



**UFPE**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IVANA GOMES MAIA

**AVALIAÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS ASFÁLTICAS PREPARADAS COM  
PÉLETES DE ASFALTO-BORRACHA**

Recife

2023

IVANA GOMES MAIA

**AVALIAÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS ASFÁLTICAS PREPARADAS COM  
PÉLETES DE ASFALTO-BORRACHA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

**Orientador:** Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

**Coorientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Laura Maria Goretti da Motta.

Recife

2023

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

M217a Maia, Ivana Gomes.  
Avaliação de Ligantes e Misturas Asfálticas Preparadas com Péletes de  
Asfalto-Borracha / Ivana Gomes Maia, 2023.  
173 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho;  
Coorientadora: Profa. Dra. Laura Maria Goretti da Motta.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa  
de Pós-graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.  
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia Civil. 2. Asfalto-borracha. 3. Péletes de asfalto-borracha.  
4. Sustentabilidade. 5. Reologia. 6. Ensaios laboratoriais. I. Coutinho,  
Roberto Quental (Orientador). II. Motta, Laura Maria Goretti da  
(Coorientadora). III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG / 2023 - 271

IVANA GOMES MAIA

**AVALIAÇÃO DE LIGANTES E MISTURAS ASFÁLTICAS PREPARADAS COM  
PÉLETES DE ASFALTO-BORRACHA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 06/09/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Profª Drª Kamilla Vasconcelos Savasini (Examinadora Externa)  
Universidade de São Paulo

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães (Examinador Externo)  
Instituto Militar de Engenharia

Participação por videoconferência  
Profª Drª Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (Examinadora Externa)  
Universidade Federal do Ceará

Participação por videoconferência  
Profª Drª Leni Figueiredo Mathias Leite (Examinadora Externa)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Marcos Antonio Fritzen (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

À minha inesquecível tia Biba (*in memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, fonte de amor, coragem e inspiração.

Ao meu orientador professor Dr. Roberto Quental Coutinho, pelos preciosos ensinamentos geotécnicos, seriedade e paciência.

À minha coorientadora professora Dr<sup>a</sup>. Laura Maria Goretti da Motta, pelo inestimável conhecimento compartilhado na área de pavimentação asfáltica, mas, mais ainda, pelo altruísmo, integridade, amizade e empatia.

À Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, pela oportunidade de evoluir intelectualmente e contribuir com a sociedade ao meu redor, por meio do conhecimento adquirido na área de Geotecnia e Infraestrutura de Transportes.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/ COPPE, pela parceria e disponibilidade, no que diz respeito à realização dos ensaios físicos e mecânicos de ligantes e misturas asfálticas empregados nesta pesquisa.

À equipe do laboratório da COPPE/UFRJ pela condução dos ensaios, estando sempre disponível para contribuir cientificamente com o andamento do estudo.

À Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, pela elaboração de ensaios complementares para a análise do material (péletes).

À Phoenix Industries, pelo fornecimento dos péletes de asfalto-borracha utilizados na pesquisa.

Ao Dr. Fabiano Pereira Cavalcante, pelo incentivo e confiança em mim depositados, desde o dia da inscrição para o processo de seleção do Doutorado.

Ao Dr. Marlos Wilson de Góis, pela oportunidade de exercer a minha paixão na engenharia, concomitantemente ao desenvolvimento da minha Tese de Doutorado.

À querida amiga que o Doutorado colocou em meu caminho, Betânia Queiroz da Silva.

Ao Iran Everton por toda atenção e gentileza com os procedimentos burocráticos necessários para o processo final do Doutorado.

À Maria Rosângela Alves da Silva, por todo o cuidado e carinho com a minha filha, Tarsila, conferindo tranquilidade ao meu coração para finalizar este estudo.

