda, verifica-se que o ensaio apresentou resultados acima do limite mínimo, de 51,7°C estabelecido pela norma ASTM D6114.

Para esse ensaio também foi aplicada a análise de variância, sendo esta apresentada na Tabela 10. Para sua construção foram considerados quatro tratamentos (4 tipos de ligante asfáltico) e três repetições para o ensaio.

Tabela 10: Tabela ANOVA para o ensaio de Ponto de Amolecimento. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	744,73	3,00	248,24	567,40
Dentro	3,50	8,00	0,44	
Total	748,23	11,00		

O valor do F calculado para este ensaio foi maior que o valor do F tabelado de 7,56, o que indica que existem diferenças significativas entre as médias apresentadas para os quatro tipos de ligantes em relação ao ensaio de ponto de amolecimento, para um nível de significância de 5%. A aplicação do teste de Tukey indicou que assim como para a penetração as maiores diferenças ocorreram entre o ligante convencional e os modificados.

4.3.3 Ensaio de Estabilidade à Estocagem

Este ensaio foi realizado com apenas uma repetição, para os ligantes modificados com borracha, por isso para este ensaio não foi realizada a análise de variância. Os resultados foram obtidos por meio da diferença entre o ponto de amolecimento do ligante obtido no topo e fundo do recipiente. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos com o ensaio, para os quatro tipos de ligante.

Tabela 11: Resultados do Ensaio de Estabilidade à Estocagem. **Fonte:** Autoria Própria.

Ligante	Ponto de Amolecimento Topo (°C)	Ponto de Amolecimento Fundo (°C)	Diferença (°C)
AB 10%	61,0	63,5	2,5
AB 15%	64,0	69,0	5
AB 20%	71,0	77,0	6

De acordo com a Tabela 11, pode-se constatar que as diferenças entre o ponto de amolecimento do topo e do fundo indicam uma heterogeneidade na mistura do asfalto com a borracha.

As diferenças observadas entre os pontos de amolecimento no topo e no fundo indicam a ocorrência de sedimentação por parte da borracha, que pode provocar uma separação de fases entre o asfalto e a borracha.

Com os resultados obtidos, pode-se verificar que essa tendência foi mais acentuada para os asfaltos-borracha com maiores teores de borracha, AB 15% e AB 20%. Apesar das diferenças observadas, estas encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma DNIT 111/2009, que estabelece o limite máximo de 9°C para as diferenças do valor do ponto de amolecimento no topo e no fundo.

4.3.4 Ensaio de Recuperação Elástica

O ensaio de recuperação elástica foi realizado em triplicata para os quatro tipos de ligantes asfálticos utilizados nessa pesquisa. Os resultados obtidos com o ensaio foram apresentados no gráfico da Figura 23.

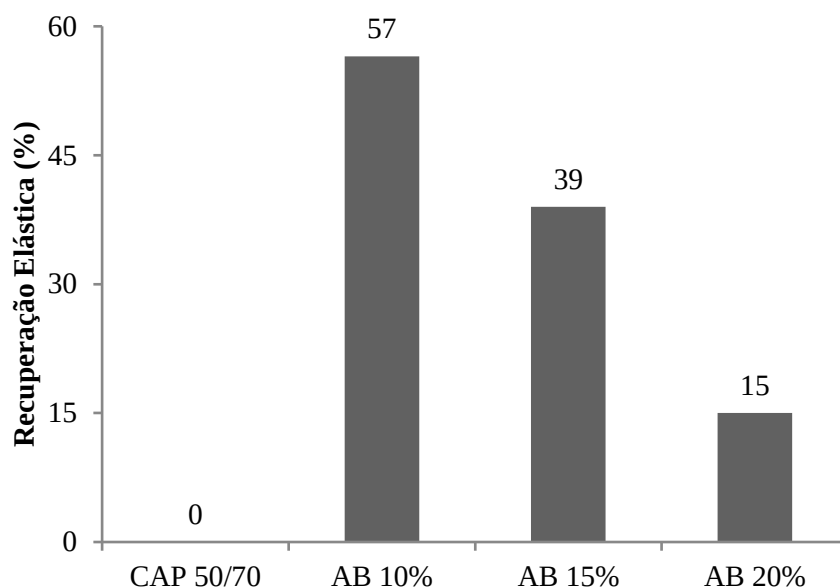


Figura 23: Resultados obtidos com o ensaio de Recuperação Elástica. **Fonte:** Autoria Própria.

Por meio do gráfico da figura 23 pode-se observar que o CAP 50/70 não apresenta capacidade de recuperação elástica. Durante a realização do ensaio esse ligante rompeu-se antes do estiramento mínimo de 20 cm, necessário para o começo de sua realização. Para os ligantes com adição de borracha foi observada uma diminuição da recuperação elástica, com o aumento do teor de borracha.

Esse fato pode ser justificado pela maior heterogeneidade apresentada pelos ligantes com maiores teores de borracha, verificada pelo ensaio de estabilidade à estocagem. Mesmo assim, pode-se observar um incremento da capacidade de recuperação elástica para os três tipos de ligante asfalto-borracha em relação ao CAP 50/70.

A análise de variância foi também aplicada a este ensaio, com utilização do Software *Past*, sem levar em consideração o CAP 50/70, que não obteve resultados para este ensaio. A Tabela 12 apresenta a ANOVA para o ensaio de recuperação elástica.

Tabela 12: Tabela ANOVA para o ensaio de Recuperação Elástica. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	2604,5	2	1302,3	279,1
Dentro	28	8	1,75	
Total	2632,5	6		

A Tabela 12 construída para o nível de 5% de significância indica que dentre outros fatores que exercem influencia sobre o ensaio cerca de 98% dos resultados são influenciados pelo fator tipo de ligante. Dessa forma, as diferenças entre as médias obtidas para o ensaio por cada ligante foram significativas.

A aplicação do teste de Tukey indicou que as maiores diferenças foram obtidas entre o ligante AB 10% e o AB 15%; entre o ligante AB 10% e o AB 20%; e entre o ligante AB 15% e AB 20%.

4.3.5 Viscosidade Brookfield

O ensaio de viscosidade rotacional Brookfield foi realizado em três temperaturas: 135°C, 150°C e 177°C, utilizando o *spindle* 27. Os resultados obtidos para os quatro ligantes podem ser observados no gráfico da Figura 24.

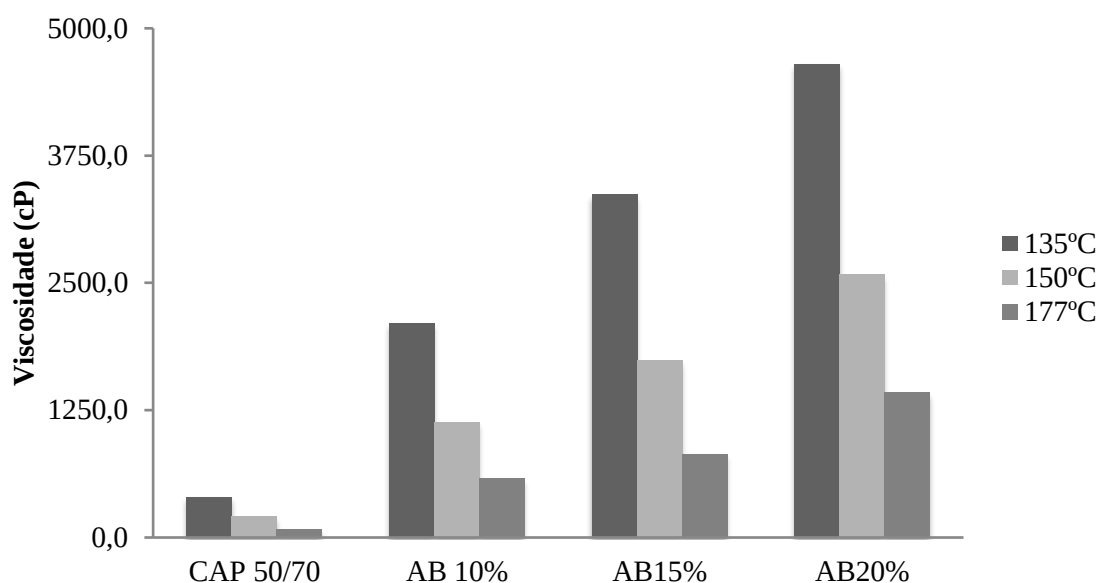


Figura 24: Resultados obtidos do ensaio de Viscosidade. **Fonte:** Autoria Própria.

Por meio da análise do gráfico da Figura 24 pode-se observar que a viscosidade tende a aumentar com o aumento dos teores de borracha. A viscosidade é um dos efeitos que mais sofrem influência com o aumento da porcentagem de borracha, conforme THIVES (2009) e ODA (2001). Pode-se perceber ainda, que a temperatura exerce influência sobre esta propriedade, verificando-se menores valores de viscosidade para temperaturas mais elevadas. Os valores obtidos no ensaio encontram-se dentro dos limites determinados pela norma ASTM 6114.

Este ensaio também foi realizado em triplicata. A análise da variância foi feita de modo separado para cada uma das três temperaturas, de modo a verificar apenas a influência do teor de borracha sobre a viscosidade.

As Tabela 13, 14 e 15 apresentam as tabelas ANOVA para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C.

Tabela 13: Tabela ANOVA para a viscosidade à 135°C. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	29627216,7	3,0	9875738,9	226,81
Dentro	348333,3	8,0	43541,7	
Total	29975550,0	11,0	2725050,0	

Tabela 14: Tabela ANOVA para a viscosidade à 150°C. **Fonte:** Autoria Própria.

Varição	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	9014556,8	3,0	3004852,3	279,56
Dentro	85988,5	8	10748,6	
Total	9100545,3	11	827322,3	

Tabela 15: Tabela ANOVA para a viscosidade à 177°C. **Fonte:** Autoria Própria.

Varição	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	2796361,7	3,0	932120,6	130,58
Dentro	57108,3	8,0	259406,4	
Total	2853470,1	11,0	7138,5	

De acordo com as Tabelas 13, 14 e 15, observa-se que assim como para os ensaios anteriores, cerca de 99% dos resultados obtidos para a viscosidade são influenciados pelo fator tipo de ligante. Os valores de Fcalculado foram superiores, nas três situações ao Ftabelado, o que indicou que existem diferenças significativas entre as médias obtidas de viscosidade para todos os ligantes. O teste de Tukey indicou que as diferenças mais significativas ocorreram entre o CAP 50/70 e os ligantes modificados.