## RESUMO

Entre os materiais empregados como modificadores de ligantes asfálticos, a borracha granulada de pneu inservível tem proporcionado a melhoria da resistência à deformação permanente, às trincas por fadiga e ao envelhecimento. Há dois métodos de incorporação da borracha de pneus às misturas asfálticas: processo seco e processo úmido. Na via seca, os grãos de borracha são misturados diretamente aos agregados. Na via úmida, a borracha é adicionada previamente ao ligante asfáltico. Os péletes de asfalto-borracha (PAB) são produtos recentes e surgiram para simplificar o processo de obtenção do asfalto-borracha. A facilidade de transporte, o armazenamento a temperatura ambiente e sua pronta disponibilidade configuram-se como vantagens. O objetivo desta tese foi avaliar, em laboratório, a influência da adição dos PAB a ligantes e/ou misturas asfálticas, usando os critérios estabelecidos pela especificação ASTM 8239/21, além dos ensaios de resistência à fadiga (LAS), estabilidade à estocagem e emissão de gases (DEC). Para tanto, foi realizada uma comparação entre as propriedades reológicas de amostras de asfalto-borracha comercial AB-08 e CAP 50/70 com adição de 20% *PelletPav (PP)*, 30% *PelletPav (PP)*, 20% *PelletPave-Plus (PPP)* e 30% *PelletPave-Plus (PPP)*. Para os ligantes modificados com PAB prevaleceu o grau de desempenho (PG) 70, inferior ao PG 82 obtido para o AB-08, porém maior do que o PG 58 encontrado para o CAP 50/70. No ensaio de MSCR foi observada baixa recuperação elástica dos ligantes modificados por PAB. No ensaio de LAS houve um discreto acréscimo na vida de fadiga dos ligantes com PAB, quando relacionados aos dados do AB-08. No geral, a análise no DEC indicou que os ligantes modificados com péletes apresentaram níveis de emissão de fumos menores que o AB-08. O CAP 50/70 modificado com PAB foi testado em misturas asfálticas do tipo *Gap-Graded*, demonstrando difícil manuseio e trabalhabilidade, tanto pela via úmida, quanto pela seca. Por fim, foi constatado que a utilização de PAB na pavimentação é interessante, porém existe a necessidade de otimização do desempenho deles. A fabricação nacional pode ser um dos caminhos, pois viabilizaria o pleno conhecimento de seus componentes.

Palavras-chave: asfalto-borracha; péletes de asfalto-borracha; sustentabilidade; reologia; ensaios laboratoriais.

## ABSTRACT

Among materials used as asphalt binder modifiers, granulated rubber from scrap tires has shown good results in terms of improving resistance to permanent deformation, fatigue cracking and aging. The incorporation of crushed tire rubber into asphalt mixtures is achieved through two methods: the dry process, where rubber grains are introduced with aggregates, and the wet process, where rubber is added to conventional asphalt binder. The recently introduced asphalt-rubber pellet simplifies the production of asphalt-rubber. The principal advantage of this product lies in its facile transport and storage under ambient conditions through various available modes of transportation. This thesis evaluated the influence of asphalt-rubber pellets on asphalt binders and mixtures using ASTM 8239/21 specifications, Linear Amplitude Sweep (LAS), storage stability, and gas emissions. This study compared rheological properties of commercial asphalt-rubber (AB-08) and modified binders containing pellets (CAP 50/70 + 20% PelletPav (PP), 30% PelletPav (PP), 20% PelletPave-Plus (PPP) e 30% PelletPave-Plus (PPP)). Results indicated a performance level of PG 70 for binders modified with pellets, lower than PG 82 for AB-08 but higher than PG 58 for conventional binders (CAP 50/70). Multiple stress creep and recovery tests revealed lower elastic recovery for binders with asphalt-rubber pellets. While the LAS test showed an increase in fatigue life for modified binders, the improvement is considered slight compared to commercial samples. The analysis of the materials and their fumes generated in the laboratory allowed us to conclude that, in general, the binders modified with pellets presented lower emission levels when compared to AB-08. Modified binders containing pellets were tested by composing Gap-Graded asphalt mixtures. In the experiments, the difficult handling of asphalt mixtures stands out, both in dry and wet processes. The research concluded that the use of asphalt-rubber pellets in paving is promising but requires further refinement, with national manufacturing potentially offering a viable avenue for comprehensive performance optimization.