4.4 Dosagem Marshall

4.4.1 Determinação das Temperaturas de Usinagem e Compactação

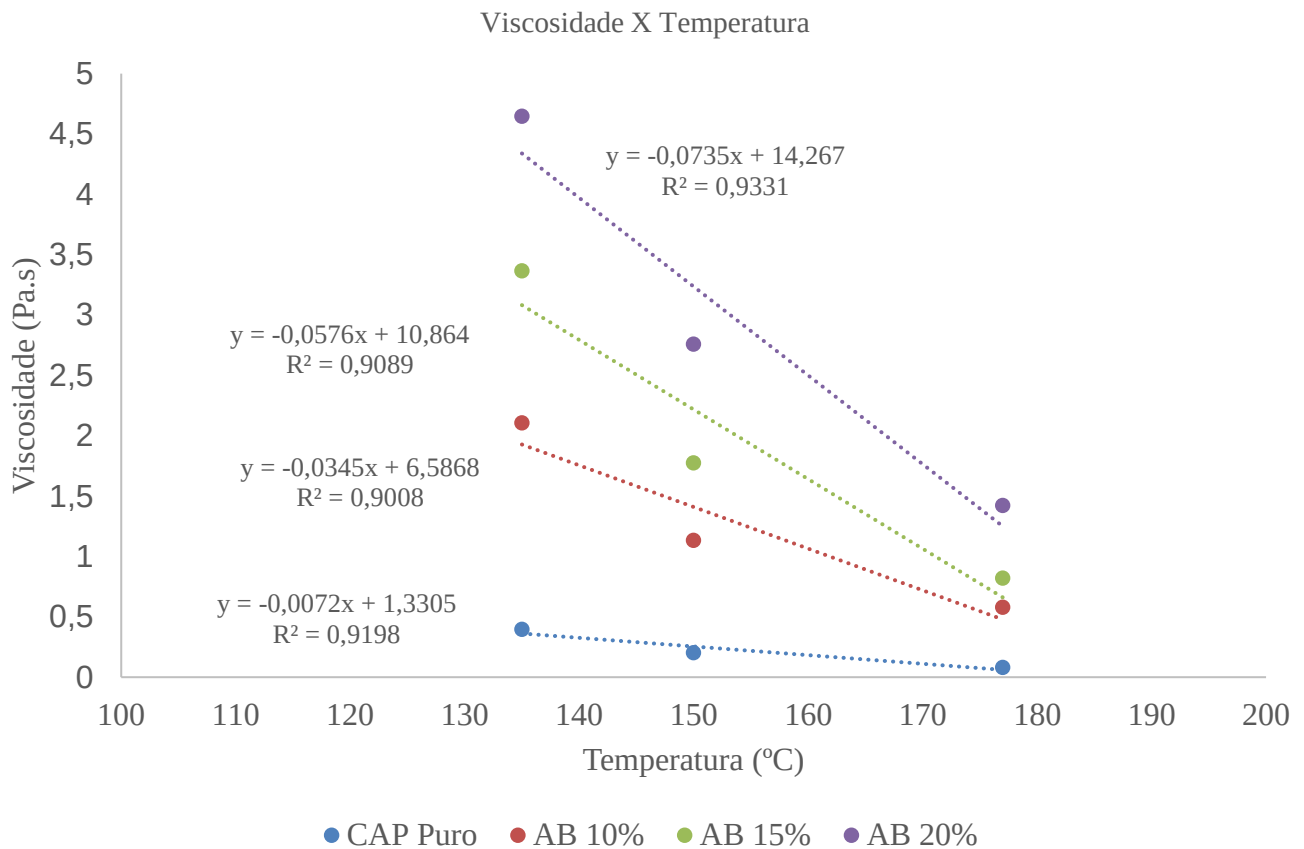


Figura 25: Curvas de Viscosidade versus Temperatura para os quatro ligantes. **Fonte:** Autoria Própria.

Com o ensaio de viscosidade Brookfield foram determinadas as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas, por meio da construção dos gráficos de temperatura versus viscosidade para os quatro tipos de ligante (Figura 25).

Para Bernucci *et al.* (2008), as temperaturas de usinagem e compactação devem ser tais que o ligante possua viscosidade de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, durante a mistura com os agregados, e de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s durante o processo de compactação. A Tabela 16, apresenta as temperaturas de usinagem e compactação escolhidas para cada mistura.

Tabela 16: Temperaturas de Usinagem e Compactação para cada tipo de Mistura.
Fonte: Autoria Própria.

Misturas	Temperatura de Usinagem (°C)	Temperatura de Compactação (°C)
CAP 50/70	155	143
AB 10%	165	165
AB 15%	165	165
AB 20%	165	165

Por meio das curvas dos ligantes asfalto-borracha, ilustradas na Figura 25, pode-se observar que seriam exigidas temperaturas acima de 200°C para obtenção das viscosidades sugeridas por Bernucci *et al.* (2008).

Porém, a norma 112/2009 faz recomendações quanto aos limites máximos utilizados. Segundo essa norma durante a usinagem a temperatura deve estar entre 165°C-180°C, com aquecimento dos ligantes a uma temperatura de 10°C ou 15°C superior ao do ligante, mas de modo que não ultrapasse 177°C. Dessa forma, foi determinada a temperatura de 165 °C para a temperatura de usinagem e compactação das misturas com o ligante modificado, conforme observado na tabela 16.

4.4.2 Determinação das Propriedades Volumétricas das Misturas

O procedimento utilizado para a dosagem Marshall encontra-se detalhado por Bernucci *et al.* (2008), para a escolha do teor de projeto. Foram realizadas quatro dosagens, uma para cada tipo de ligante asfáltico utilizado na pesquisa.

Para cada cenário foram determinadas as propriedades volumétricas: densidade aparente, volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação de betume/vazios e estabilidade Marshall. O gráfico da Figura 26 apresenta os resultados obtidos para as quatro misturas em relação à densidade aparente.

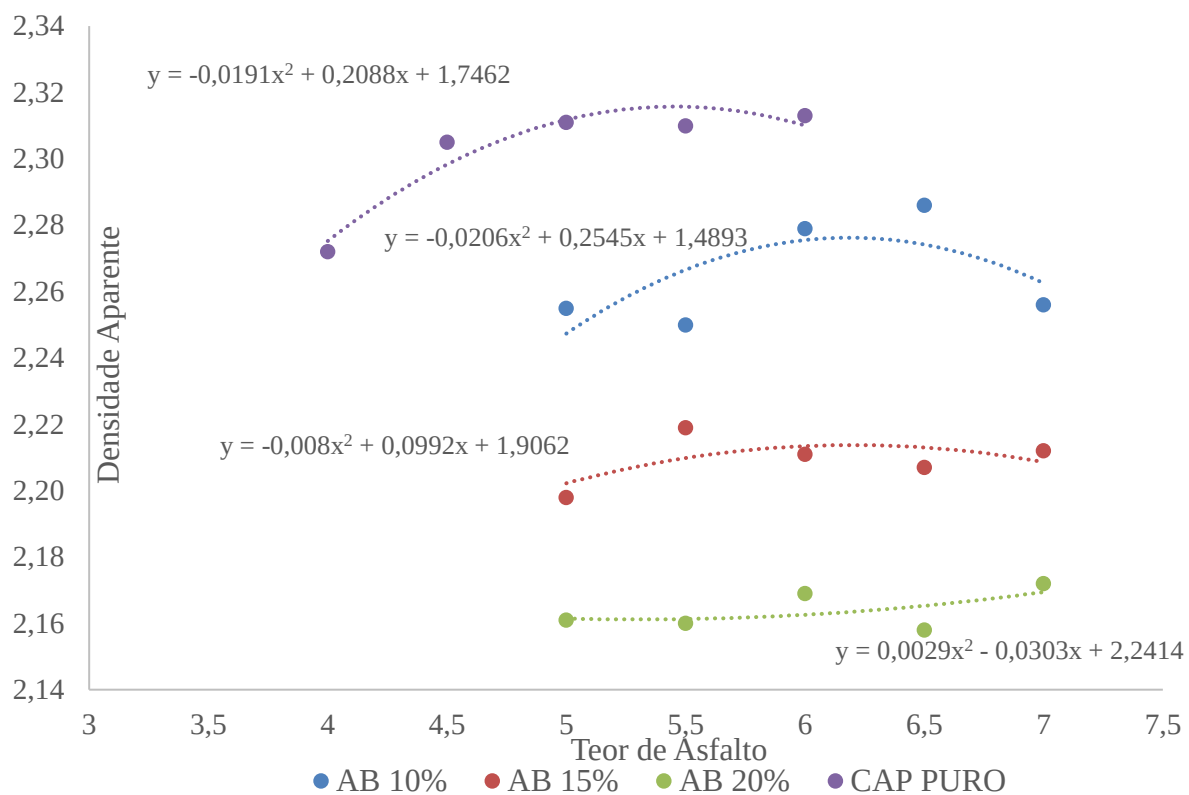


Figura 26: Densidade Aparente (Gmb). **Fonte:** Autoria Própria.

Por meio da análise do gráfico da Figura 26, percebe-se para todos os cenários que a densidade aparente cresce com o aumento do teor de ligante, até atingir um limite máximo a partir do qual a densidade decai. Também é possível verificar que com o acréscimo do teor de borracha menores valores são encontrados para a densidade aparente, o que segundo ASSIS, (2015) não implica em uma perda das propriedades mecânicas. A Figura 27 apresenta o gráfico com resultados obtidos para os quatro tipos de ligante em relação aos Volumes de vazios.

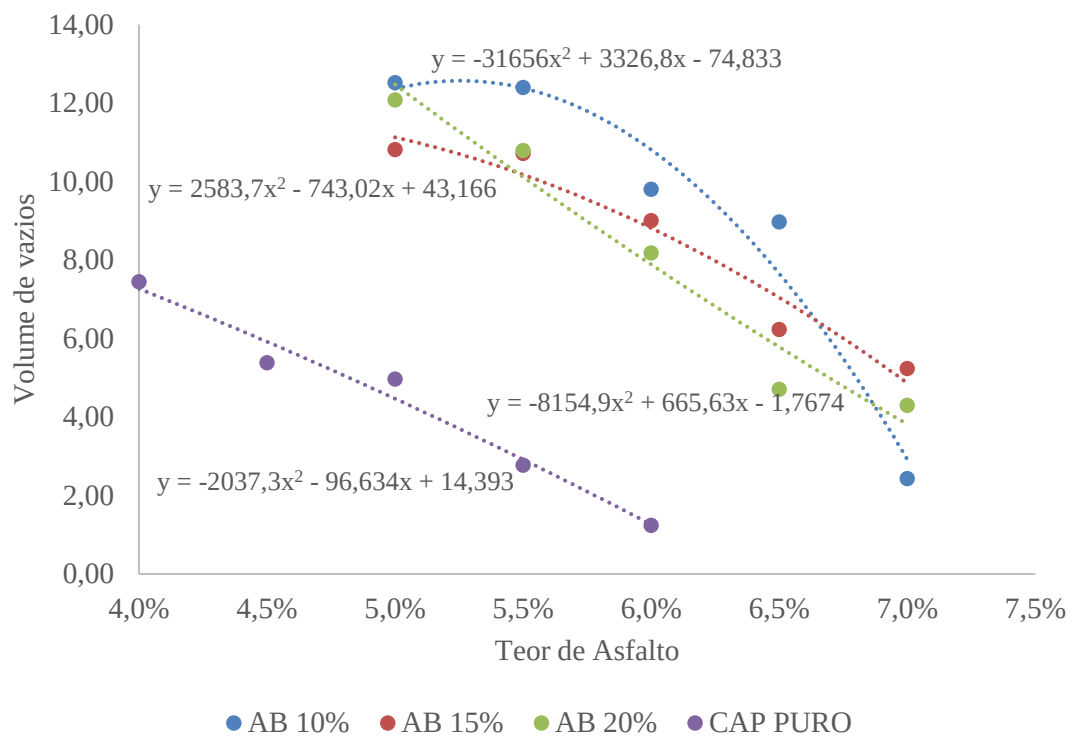


Figura 27: Volume de Vazios. Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 27, observa-se que o volume de vazios tende a diminuir com o aumento do teor de ligante asfáltico, para os quatro cenários analisados. Para as misturas com asfalto-borracha percebe-se a existência de maiores volume de vazios, devido a expansão volumétrica provocada pela borracha. Maiores volumes de vazios em relação às misturas convencionais também foram encontrados por THIVES (2009) e SOUSA *et al.* (2000). Os gráficos das Figuras 28, 29 e 30 apresentam os resultados obtidos para o VAM, para a relação de Betume/Vazios e para a estabilidade Marshall.

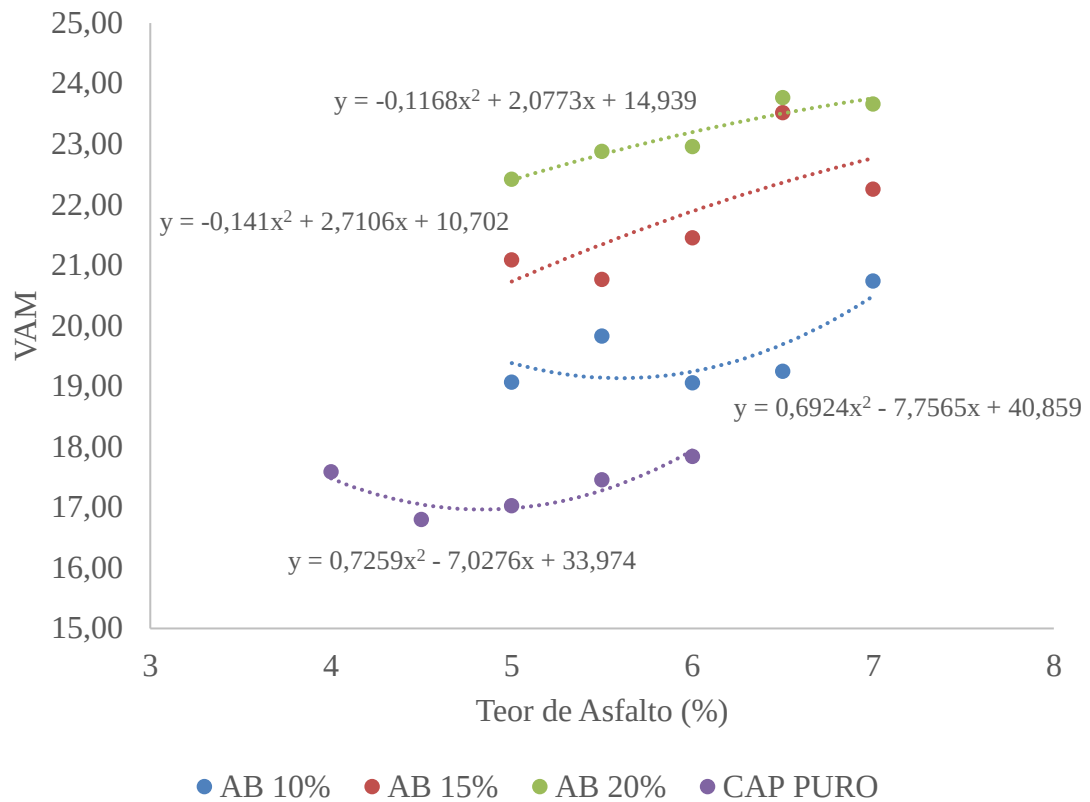


Figura 28: Vazios do Agregado Mineral. **Fonte:** Autoria Própria.

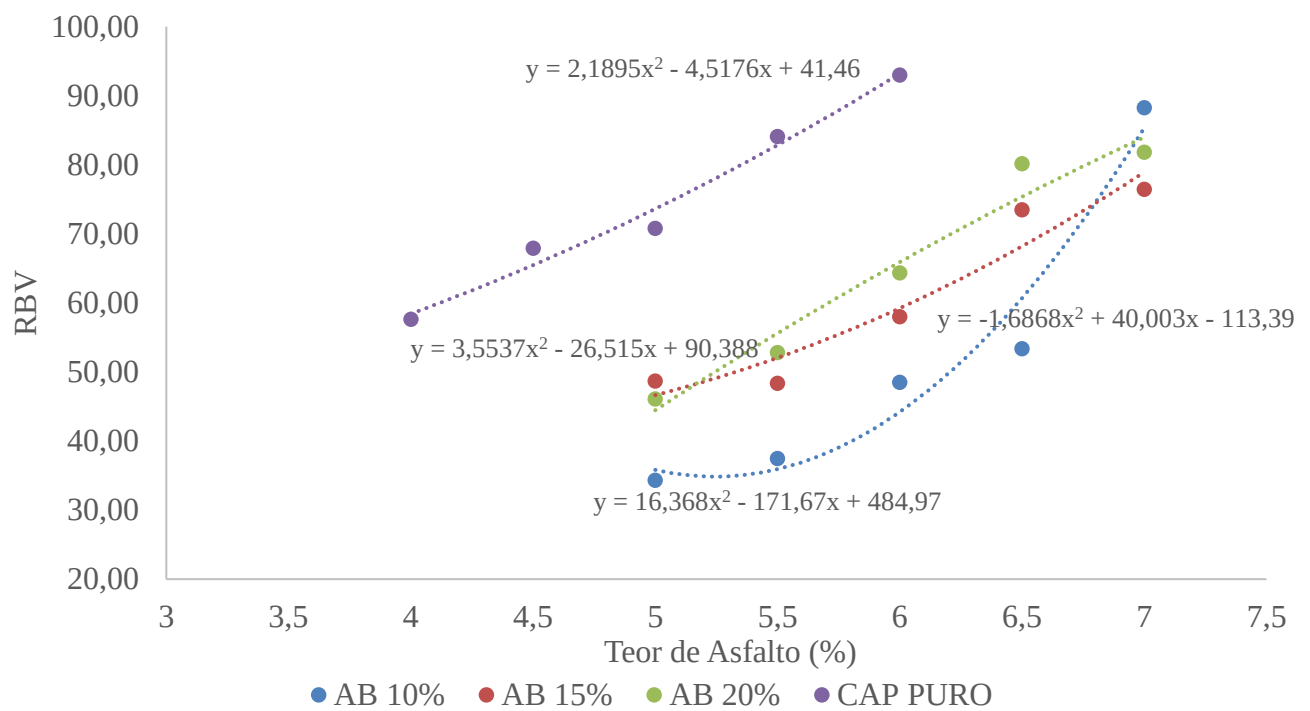


Figura 29: Relação de Betume/Vazios. **Fonte:** Autoria Própria

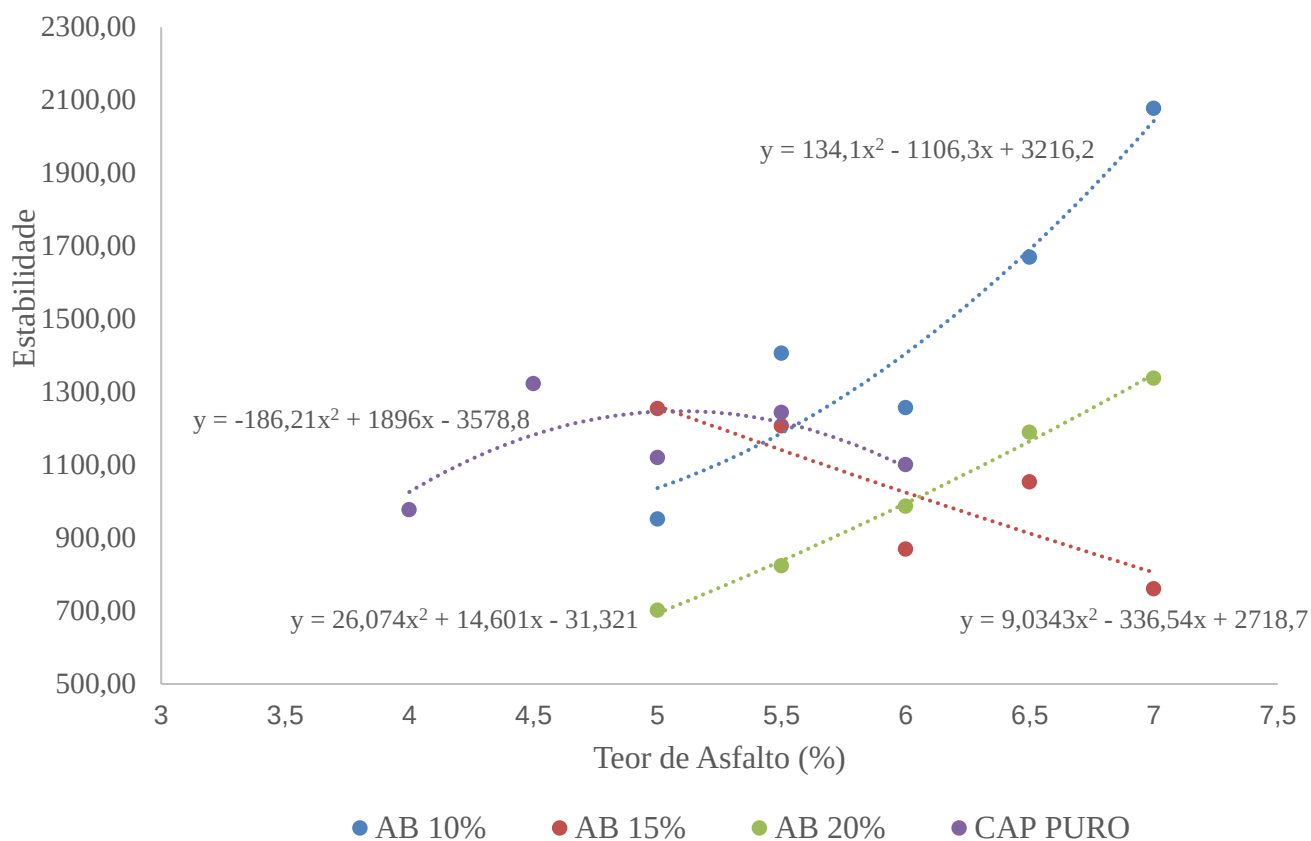


Figura 30: Estabilidade Marshall. **Fonte:** Autoria Própria.

Com base nos resultados obtidos nas Figuras 28, 29 e 30, pode-se inferir que:

- ✓ O VAM aumenta com a adição de borracha e também com maiores teores de ligante asfáltico. Efeito contrário pode ser observado para a RBV, cujo valor vai decrescendo de acordo com o acréscimo do teor de borracha;
- ✓ O RBV aumenta para maiores teores de ligante e apresenta menores valores quando se utilizam os ligantes asfalto-borracha;
- ✓ A estabilidade mostrou-se crescente com o aumento do teor de ligante, para o CAP 50/70 até um limite máximo, a partir do qual começa a decair;
- ✓ Para as misturas com ligantes, AB 10% e AB 20% foi observado que maiores teores de asfalto proporcionam uma maior estabilidade;
- ✓ Para o AB 15% foi observado que a estabilidade diminui com o acréscimo do teor de ligante.

Trabalhos como o de SOUSA *et al.* (2000) afirmam que a presença de maiores valores para os vazios do agregado mineral é comum para misturas asfalto-borracha, devido ao espaço requerido pela borracha. De acordo com a norma DNIT 112/2009, misturas com ligante asfalto-borracha, volumes de vazios de 4% e agregados com tamanho máximo nominal igual a 19mm, devem apresentar um VAM no mínimo igual a 13.

Desse modo, pode-se verificar que todas as misturas produzidas com o asfalto-borracha atenderam ao limite estabelecido nessa norma. Os menores valores para o RBV apresentados para as misturas com asfalto-borracha são justificados pelos maiores valores apresentados para o VAM, já que estes dois parâmetros são inversamente proporcionais.