Keywords: asphalt-rubber; asphalt-rubber pellets; sustainability; rheology; laboratory evaluation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Principais defeitos dos pavimentos asfálticos brasileiros: a) deformação permanente e b) fadiga.....	18
Figura 2 –	Número de publicações por ano utilizando pó de borracha na Engenharia no mundo.....	22
Figura 3 –	Porcentagem de publicações financiadas pela China, Europa, Estados Unidos e resto do mundo (projetos, políticas governamentais, subsídios etc.).....	22
Figura 4 –	Substâncias tóxicas provenientes da queima de pneus sendo liberadas na atmosfera.....	28
Figura 5 –	Composição dos pneus de veículos de passeio.....	29
Figura 6 –	Amostras de borracha de pneu, moídas: a) Moagem criogênica (à esquerda) b) trituração ambiente (à direita).....	30
Figura 7 –	Esquema de fabricação de asfalto-borracha via úmida do tipo <i>terminal blending</i> .....	39
Figura 8 –	Efeito da temperatura na curva de digestão.....	40
Figura 9 –	Variáveis envolvidas no processo de produção do ligante asfalto-borracha (via úmida).....	41
Figura 10 –	Amostra de <i>Continuous Blend</i> (à esquerda) e <i>Terminal Blend</i> (à direita).....	42
Figura 11 –	Métodos de medida da consistência do CAP em diferentes temperaturas.....	46
Figura 12 –	Deformação elástica (à esquerda) e exemplo de amostra viscoelástica (à direita).....	47
Figura 13 –	Representação esquemática de alguns comportamentos não-newtonianos.....	48
Figura 14 –	Relação entre o módulo complexo de cisalhamento, o módulo de armazenamento, o módulo de perda e o ângulo de fase.....	49
Figura 15 –	Resposta de um material viscoelástico a uma tensão aplicada em um intervalo de tempo.....	51
Figura 16 –	Tensão de cisalhamento máxima x deformação máxima num ensaio de cisalhamento.....	53

Figura 17 –	Esquema do equipamento reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).....	54
Figura 18 –	Correlação entre os resultados da fadiga de misturas asfálticas e o parâmetro $ G^*  \cdot \sin \delta$ das misturas asfálticas....	55
Figura 19 –	Esquema das tensões e deformações durante a realização do ensaio MSCR.....	58
Figura 20 –	Localização das deformações em um ciclo de fluência e recuperação do ensaio MSCR.....	58
Figura 21 –	Amostra fraturada no DSR por meio do ensaio de LAS.....	60
Figura 22 –	Curvas de fadiga obtida no Ensaio de LAS.....	61
Figura 23 –	Representação esquemática de um pélete de asfalto.....	67
Figura 24 –	Representação esquemática de um saco contendo uma quantidade de péletes de asfalto estáveis ao armazenamento.....	68
Figura 25 –	Amostras de péletes estocados à temperatura ambiente.....	68
Figura 26 –	Processo peletizado: péletes misturados diretamente aos agregados.....	70
Figura 27 –	Exemplo de Usina móvel utilizada para fabricação de massa asfáltica com asfalto-borracha peletizado.....	71
Figura 28 –	Fluxograma de um método de processamento dos péletes de asfalto.....	74
Figura 29 –	Vista e componentes da usina para fabricação dos péletes de asfalto-borracha.....	76
Figura 30 –	Amostra de péletes de GTR.....	77
Figura 31 –	Amostra de <i>PelletPAVE-AR</i> .....	78
Figura 32 –	Amostra de <i>PelletPAVE-TR</i> – ( <i>PelletPAVE- Plus</i> ) desta pesquisa.....	79
Figura 33 –	Gráfico do grau de desempenho versus % <i>PelletPAVE-TR</i> ....	80
Figura 34 –	Amostra de <i>PelletRAP</i> .....	80
Figura 35 –	Vista da condição do pavimento existente antes do recapeamento.....	82
Figura 36 –	Vista da condição do pavimento existente após o recapeamento.....	82