Em relação à estabilidade Marshall, os autores divergem quanto aos efeitos provocados pela utilização do asfalto-borracha sobre a estabilidade Marshall. PILATI *et al.* (2008) obtiveram melhorias na estabilidade Marshall, com a utilização do asfalto-borracha, porém THIVES (2009), afirma que comumente há uma redução da estabilidade com utilização do ligante asfalto-borracha.

A análise do gráfico da Figura 30 indica que nesta pesquisa o AB10% aumentou consideravelmente a estabilidade dos corpos-de-prova em relação aos outros tipos ligantes. Para o AB 15% e o AB 20%, o valor da estabilidade manteve-se próximo aos obtidos para o CAP 50/70.

4.4.3 Determinação do Teor de Projeto

A Tabela 17 apresenta o resumo dos resultados obtidos para as propriedades volumétricas com a utilização dos teores de projeto.

Tabela 17: Resumo das Propriedades Volumétricas para os teores de projeto. **Fonte:** Autoria Própria.

Misturas	Teor de Projeto (%)	Estabilidade (Kgf)	Gmb	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
CAP 50/70	5,2	1163,0	2,31	3,9	17	77
AB 10%	6,8	1873,8	2,27	5,0	20	74
AB 15%	7,0	805,6	2,21	4,9	23	78

AB 20%	6,7	1237,0	2,17	5,0	24	78
--------	-----	--------	------	-----	----	----

De acordo com a Tabela 17 pode-se afirmar que todas as especificações requeridas pelas normas DNIT ES-031/2006, para o CAP/70 e DNIT 112/2009 para o asfalto-borracha foram atendidas para a escolha do teor de projeto de ligante.

4.5 Cálculo da Porosidade FAD após a Dosagem

Após a dosagem, o VAM real das misturas foi calculado, com isso pode-se obter uma real estimativa da capacidade das misturas de resistir à deformação permanente. A Tabela 18 apresenta os valores da porosidade FAD calculada após a dosagem.

Tabela 18: Cálculo da porosidade FAD, após a dosagem. **Fonte:** Autoria Própria.

Misturas	VAM (%)	Porosidade (%)
CAP 50/70	17	36
AB 10%	20	40
AB 15%	23	44
AB 20%	24	45

De acordo com a Tabela 18, os valores reais obtidos para o VAM variaram em relação ao valor estimado de 18,6%, com maior variação observada para os maiores teores de borracha. Ainda, de acordo com os resultados, as misturas podem ser classificadas como de bom desempenho quanto a capacidade de resistência à deformação permanente, já que os valores da porosidade foram inferiores a 48%.

5. Caracterização Mecânica

5.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, para as metodologias Marshall e SUPERPAVE, foram descritos na Tabela 19 e representados graficamente na Figura 31.

Tabela 19: Resultados do ensaio de RT para as metodologias Marshall e SUPERPAVE.
Fonte: Autoria Própria.

Misturas	RT MARSHALL	RT SUPERPAVE
	(MPa)	(MPa)
CAP 50/70	0,65	0,66
AB 10%	0,66	0,78
AB 15%	0,52	0,77
AB 20%	0,46	0,39

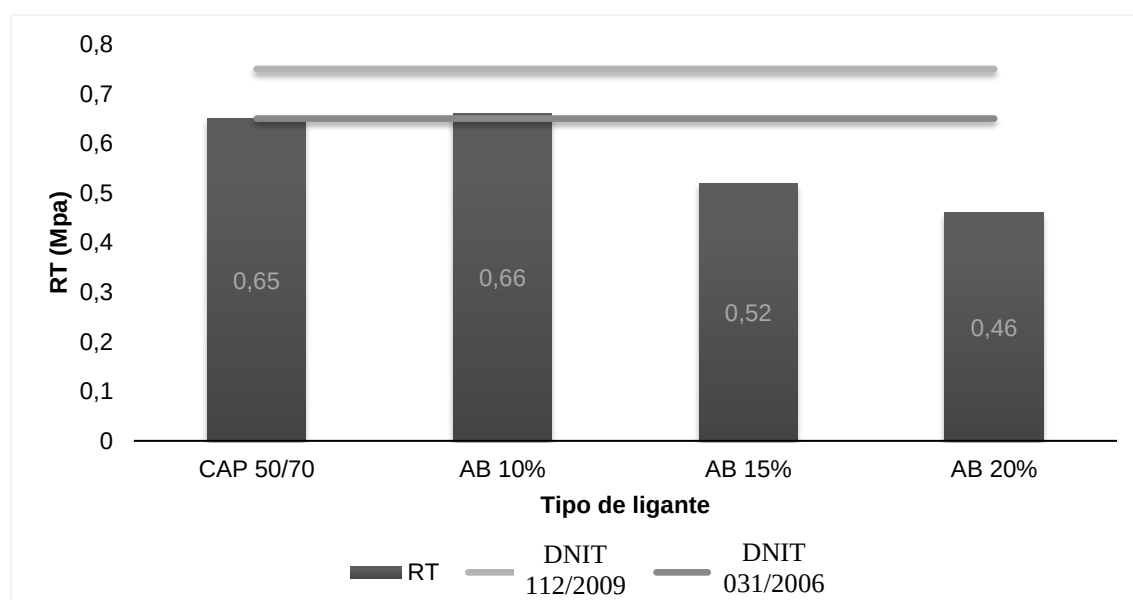


Figura 31: Representação gráfica dos resultados obtidos para o ensaio de RT. **Fonte:** Autoria Própria.

Com base nos valores encontrados percebe-se que a RT foi superior para misturas com ligantes AB 10% e AB 15%, quando utilizado o método de compactação por amassamento. Efeito contrário foi observado para as misturas com ligante AB 20%, que apresentaram uma redução no valor da RT quando utilizado esse método de compactação.

Acredita-se que essa redução seja atribuída a maior heterogeneidade apresentada por essas misturas, que dificultou o processo de compactação. Para elas foi observada uma redução durante a reação súbita dos corpos-de-prova, semelhante ao citado pelos autores HAFEZ & WITCZAK (1995) *apud* BERTOLO (2002).

Para as misturas produzidas com o ligante asfáltico convencional, os resultados encontrados para a RT mantiveram-se praticamente constantes para as duas metodologias, sendo os valores encontrados próximos ao limite mínimo de 0,65 MPa, estabelecido pela norma DNIT 031/2006.

Os resultados obtidos por meio da metodologia Marshall, mostraram-se em conformidade com os obtidos por NAVARRO e GÁMEZ, (2012). Esses autores utilizaram o método de dosagem Marshall para a determinação do teor de projeto do ligante asfáltico e compactação por impacto para produção dos corpos-de-prova, desse modo verificaram uma leve redução da RT, quando utilizadas misturas com ligante asfalto-borracha.

Pode-se observar para as duas metodologias, que as misturas com AB 10% obtiveram os melhores resultados para a RT. Resultados próximos a este, foram obtidos por IRFAN *et al.* (2017). Em sua pesquisa, os autores verificaram que: i) A RT das misturas aumentava com a adição de borracha, até o valor de 12%; ii) Para teores de borracha entre 12% e 16% de borracha havia uma leve redução no valor da RT; iii) Para teores acima de 16% de borracha ocorre uma redução mais expressiva da RT.

As Tabelas 20 e 21 apresentam a análise de variância realizada para o ensaio de RT com compactação por impacto e por amassamento, respectivamente.

Tabela 20: ANOVA para o ensaio de RT com compactação por impacto. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	0,078	3	0,03	5,70
Dentro	0,037	8	0,01	
Total	0,115	11		

Por meio da Tabela 20, pode-se afirmar que para um nível de significância de 5%, cerca de 54% dos resultados obtidos para o ensaio são influenciados pelo fator tipo de ligante. Verifica-se, também, que existem diferenças significativas entre as médias obtidas. O teste de Tukey indicou que ocorreu uma diferença significativa apenas entre as médias das misturas AB 10% e AB 20%.

Tabela 21: ANOVA para o ensaio de RT com compactação por amassamento. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	0,50	3	0,17	53,09
Dentro	0,025	8	0,05	
Total	0,52	11		

Calculando-se a razão entre os valores da soma dos quadrados entre e total, obtém-se o valor de 0,96. Esse valor significa que para o ensaio de RT pelo método de compactação SUPERPAVE, o fator tipo de ligante explica cerca de 96% dos resultados obtidos.

Diferenças significativas foram encontradas entre as médias obtidas pelos quatro ligantes para o ensaio, verificando-se por meio do teste de Tukey que essas diferenças ocorreram entre as misturas com CAP 50/70 e as com ligante AB 15% e AB 20%; entre as misturas com AB 10% e AB 15%; e AB 15% e AB 20%.

5.2 Módulo de Resiliência (MR)

Os resultados obtidos para o ensaio de módulo de resiliência, para as metodologias Marshall e SUPERPAVE foram descritos na Tabela 22 e representados graficamente na Figura 32.

Tabela 22: Resultados do Ensaio de MR para as metodologias Marshall e Superpave.
Fonte: Autoria Própria.

Misturas	MR	MR
	MARSHALL (MPa)	SUPERPAVE (MPa)
CAP 50/70	2.203,00	3.431,00
AB 10%	2.089,00	3.357,67
AB 15%	2.097,00	3.374,00
AB 20%	1.977,00	1.034,00

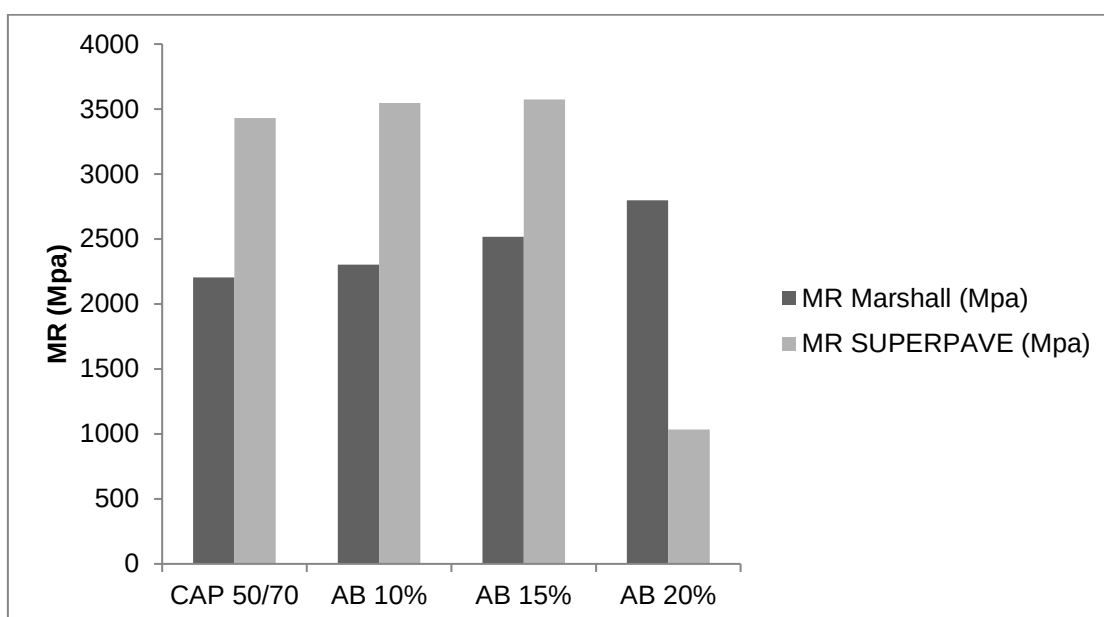


Figura 32: Representação gráfica dos resultados obtidos para o ensaio de MR. **Fonte:** Autoria Própria.