Figura 37 –	Amostras de materiais utilizados por Nunes (2017): RAR (à esquerda) e pélete (à direita) em ensaios de laboratório.....	83
Figura 38 –	Péletes de asfalto-borracha sendo carregados na usina de asfalto.....	85
Figura 39 –	Aplicação em campo da mistura com os péletes.....	85
Figura 40 –	Aspecto de projeto conduzido com <i>PelletPAVE</i> na Holanda...	86
Figura 41 –	Aspecto de projeto conduzido com <i>PelletPAVE</i> na Holanda...	86
Figura 42 –	Aspecto de projeto conduzido com <i>PelletPAVE</i> na Holanda...	86
Figura 43 –	Aspecto de projeto conduzido com <i>PelletPAVE</i> na Holanda...	86
Figura 44 –	Esquema do processo de reparo de buracos com péletes de asfalto e indução de calor.....	87
Figura 45 –	Amostras teste (a) e o equipamento indutor de calor (b).....	88
Figura 46 –	Esquema do processo de reparo de buracos com péletes de asfalto e indução de calor.....	90
Figura 47 –	Vista da condição do pavimento antes do recapeamento no km 175+490.....	95
Figura 48 –	Vista da condição do remendo do pavimento após 30 dias de tráfego pesado no km 175+490.....	95
Figura 49 –	Vista da condição do pavimento antes do recapeamento no km 182+960.....	96
Figura 50 –	Vista da condição do pavimento no km 182+960 após 25 dias de recapeado.....	96
Figura 51 –	Vista da condição do pavimento no km 88+200 antes do recapeamento.....	97
Figura 52 –	Vista da condição do pavimento no km 88+200 durante o recapeamento (aplicação de massa asfáltica com balde).....	97
Figura 53 –	Vista da condição do pavimento no km 88+200 180 dias após o remendo.....	98
Figura 54 –	Vista da condição do pavimento no km 88+200 180 dias após o remendo.....	98
Figura 55 –	Vista da condição do pavimento no km 88+0,50 durante os remendos.....	98

Figura 56 –	Vista da condição do remendo no km 88+0,50 após passagem de veículo.....	98
Figura 57 –	Vista da condição do remendo no km 88+0,50 após 180 dias de tráfego pesado.....	98
Figura 58 –	Vista da condição do pavimento no km 88+0,50 após 180 dias do remendo.....	98
Figura 59 –	Vista da condição do pavimento no km 14+310 antes do remendo, após fresagem e pintura de ligação.....	99
Figura 60 –	Vista da condição do pavimento no km 14+310 120 dias após o remendo.....	99
Figura 61 –	Composição dos fumos dos cimentos asfálticos quando aquecidos.....	102
Figura 62 –	Vista do dispositivo de extração e coleta completo em funcionamento.....	103
Figura 63 –	Fluxograma geral dos ensaios que embasaram a presente pesquisa.....	110
Figura 64 –	Curva granulométrica adotada para a mistura, com indicação dos limites máximo e mínimo segundo a faixa do DNIT ( <i>gap graded</i> – Norma DNIT 112/09).....	114
Figura 65 –	Amostra de <i>PelletPAV</i> .....	115
Figura 66 –	Amostra de <i>PelletPAVE-PLUS</i> .....	115
Figura 67 –	Vista do tamanho dos grãos da amostra de <i>PelletPAV</i> .....	116
Figura 68 –	Vista <i>PelletPAV</i> (à esquerda) e <i>PelletPAVE-Plus</i> (à direita)....	116
Figura 69 –	Misturador tipo agitador de baixo cisalhamento com hélice....	121
Figura 70 –	Pesagem da amostra de ligante asfalto-borracha para RTFOT.....	121
Figura 71 –	Temperatura da estufa para o ensaio de RTFOT (163 <sup>a</sup> C).....	121
Figura 72 –	Amostras sendo retiradas da estufa de filme fino rotativo.....	122
Figura 73 –	Amostras após o ensaio de RTFOT.....	122
Figura 74 –	Amostras de 25mm sendo preparadas para o DSR.....	122
Figura 75 –	Amostras de 25mm prontas para o DSR.....	122
Figura 76 –	Reômetro de cisalhamento dinâmico.....	123
Figura 77 –	Detalhe do equipamento.....	123

Figura 78 –	Pesagem de CAP.....	124
Figura 79 –	Pesagem de pélete.....	124
Figura 80 –	Agitador de hélice com câmara de aquecimento para modificação do ligante com pélete.....	124
Figura 81 –	Resultados do ensaio de ponto de amolecimento para os ligantes utilizados nesta pesquisa.....	132
Figura 82 –	Grau de desempenho dos materiais utilizados nesta pesquisa.....	139
Figura 83 –	a) Parâmetros de compliância não recuperável e porcentagens de recuperação para as tensões de 0,1 kPa após RTFOT a 70°C e b) Parâmetros de compliância não recuperável e porcentagens de recuperação para as tensões de 3,2 kPa após RTFOT a 70°C.....	143
Figura 84 –	a) Curva tensão versus deformação, b) Curva característica de dano do ensaio LAS.....	147
Figura 85 –	a) Vida de fadiga (Nf) em função da deformação cisalhante para os ligantes estudados nesta pesquisa.....	148
Figura 86 –	Níveis de emissão de HPA's dos ligantes estudados nesta pesquisa.....	151
Figura 87 –	Corpos de prova confeccionados considerando 30% de pélete, com relação à massa total do ligante e teor de 9,0% de ligante.....	152
Figura 88 –	Corpos de prova confeccionados considerando 30% de pélete, com relação à massa total do ligante e teor de 8,5% de ligante.....	152
Figura 89 –	Corpos de prova confeccionados considerando 30% de pélete, com relação à massa total do ligante e teor de 8,0% de ligante.....	152
Figura 90 –	Corpos de prova confeccionados considerando 30% de pélete, com relação à massa total do ligante e teor de 7,5% de ligante.....	152
Figura 91 –	Formação de película na superfície de um corpo de prova.....	153

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Exigências estipuladas em norma DNIT para caracterizar o asfalto-borracha.....	33
Tabela 2 –	Exigências estipuladas pela norma norte-americana para caracterizar o asfalto-borracha.....	34
Tabela 3 –	Proposta de especificação por desempenho do asfalto-borracha da África do Sul.....	35
Tabela 4 –	Exigências estipuladas pela norma espanhola para caracterizar o asfalto-borracha híbrido.....	37
Tabela 5 –	Propriedades reológicas do pélete avaliado.....	81
Tabela 6 –	Valores $G^*/\text{Sen } \delta$ a diferentes temperaturas.....	83
Tabela 7 –	Valores obtidos no ensaio de <i>creep</i> a 60°C, Pa.....	83
Tabela 8 –	Síntese dos estudos desenvolvidos utilizando péletes de asfalto.....	92
Tabela 9 –	Classificação dos 16 HPA's prioritários quanto à sua carcinogenicidade segundo a IARC*.....	105
Tabela 10 –	Propriedades físicas dos agregados minerais da pedreira Sepetiba que serão usados nesta pesquisa.....	112
Tabela 11 –	Características da faixa granulométrica utilizada para as misturas asfálticas desta pesquisa.....	114
Tabela 12 –	Características granulométricas da borracha de pneus usada nos péletes de asfalto- borracha.....	117
Tabela 13 –	Características tradicionais dos ligantes estudados nesta pesquisa.....	131
Tabela 14 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70.....	134
Tabela 15 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – Ligante asfáltico CAP 50/70.....	134
Tabela 16 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico AB-08.....	134

Tabela 17 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – Ligante asfáltico AB-08.....	135
Tabela 18 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70 + 20% PPP.	135
Tabela 19 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – CAP 50/70 + 20% PPP.....	136
Tabela 20 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70 + 30% PPP.	136
Tabela 21 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – CAP 50/70 + 30% PPP.....	137
Tabela 22 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70 + 20% PP...	137
Tabela 23 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – CAP 50/70 + 20% PP.....	138
Tabela 24 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70 + 30% PP...	138
Tabela 25 –	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – CAP 50/70 + 30% PP.....	139
Tabela 26 –	Parâmetros obtidos em duplicata para compliância não recuperável e das porcentagens de recuperação para as tensões de 0,1 kPa, após RTFOT a 70°C.....	141
Tabela 27 –	Parâmetros obtidos em duplicata para compliância não recuperável e das porcentagens de recuperação para as tensões de 3,2 kPa, após RTFOT a 70°C.....	141
Tabela 28 –	Coeficientes obtidos no ensaio de LAS para os ligantes estudados nesta pesquisa.....	146
Tabela 29 –	Parâmetros obtidos no ensaio de LAS para os ligantes estudados nesta pesquisa.....	148