Para FAXINA (2006), não há uma influência clara sobre os efeitos que a borracha provoca sobre o módulo de resiliência das misturas, podendo causar um aumento ou uma diminuição nos valores desse parâmetro.

Nessa pesquisa, os resultados obtidos mostram um aumento do MR em relação às misturas convencionais, e que esta elevação ocorre de maneira crescente com a adição de borracha. Trabalhos, como o de IRFAN *et al.* (2017), apresentaram o mesmo comportamento observado nessa pesquisa com aumento do módulo de resiliência para misturas com asfalto-borracha, e maior valor apresentado para o maior teor de borracha utilizado.

Observa-se que, assim como no ensaio de RT, foram encontrados valores menores para as misturas AB 20%, acredita-se que esses resultados se devam as dificuldades citadas durante a sua compactação.

Através dos dados, pode-se afirmar que a metodologia SUPERPAVE apresentou valores mais elevados de MR quando comparada a metodologia Marshall, mesma tendência apresentada para o ensaio de RT. Esses resultados eram esperados devido a maior eficiência da metodologia SUPERPAVE em retratar as condições de campo, com menores riscos de alteração da granulometria dos agregados utilizados.

Com exceção da mistura AB 20% produzida que utilizou o método de compactação *SUPERPAVE*, os valores obtidos para o ensaio mantiveram-se dentro da faixa de 2000 a 8000 MPa proposta por BERNUCCI *et al.* (2008), como típica para as misturas asfálticas. Essa autora determina ainda limites para a relação MR /RT entre 1.751 a 5.787 para misturas aplicáveis à faixa C.

Essa relação fornece um indicativo da rigidez das misturas asfálticas, valores muito altos indicam uma rigidez excessiva da mistura, o que a torna mais suscetível ao aparecimento de defeitos. A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos na pesquisa para relação MR /RT.

Tabela 23: Relação MR /RT. **Fonte:** Autoria Própria.

Método	Mistura	Teor de projeto (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
MARSHALL	CAP 50/70	5,2	2203	0,65	3389
	AB 10%	6,8	2089	0,66	3165
	AB 15%	7,0	2097	0,52	4033
	AB 20%	6,7	1977	0,46	5029
SUPERPAVE	CAP 50/70	5,2	3431	0,66	5198
	AB 10%	6,8	3358	0,78	4304
	AB 15%	7,0	3374	0,77	4382
	AB 20%	6,7	1034	0,39	2651

Com base nas relações obtidas percebe-se que todas as misturas apresentaram valores dentro dos limites indicados por BERNUCCI *et al.* (2008) para a relação MR /RT e que as misturas produzidas por meio da metodologia SUPERPAVE possuem uma maior rigidez em relação ao método Marshall. Devido aos valores encontrados para o MR e a RT da mistura AB 20%, e a sua dificuldade de compactação por meio da metodologia SUPERPAVE, prosseguiu-se a pesquisa sem a sua utilização.

Para este ensaio também foi realizada a análise de variância, para verificar a significância entre as médias obtidas para as quatro misturas. Para a análise foi considerado o grau de 5% de significância das análises anteriores. As Tabelas 24 e 25 apresentam a ANOVA para os métodos Marshall e SUPERPAVE, respectivamente.

Tabela 24: ANOVA para o ensaio de MR - Marshall. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	76737	3	25579	0,1878
Dentro	1089710	8	136214	
Total	1166450	11		

Tabela 25: ANOVA para o ensaio de MR - SUPERPAVE. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	12472100	3	4157380	43,2
Dentro	769883	8	96235,3	
Total	13242000	11		

Para a ANOVA, da Tabela 24 obtida no software *Past*, obteve-se um Ftabelado de 7,65, valor superior ao Fcalculado para o ensaio. Desse modo, pode-se constatar que não existem diferenças significativas entre as médias obtidas para os quatro ligantes.

O contrário foi observado na metodologia de compactação SUPERPAVE, onde o $F_{calculado}$ foi superior ao $F_{tabelado}$. Desse modo, para esta metodologia pode-se afirmar que existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias obtidas para as quatro misturas em relação ao módulo de resiliência. Por meio do teste de Tukey pode-se obter que essas diferenças foram significativas entre as misturas com os ligantes CAP 50/70 e AB 20%; AB 10% e o AB 20%; e o AB 15% e AB 20%.

5.3 Ensaio de Dano por Umidade Induzida

Para a realização deste ensaio por meio da metodologia Marshall, foram moldados três corpos-de-prova para cada mistura, sendo estes compactados com 30, 45 e 60 golpes. Em seguida foram determinados os volumes de vazios correspondentes a cada um deles, permitindo a construção do gráfico da Figura 33.

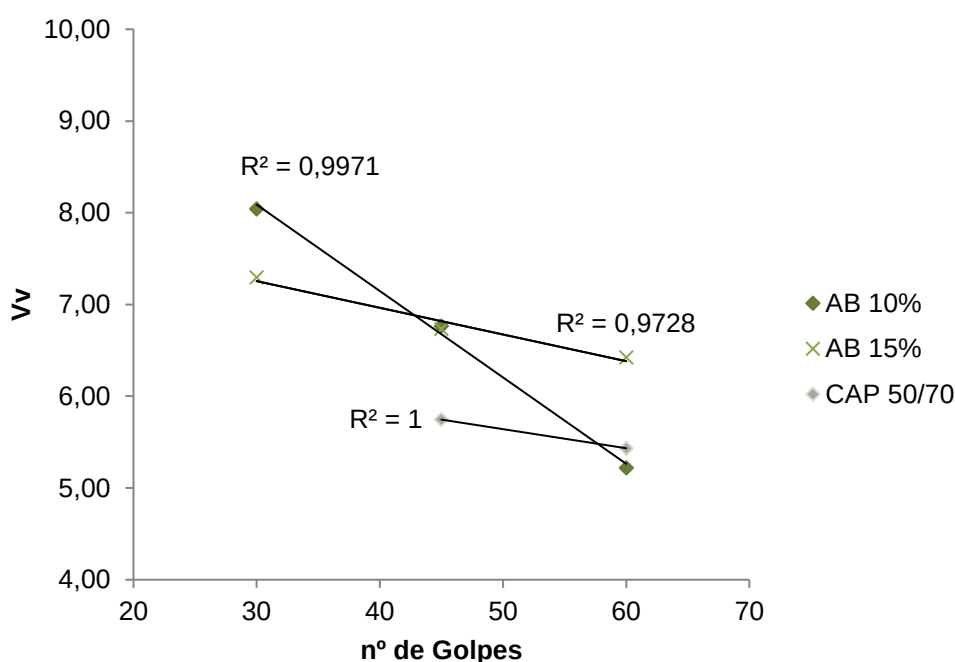


Figura 33: Volume de Vazios x Número de Golpes. **Fonte:** Autoria Própria.

Com este gráfico pode-se obter o número de golpes necessários para obtenção de volumes de vazios entre 6% e 8%, para cada mistura. Para a metodologia SUPERPAVE foram utilizados 40 giros para obtenção desse intervalo de vazios. A Tabela 26 apresenta a quantidade de golpes utilizada para cada mistura.

Tabela 26: Número de Golpes para cada tipo de mistura. **Fonte:** Autoria Própria.

Misturas	Nº de Golpes
CAP 50/70	28
AB 10%	52
AB 15%	56

Desse modo, os corpos-de-prova foram moldados e o ensaio realizado. O valor da resistência à tração por umidade induzida (RRT) foi obtida por meio da divisão entre as resistências entre os corpos-de-prova submetidos ao confinamento e os não confinados. A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos com o ensaio para os métodos de compactação Marshall e SUPERPAVE e a Figura 34 a representação gráfica desses resultados.

Tabela 27: Resultados do Ensaio de Dano por Umidade Induzida. **Fonte:** Autoria Própria.

Método	Mistura	Teor de projeto (%)	RRT (%)
MARSHALL	CAP 50/70	5,2	87
	AB 10%	6,8	80
	AB 15%	7,0	63
SUPERPAVE	CAP 50/70	5,2	89
	AB 10%	6,8	81
	AB 15%	7,0	66

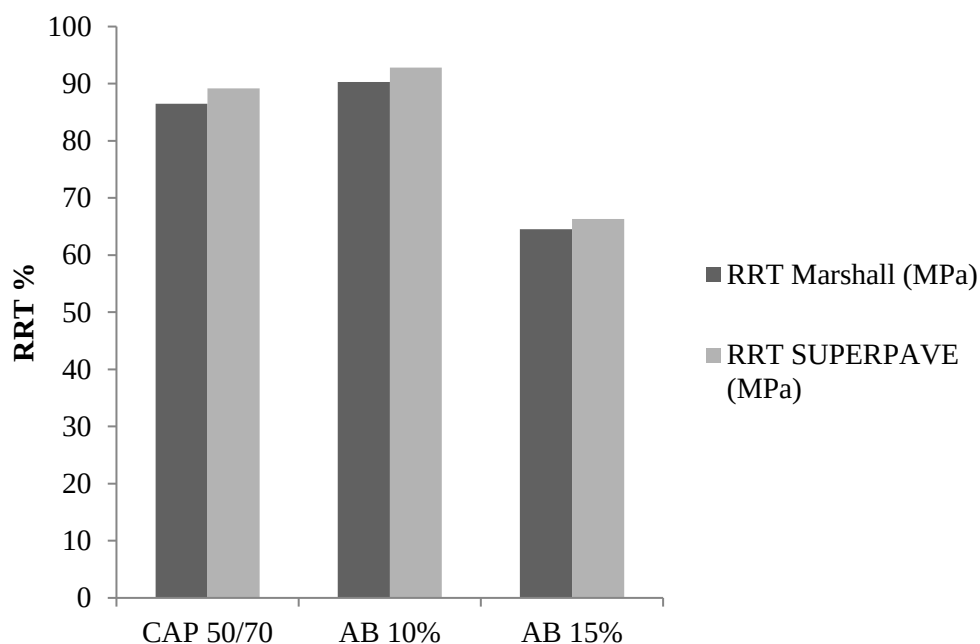


Figura 34: Comparativo entre as metodologias Marshall e Superpave para o Ensaio de Dano por Umidade Induzida. **Fonte:** Autoria Própria.

De acordo com o gráfico da Figura 34, observa-se que os corpos-de-prova moldados com a compactação por amassamento SUPERPAVE, obtiveram melhores resultados para à resistência ao dano por umidade induzida.

Conforme citado no capítulo 2, existem divergências entre os autores sobre os efeitos que a borracha provoca sobre essa propriedade das misturas asfálticas. Os resultados obtidos na pesquisa corroboram os obtidos por XIAO & AMIRKHANIAN (2009), que trabalharam com teores de borracha de 0 a 15% e obtiveram menores valores para o teor de 15%.

Resultados semelhantes foram obtidos por BERTOLO (2002), que obteve para menores teores de borracha uma melhor resistência ao dano por umidade induzida. Para a autora, a homogeneidade do ligante asfalto-borracha exerce forte influência sobre os resultados deste ensaio, pois compromete a adesão do ligante aos agregados. Dessa forma, acredita-se que a maior redução observada para a mistura AB 15% esteja associada a este fato, já que esta apresentou uma maior separação de fases em relação a mistura AB 10%.