Tabela 30 –	Resultados dos ensaios de emissão de gases realizados no DEC.....	150
Tabela 31 –	Dados volumétricos e mecânicos da dosagem de 30% de PPP + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha).....	154
Tabela 32 –	Dados volumétricos da dosagem de 30% de PPP + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha).....	154
Tabela 33 –	Dados volumétricos da dosagem de 30% de <i>PelletPave-Plus</i> + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha) com cp's de 150mm de diâmetro e amostras extraídas dos centros destes cp's.....	155
Tabela 34 –	Dados volumétricos e mecânicos da dosagem de <i>PelletPave-Plus</i> aquecido junto com o agregado.....	155

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.2	OBJETIVOS .....	24
1.2.1	<b>Geral</b> .....	24
1.2.2	<b>Específicos</b> .....	24
1.3	ESTRUTURA DA TESE .....	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	27
2.1	BREVE HISTÓRICO.....	27
2.2	LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS .....	32
2.2.1	<b>Conceitos gerais</b> .....	37
2.2.2	<b>Vantagens e desvantagens do asfalto-borracha</b> .....	43
2.2.3	<b>Ensaio de caracterização reológica</b> .....	45
2.2.3.1	Ensaio de reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR.....	52
2.2.3.2	Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla - MSCR .....	57
2.2.3.3	Ensaio de varredura linear de amplitude - LAS .....	59
2.2.4	<b>Balanço e novas tendências internacionais no uso de asfalto-borracha</b> .....	62
2.3	USO DE PÉLETES DE ASFALTO-BORRACHA EM PESQUISAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS .....	66
2.3.1	<b>Tecnologias de peletização do asfalto-borracha</b> .....	72
2.3.2	<b>Tipos de péletes de asfalto-borracha</b> .....	76
2.3.3	<b>Estudos desenvolvidos utilizando a metodologia dos péletes de asfalto-borracha</b> .....	81
2.4	MISTURAS ASFÁLTICAS CONSTITUÍDAS POR BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS .....	93
2.5	PRÁTICAS NACIONAIS .....	95
2.5.1	<b>Concessionária Nova Dutra BR-116 – Trecho de São Paulo</b> .....	95
2.5.2	<b>Rodovia dos Bandeirantes/ BR-381</b> .....	96
2.5.3	<b>Concessionária Arteris BR-381 – Trecho de São Paulo</b> .....	96
2.6	PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DE BAIXO CARBONO .....	99

2.6.1	<b>Sustentabilidade na pavimentação</b> .....	100
2.6.2	<b>Deteção de Gases de Efeito Estufa (GEE)</b> .....	101
2.6.3	<b>Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – HPA’s</b> .....	104
2.6.3.1	Técnicas de análise para determinação de HPA’S.....	106
2.7	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	106
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>108</b>
3.1	AGREGADOS .....	111
3.2	LIGANTES ASFÁLTICOS.....	115
3.2.1	<b>Procedimentos e equipamentos para os ensaios de RTFOT, DSR, MSCR e LAS</b> .....	<b>119</b>
3.2.2	<b>Processo de incorporação dos péletes aos ligantes asfálticos</b> .....	<b>123</b>
3.2.3	<b>Dispositivo Extrator Coletor de Fumos - DEC</b> .....	<b>125</b>
3.3	MISTURAS ASFÁLTICAS .....	125
3.3.1	<b>Procedimentos de ensaios das misturas asfálticas</b> .....	<b>126</b>
3.3.2	<b>Método de dosagem das misturas asfálticas</b> .....	<b>127</b>
3.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	129
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>130</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS LIGANTES.....	130
4.2	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DOS LIGANTES .....	133
4.2.1	<b>Determinação do PG de alta temperatura</b> .....	<b>133</b>
4.2.2	<b>MSCR a 70°C após RTFOT</b> .....	<b>140</b>
4.2.3	<b>LAS (<i>Linear Amplitude Sweep</i>)</b> .....	<b>145</b>
4.3	DISPOSITIVO EXTRATOR DE FUMOS – DEC.....	149
4.4	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	151
4.4.1	<b>Dados volumétricos e mecânicos das dosagens</b> .....	<b>151</b>
4.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	156
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>158</b>
5.1	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	162
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>163</b>
	<b>APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DO PÓ DE BORRACHA</b> .....	<b>173</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma estrutura de pavimento asfáltico deve atender aos requisitos de conforto, segurança, economia e variações climáticas, sendo capaz de resistir às cargas cíclicas impostas pelo tráfego dos veículos e transmiti-las para as camadas inferiores. As tensões não devem alcançar o topo do subleito em uma magnitude que provoque o seu colapso por cisalhamento, como também, não devem ocasionar microfissuras por fadiga nas faces superior e inferior das camadas estabilizadas quimicamente e dos revestimentos asfálticos.

A Figura 01 mostra as principais patologias incidentes nos pavimentos, que são a fadiga e/ou deformação permanente. Para evitá-las pode-se incrementar a espessura das camadas, melhorar a dosagem da mistura asfáltica, ou realizar a substituição do material asfáltico convencional por um de melhor qualidade, minorando assim, as tensões e deformações que incidem na estrutura.

Figura 01 - Principais defeitos dos pavimentos asfálticos brasileiros: a) deformação permanente e b) fadiga



a) ATR: PE-015



b) trincas por fadiga: BR-436/MS

Fonte: Acervo Future Motion Brasil, 2022

Além da deformação permanente e das trincas por fadiga, podem ocorrer outras manifestações patológicas importantes que devem ser consideradas em um pavimento asfáltico, tais como: dano por umidade induzida e desgaste. Assim, é importante a avaliação dos agregados e do ligante asfáltico que compõem e

determinam as propriedades das misturas asfálticas utilizadas no revestimento de pavimentos flexíveis e/ou semirrígidos.

Entre materiais aplicados para aumentar a vida útil, estudos mostram que a borracha granulada de pneu inservível vem apresentando bons resultados de comportamento como modificador do ligante asfáltico, sendo conhecidos como asfalto-borracha. Os asfaltos-borracha proporcionam bom desempenho à fadiga e à deformação permanente, como mostram Leite (1999), Oda (2000), Bertollo (2002), Specht (2004), Dantas Neto (2004), Lima (2008), Camargo (2016), Nunes (2017) e Sierra, Moreno e Rúbio (2022).

No Brasil, a partir de 1990, o Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) e algumas universidades começaram a investigar o comportamento da borracha de pneu inservível como agente modificador do ligante asfáltico (Fontes, 2009). Leite (1999) relatou que para aumentar a resistência ao envelhecimento, à fadiga e à deformação permanente, faz-se adições de diferentes polímeros ou de borracha moída de pneus ao cimento asfáltico de petróleo (CAP). A borracha moída de pneus é um dos modificadores utilizados, versátil e durável apresentando vantagens em relação ao ligante convencional.

De acordo com a definição da Norma ASTM D8-02 (*Road and Paving Materials*) o asfalto-borracha é uma mistura de cimento asfáltico, borracha de pneus inservíveis e certos aditivos, dependendo do fabricante, na qual a borracha corresponde a, pelo menos, 15% do peso total da mistura.

Os péletes (do inglês "*pellet*") de asfalto-borracha, designação dada à sua comercialização de forma processada como pequenas pelotas, são materiais muito recentes no mercado de pavimentação e surgiram para simplificar o processo de obtenção e de comercialização de asfalto-borracha. O pélete pode ser utilizado como uma opção para gerar asfaltos modificados por borracha do tipo *terminal blend* ou *continuous blend*, quando as especificações de projeto requerem um elevado teor de borracha e alta viscosidade, a fim de atender requisitos de viscosidade, penetração, ponto de amolecimento e resiliência.

A patente US 2010/0056669 cita que os péletes são constituídos de cimento asfáltico, borracha moída de pneu (15 a 30% em peso), materiais finos provenientes da cal hidratada, rochas minerais, ceras e polímeros (Bailey, 2010). Outra patente americana, US 8404164/2013 também trata da peletização do asfalto-borracha

(Sockwell, 2013). Nesta composição os péletes contêm entre aproximadamente 30% e 40% por peso de ligante; 15% e 30% em peso de composto de enrijecimento; 35% e 45% em peso do conjunto composto de endurecimento; e aproximadamente 0,05% em peso de água. O composto de enrijecimento é formado por 10% e 20% em peso de telhas asfálticas moídas; 5% e 10% em peso de borracha vulcanizada; e até aproximadamente 0,5% em peso de zeólita. O composto de enrijecimento também pode ser cimento Portland do Tipo II.