Apesar da redução da RRT, em relação a mistura convencional, pode-se observar que a mistura AB 10% atendeu aos requisitos propostos por BERTOLO (2002), RRT superior a 75%, e também aos requisitos estabelecidos pela norma AASHTO T283/2002, que recomenda valor mínimo de 80%.

A análise de variância aplicada a este ensaio pode ser observada nas Tabelas 28 e 29. Para a construção dessas tabelas foi utilizado o grau de 5% de significância e o Ftabelado obtido de 9,78.

Tabela 28: ANOVA para o ensaio de RRT- Marshall. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	0,42	2	0,21	3,5
Dentro	0,38	6	0,06	
Total	0,8	8		

Tabela 29: ANOVA para o ensaio de RRT- SUPERPAVE. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	0,1	2,0	0,04	1,0
Dentro	0,2	6,0	0,04	
Total	0,3	8,0		

As Tabelas 28 e 29 indicaram que para este ensaio o fator tipo de ligante não exerceu influência significativa, para nenhuma das duas metodologias de compactação, não sendo verificada diferença entre as médias obtidas pelos ligantes.

5.4 Flow Number

Esse ensaio fornece estimativa do desempenho das misturas asfálticas quanto ao aparecimento de deformações permanentes. Para a realização do ensaio foi utilizada apenas a metodologia SUPERPAVE para a compactação dos corpos-de-prova, visto a impossibilidade de realizá-lo pelo método Marshall. Dessa forma, os resultados médios obtidos para essa metodologia encontram-se na Tabela 30.

Tabela 30: Resultados *Flow Number*. **Fonte:** Autoria Própria.

Misturas	FN
CAP 50/70	95
AB 10%	303
AB 15%	56

Observa-se com a Tabela 30, que as misturas com CAP 50/70 e AB 15% não atendem aos requisitos mínimos (300 ciclos), estabelecidos por NASCIMENTO (2008), para utilização em condições de tráfego médio. Contudo, para a mistura com 10% de borracha, obteve-se melhores resultados para a propriedade de resistência à deformação permanente, quando comparada a mistura com a mistura convencional com CAP 50/70, conforme ilustrado na Figura 35.

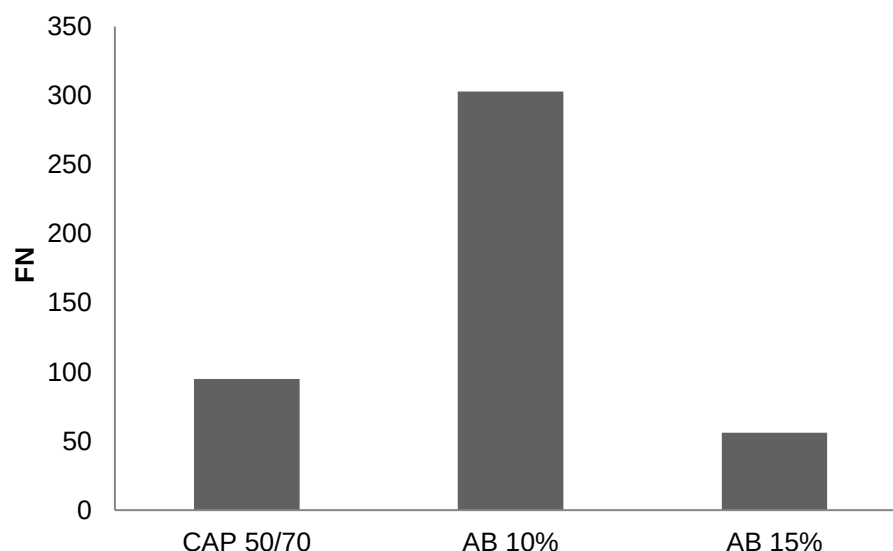


Figura 35: Resultados do Ensaio de FN. **Fonte:** Autoria Própria.

De acordo com a Figura 35, pode-se afirmar que para a mistura AB 10% o parâmetro de 300 ciclos foi atendido, o que significa que misturas com esse ligante poderiam ser utilizadas em vias de tráfego médio (NASCIMENTO, 2008).

A Tabela 31 apresenta os resultados de análise de variância realizada para o ensaio de *Flow Number*.

Tabela 31: ANOVA para o ensaio de FN. **Fonte:** Autoria Própria.

Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcal.
Entre	65926,2	2,0	32963,1	12,06
Dentro	16393,3	6,0	2732,21	
Total	82319,6	8,0		

A Tabela 31 aponta que existem diferenças significativas entre as médias obtidas pelos quatro ligantes, pois o valor de $F_{calculado}$ foi superior ao $F_{tab} = 5,14$, obtido para o grau de 5% de significância. Observa-se ainda que, aproximadamente 80% dos resultados obtidos para o ensaio de *Flow Number* podem ser explicados pelo fator tipo de ligante.

5.5 Módulo Dinâmico

Este ensaio busca fornecer dados sobre a rigidez das misturas quando submetidas a diferentes temperaturas e a diferentes frequências de aplicação de cargas. Assim como para o ensaio de *Flow Number* este ensaio foi realizado apenas por meio do método *SUPERPAVE*, devido às maiores dimensões dos corpos-de-prova utilizados no ensaio.

Os corpos-de-prova foram ensaiados sob temperaturas de 4, 21 e 37°C e oito frequências da ordem de 25; 20; 10; 5; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz. As Figuras 36, 37 e 38 apresentam os valores do módulo dinâmico obtido sob as oito frequências para as temperaturas de 4, 21 e 37°C, respectivamente.

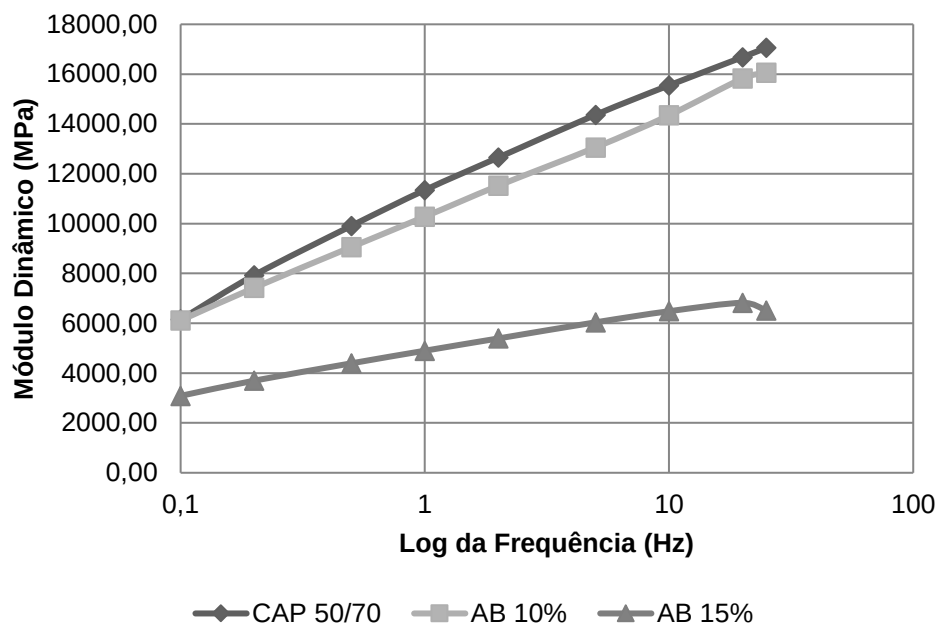


Figura 36: Módulo Dinâmico à 4°C. **Fonte:** Autoria Própria.

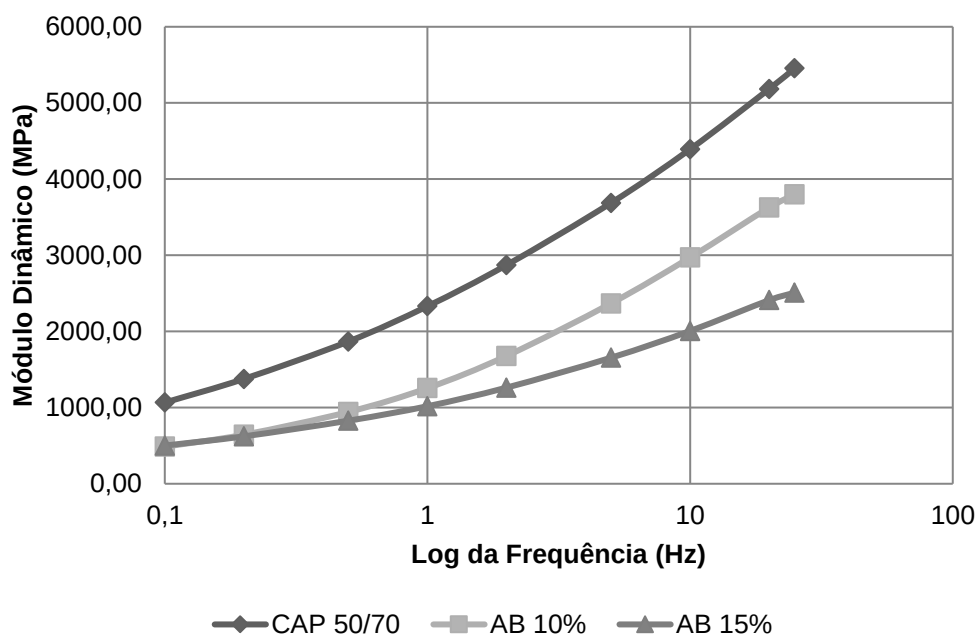


Figura 37: Módulo Dinâmico à 21°C. **Fonte:** Autoria Própria.

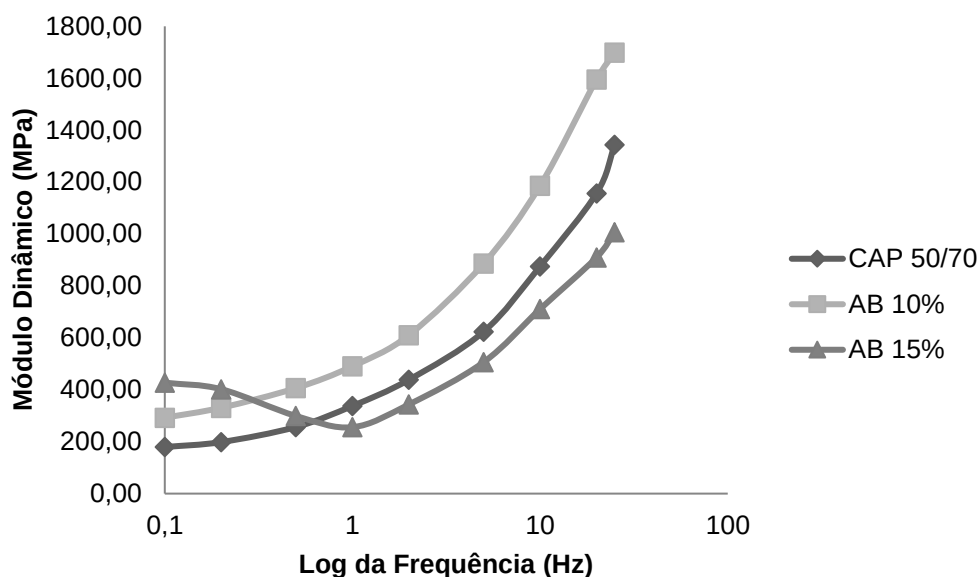


Figura 38: Módulo Dinâmico à 37°C. **Fonte:** Autoria Própria.