Os asfaltos-borracha contribuem com o aspecto ecológico e social, no caso do descarte de pneus inservíveis, que ocorre de forma mais adequada, em virtude do aproveitamento eficaz da borracha já utilizada. No Brasil são descartados por ano pelo menos 450 mil toneladas de pneus, o que equivale a cerca de 90 milhões de unidades utilizadas em carros de passeio (dados disponíveis em: [//https://www.reciclanip.org.br](https://www.reciclanip.org.br), acesso em agosto/2020).

A literatura sobre o uso de péletes de asfalto-borracha mostra que a borracha de pneu é uma alternativa sustentável por manter o produto estocado a frio, sem necessidade de tanques agitados e equipamentos adicionais (Nanjegowda *et al.*, 2020).

Destaca-se que a indústria da construção civil está entre os setores alvo para atender a agenda de sustentabilidade global (AJAYI *et al.*, 2017). Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), constantes na Agenda 2030 da ONU, são um apelo global à ação para erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima, assegurando que todas as pessoas desfrutem de paz e prosperidade. No total são 17 (dezessete) objetivos ambiciosos e interconectados que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo. Cabe mencionar os objetivos 9 (nove) - indústria, inovação e infraestrutura e 13 (treze) - ação contra a mudança global do clima, os quais tratam da construção de infraestruturas resilientes, a fim de promover a industrialização inclusiva e sustentável, fomentando a inovação. (Nações Unidas Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>). Acesso em: 15/11/2023).

Em 2015, o Brasil assumiu compromisso no Acordo de Paris de limitar o aquecimento global em 1,5°C até 2045. De acordo com a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) de 2015, o país prometeu alcançar 45% de energias renováveis na matriz, reduzir 37% dos níveis de gases de efeito estufa até 2025, participação de

18% de bioenergia sustentável, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas e atingir o Net zero até 2050.

Conforme comentado por Leite *et al.* (2023), a NAPA (*National Asphalt Pavement Association*) e a EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) recomendam medidas até 2045 para mitigar a emissão de gases de efeito estufa, sendo elas: uso de material reciclado, aumento do uso de misturas frias; substituição de misturas quentes por misturas mornas; uso de bioasfalto; produção de agregados 100% elétrica; equipamentos com biocombustível e abrigo para os agregados.

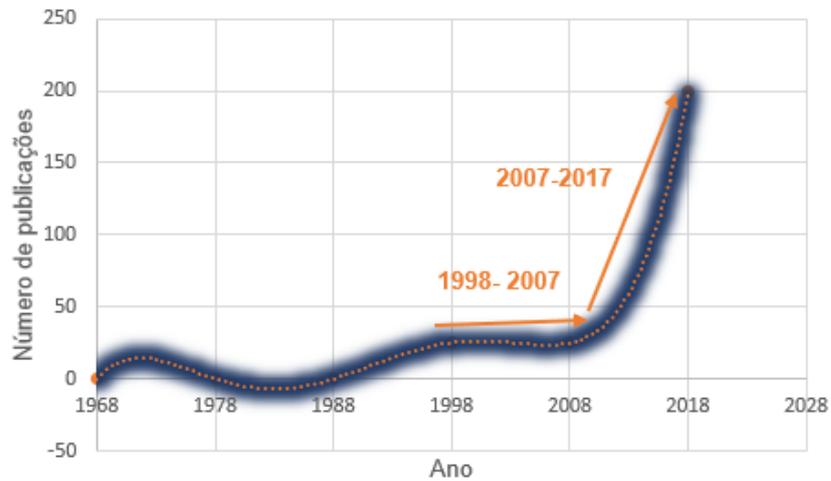
A crescente preocupação com o meio ambiente trouxe para a sociedade o desafio de reduzir as emissões das substâncias danosas à atmosfera. Neste aspecto, cabe mencionar o trabalho elaborado por Ferraz (2015) durante a sua pesquisa de doutorado realizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O referido autor desenvolveu um Dispositivo de Extração e