De acordo com as Figuras 36 a 38, pode-se observar que há diminuição do módulo dinâmico com o aumento da temperatura, para os três tipos de mistura. Observa-se ainda que de modo geral as misturas com asfalto-borracha apresentaram uma menor rigidez quando comparadas às misturas com ligante convencional, e que essa redução é maior para o teor de 15% de borracha. Resultados semelhantes foram obtidos por THIVES (2009), que também observou em seu estudo uma redução do módulo dinâmico das misturas, com a utilização do ligante asfalto-borracha, que é explicada devido à maior flexibilidade das misturas com asfalto-borracha.

Apesar da redução observada em relação ao ligante convencional, observa-se que para a temperatura de 37°C, a mistura AB 10% apresentou uma maior rigidez que o ligante convencional, indicando um melhor comportamento dessa mistura em temperaturas mais elevadas. A figura 39 apresenta as curvas mestras para os três tipos de ligante.

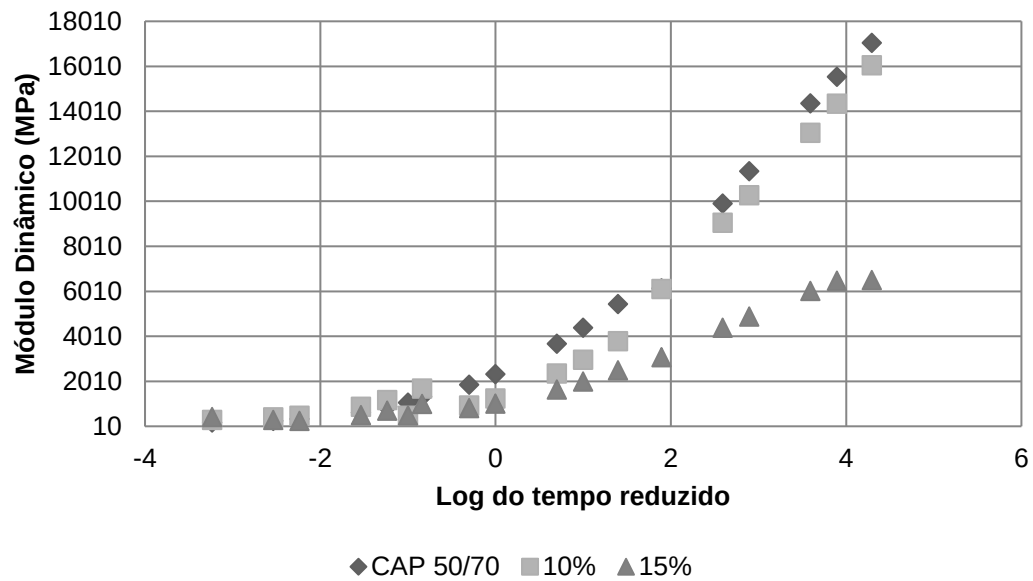


Figura 39: Curvas Mestras. **Fonte:** Autoria Própria.

Por meio das inclinações das curvas mestras, apresentadas na Figura 39, observa-se que a mistura com 15% de borracha é a que possui menor susceptibilidade às variações de temperatura e de frequência, devido à menor inclinação de sua curva.

THIVES (2009), afirma que uma curva de formato horizontal apresenta maior comportamento elástico, enquanto curvas próximas à vertical indicam um maior susceptibilidade a variações de temperatura e frequência.

As Figuras 40, 41 e 42 apresentam os valores obtidos para o ângulo de fase, característica associada ao comportamento elástico das misturas, obtido sob as oito frequências para as temperaturas de 4°C, 21°C e 37°C, respectivamente.

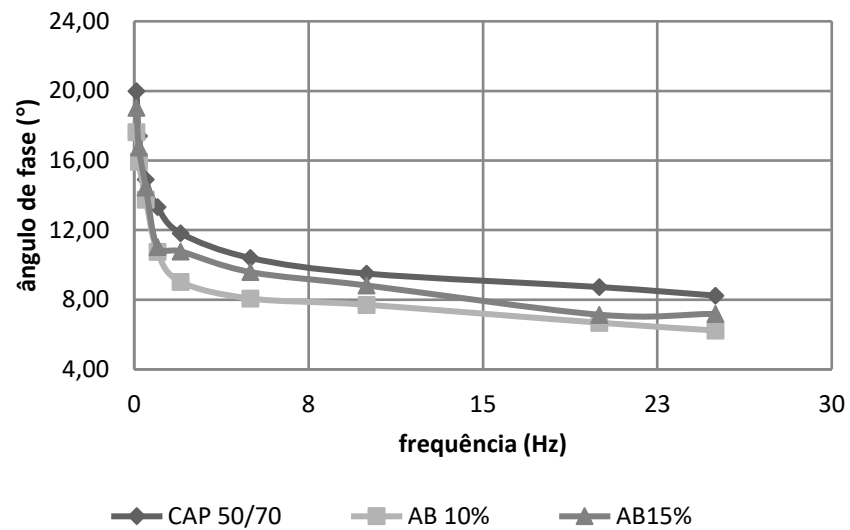


Figura 40: Ângulo de Fase à 4°C. **Fonte:** Autoria Própria.

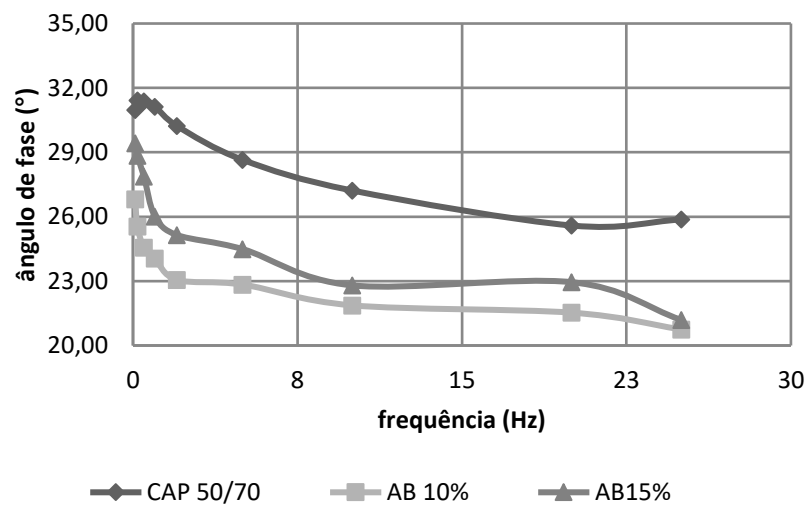


Figura 41: Ângulo de fase à 21°C. **Fonte:** Autoria Própria.

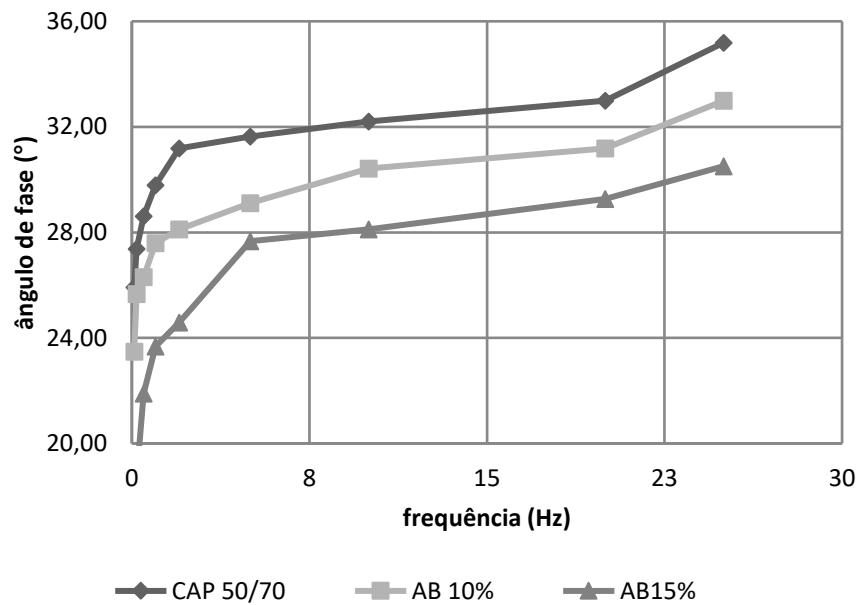


Figura 42: Ângulo de Fase à 37°C. **Fonte:** Autoria Própria.

De acordo com as Figuras 40 a 42, observa-se que as misturas produzidas com asfalto-borracha, possuem um menor ângulo de fase, em todas as temperaturas, o que indica que essas misturas possuem uma maior elasticidade.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das análises realizadas observa-se que as mistura com ligante asfalto-borracha com teor de 10% de borracha promove melhorias nas propriedades físicas do ligante, aumentam a sua capacidade de recuperação elástica e diminuem sua susceptibilidade térmica, como também na capacidade de resistência das misturas. Foi observado que estas misturas possuem uma maior resistência à tração, e ao aparecimento de deformações permanentes.

A maior rigidez e o menor ângulo de fase apresentados pela mistura AB 10% em relação à mistura convencional, sob a temperatura de 37°C, tornam interessante o uso dessa mistura em regiões de clima quente, como a região Nordeste.

Para as misturas com maior teor de borracha verificou-se a necessidade do uso de agentes compatibilizantes, para uma melhor homogeneização das misturas, de modo que as partículas de borracha não exerçam influência durante a compactação dos corpos-de-prova.

Verificou-se ainda que a compactação SUPERPAVE apresentou resultados superiores aos apresentados pela metodologia Marshall e que a metodologia FAD não apresentou uma boa estimativa para a resistência à deformação permanente das misturas.

A análise estatística permitiu observar que de modo geral as propriedades mecânicas e, sobretudo, as físicas das misturas são influenciadas pelo fator tipo de ligante. Para os ensaios mecânicos verificou-se uma maior influência desse fator quando utilizada a compactação por amassamento, proposta pela metodologia *SUPERPAVE*.

Assim, sugere-se para trabalhos futuros:

- ✓ O estudo do comportamento de misturas com asfalto-borracha utilizando-se menores teores de borracha;
- ✓ Avaliar o desempenho de misturas com asfalto-borracha utilizando-se teores de borracha elevados e agentes compatibilizantes;
- ✓ Analisar as propriedades químicas do ligante asfalto-borracha;
- ✓ Estudo da vida de fadiga de misturas com asfalto-borracha;
- ✓ Caracterização reológica dos ligantes asfalto-borracha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 283: **Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture induced damage**. Washington, D. C. 2002.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO TP 62: **Determining modulus of hot mix asphalt (HMA)**. Estados Unidos, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida**. ABNT NBR 16505. 2016.

AL-HADIDY, A. I.; TAN, Y. Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements, **Constr Build Mater**. v.23, p. 2941–2950, 2009.

ALMEIDA JR, P. O. B.; BOREIRA, F. D.; SPECHT, L. P; CERVO, T. C.; PEREIRA, D. S.; CENTOFANTE, R.; BARBOZA JR, V.; SILVA, C. C. Avaliação laboratorial do tipo e do teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas, **Transportes** v.16, n.2, p. 1–15, 2018.

ASSIS, S. R. H. **Utilização de agregados de rochas calcárias em misturas asfálticas usinadas a quente**. 2015. 135f. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS – ANIP. **Livro Branco da Indústria de Pneus uma política para o setor (2015)**. Disponível em: <file:///C:/Users/camil/Downloads/f8201-white-book-versao-final.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES– ANTT. **Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas (2017)**. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/Relat_FINAL_AsfaltoBorr_DEZ17.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2019.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **Standard Specification for Asphalt Rubber Binder**, - ASTM 6114. 1997.

ASTM - American Society for Testing and Material. **Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer**. ASTM 4402/D4402M. 2012.

BALAGUER, M. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em asfalto-borracha, elaborado pelo processo de produção contínua em usina** 2012. 207 f. Dissertação – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico**. 2016. Tese - Programa de Pós-

Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P; SOARES, J. B. - Pavimentação Asfáltica: **Formação Básica para Engenheiros**, 3ª Edição PETROBRAS/ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

BERTOLLO, S. A. M.; FERNANDES JR, J. L.; BERNUCCI, L. B.; MOURA, E. Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica Densa Modificada com Adição de Borracha. Rio de Janeiro: **Revista Transportes**, v. 10, n. 1, p. 65-83, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030342.pdf>. Acesso em: 04. fev. 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 416, de 01 de outubro de 2009.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>>. Acesso em: 04 fev. 2019.

CALTRANS. **Use of Scrap Tire Rubber.** California: Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA, 2005.

CALTRANS. **Open Graded Friction Usage Guide.** California: State of California State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services, Office of Flexible Pavement Materials, 2006.

CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas.** 2018. 124f. Dissertação - Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2018.

CHUN, S.; KIM, K.; MA, PARK, B.; GREENE, J. Evaluation of the Effect of Segregation on Coarse Aggregate Structure and Rutting Potential of Asphalt Mixtures using Dominant Aggregate Size Range (DASR) Approach. **KSCE Journal of Civil Engineer**, v.0, n.0. p. 1-10, 2017.

CUNHA, M.B.; GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do método bailey. In: **XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. nº18, p. 115-126. 2004. Florianópolis, SC.

DANTAS NETO, S.A. **Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados.** 2004. Dissertação - Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF, 2004.

DNER-DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1995). **Misturas Betuminosas a Quente. Ensaio Marshall** – Método de Ensaio. DNER 043/1995 – ME. Rio de Janeiro.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2009). **Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material.** DNIT 111/2009 - EM. Rio de Janeiro.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2009). **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço.** DNIT 112/2009 - EM. Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 035/1998 – ES – Especificação de serviço. **Agregados. Determinação da abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 081/1998 – ES – Especificação de serviço. **Agregados. Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 083/1998 – ES – Especificação de serviço. **Agregados. Análise granulométrica.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 089/1994 – ES. Agregados – **Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 194/1998 – ES – Especificação de serviço. Agregados. **Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 155/2010 – ME – Método de Ensaio. **Material asfáltico – Determinação da penetração.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 131/2010 – ME – Método de Ensaio. **Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 130/2010 – ME – Método de Ensaio. **Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 031/2006 – ME – Método de Ensaio. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNIT 136/2010 – ME – Método de Ensaio. **Pavimentos flexíveis - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro.

DONG, D, HUANG, X, LI, X, ZHANG, L. Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt, **Constr Build Mater** v.29, p. 316–322, 2012.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** 2006. 311f. Tese – Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos 2006.

FERREIRA, J. L. S. **Novas diretrizes para seleção granulométrica de misturas asfálticas densas com foco na deformação permanente.** 2017. 81f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2017.

FERREIRA, J. L. S., SOARES, J. B., BASTOS, J. B. S. Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente, **Transportes** v. 24, n. 2, p. 46-52, 2016.

GRECA ASFALTOS. **Fatos & Asfaltos**, Informativo quadrimestral, ano 8, nº 24 de Outubro, 2011. Disponível em: < http://www.grecaasfaltos.com.br/fatos/fatos_24.pdf> . Acesso em: 08.fev.2019.

HASSAN, N. A.; AIREY, G. D.; JAYA, R. P; MASHROS, N.; AZIZ., Md. M. A review of crumb rubber modification in dry mixed rubberised asphalt mixtures. **Jurnal Teknologi**, v. 4, p. 127-134, 2014.

HOSSAIN, Z.; BAIRGI, B.; BELSHE, M. Investigation of moisture damage resistance of GTR-modified asphalt binder by static contact angle measurements. **Constr. Build. Mater.** v. 95, p.45-53, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DE RECURSOS NATURAIS – IBAMA. **Relatório Pneumáticos 2017 Resolução CONAMA nº 416/09.** Disponível em: <<file:///C:/Users/camil/Downloads/ibama-relatorio-pneumaticos-2017-nov.pdf>>. Acesso em: 01. ago. 2018

IRFAN, M.; ALI, Y.; AHMED, S.; HAFEEZ, I. Performance Evaluation of Crumb Rubber-Modified Asphalt Mixtures Based on Laboratory and Field Investigations. **Arab J Sci Eng**, v. 43, p. 1795-1806, 2017.

KARACASU, M., OKUR, V., ER, A. A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures. **The Scientific World Journal**, Article ID 258586, p.9, 2015.

KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture.** 2006. 158 f. Dissertation (Doctor of Philosophy) - University of Florida, Gainesville, 2006.

LEI Nº 10164 de 25/11/2013. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=262109>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

MENESES, J. M. B. **Logística reversa de pneus inservíveis: modelo de otimização para decisões estratégicas e táticas**. 2018. 152 f. Dissertação - Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, SP, 2018.

MOON, K. H., FALCHETTO, A. C, MARASTEANU, M., TUROS, M. Using Recycled Asphalt Materials as an Alternative Material Source in Asphalt Pavements, **KSCE Journal of Civil Engineering**. v.18, p 149-159, 2014.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento de ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004. 185f. Dissertação - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.

NETO, S. A. D.; **FARIAS**, M. M.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Influence of Crumb Rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties. **Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference**, Palm Springs, Califórnia, Estados Unidos.

NUNES, L. C. **Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto-Borracha de 4ª Geração**. 2017. 142f. Dissertação - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ODA, Sandra. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto. Borracha em Obras de Pavimentação**. 2000. Tese – Programa de pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ODA, S.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. **Acta Scientiarum Technology**, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.

OICA - Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/production-statistics/2017-statistics/>>. Acesso em: 04. fev. 2019.

PARTL, M.N., PASQUINI, E., CANESTRARI, F., VIRGILI, A. Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures. **Constr. Build. Mater.** v. 24, n.3, p.283-291, 2010.

PILATI, F.; FAXINA, A.L.; FABBRI, G. T.P; GIGANTE, A. C.; SÓRIA, M. H. A.; LEITE, L.F.M. Procedimento para a formulação de asfaltos-borracha com vistas a atender os requisitos da dosagem Marshall, **Transportes** v. 26, n. 2, p. 13-23, 2008.

PEREZ. I , PASANDÍN, A.R. Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 405-414, 2017.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias**. 2004. 166f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2004.

PRESTI D.L. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review, **Construction and Building Materials** v.49, p. 863–881, 2013.

MENSCH, N. G. **Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas**. 2017. 168 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2017.

MOGHADDAM, T. B.; SOLTANI, M.; KARIM, M. R. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. **Materials and Design** v. 53, p. 317–324, 2014.

MOHYELDIN RAGAB, M.; ABDELRAHMAN, M. Enhancing the crumb rubber modified asphalt's storage stability through the control of its internal network structure, **Journal of Pavement Research and Technolog** p. 1-15, 2017.

NAVARRO, F. M.; GÁMEZ, C. R. Influence of Crumb Rubber on the Indirect Tensile Strength and Stiffness Modulus of Hot Bituminous Mixes. **Journal of materials in civil engineering**. p.715-724, 2012.

NEJAD, F. M.; ARABANI, M.; HAMED, Gh. H. AZARHOOSH, A. R. Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**. v. 47, p.1523-1527, 2013.

NETO, B. B. P.; OLIVEIRA, D.R.C.; RAMOS, D. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. **Revista Matéria**, v. 16, n. 2, pp. 690 – 702, 2011.

ROBERTS, F.L., KANDHAL, P.S., BROWN, E.R., DUNNING, R.L 1989. **Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt**. NCAT Report 89-3.

ROSA, A. P. G; SANTOS, R. A; CRISPIM, F. A; RIVA, R. D. D. Análise Comparativa entre asfalto modificado com borracha reciclada de pneus e asfalto modificado com polímeros. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.20. p. 31-38, 2012.

SALINI, R. B. **Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas**. 2000. 139f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

SALOMÃO, P. E, JUNIO, E. F., SOUZA, S. A. Caracterização e estudo de pneus para aproveitamento na elaboração de asfalto ecológico. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, p. 129-145, 2017.

SHENG, Y., LI, H., GENG, J., TIAN, Y., LI, Z., XIONG, R. Production and performance of desulfurized rubber asphalt binder. **International Journal of Pavement Research and Technology**. v.10, p. 262–273, 2017.

SI, W.; Li, N.; MA, B.; TIAN, Y.; ZHOU, S. Temperature Response to Tensile Characteristics of the Hot Asphalt Mixtures. **KSCE Journal of Civil Engineer**, v.0, n.0. p. 1-11, 2015.

SIENKIEWICZ, M.; KUCINSKA-LIPKA, J.; JANIK, H.; BALAS, A. Progress in used tyres management in the European Union: a review. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1742-1751, 2012.

SILVA, J. A. A. **Estudo das propriedades físicas, de estado e mecânicas de misturas asfálticas para os revestimentos de pistas de aeródromos**. 2011. 108f. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2011.

SILVA, L.; Benta, A.; Santos, L.P. Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking, **Construction and Building Materials**. 160, p. 539-550, 2018.

SOARES, J.S. **Investigação da Relação entre Parâmetros da Compactação Giratória e de Deformação Permanente em Misturas Asfálticas Densas**. 2014. 109f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2014.

Sousa, J.B; Pais, J.C.; Saïm, R., 2000. The Effect of Mode of Loading on the Comparison Between Asphalt Rubber and Traditional Hot Mixes Laboratory Performance. Asphalt Rubber 2000, **Proceedings**. Vilamoura, Portugal.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**. 2004. 280 f. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, 2004.

SPECHT, L. P; CERATTI, J. A. P; BRITO, L. A. T; BERNUCCI, L. L. B. Avaliação das propriedades plásticas de misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneus através dos processos úmido e seco. **Revista Pavimentação**. v. 2, n.8, p.34-43, 2007.

STEFANOVIĆ, S; JEVREMOVIĆ, V; JANJIĆ, N; STANOJEVIĆ. D; CVEJIC, R. Basic strategy of tire quality with the emphasis on the tire industry. **IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)**. v.4, p.24-31, 2014.

THIVES. L. P; TRICHÊS. G; PEREIRA. P. A. A; PAIS. J. C. **Influência do tipo de asfalto base no desempenho mecânico de misturas com asfalto borracha** (2011). In: XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, v. 16, p. 1-8.

THIVES. L. P. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 2009. 581 f. Tese - Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina 2009.

TFHRC, 2005. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Turner Fairbank Highway Research Center. FHWA, Federal Highway Administration. Washington, D.C., USA.

VAN KIRK E HOLLERAN. **Reduced Thickness Asphalt Rubber Coucrete Leads to Cost Effective Pavement Rehabilitation** (2000). In: I International Conference World of Pavements, v.1, p. 1-12.

VOLLE, T. H. **Performance of Rubberized Asphalt Pavements in Illinois**. Illinois. Illinois Department of Transportation, 2000.

XIAO, F.;AMIRKHANIAN, S.N. Laboratory investigation of moisture damage in rubberised asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. **Int. J. Pavement Eng.** v.10, n.5, p.319-328, 2009.

ZHOU. H, HOLIKATTI, S, VACURA, P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review. **Journal of Traffic and Transportation Engineering.** v.1, n.1, p.39-48, 2014.

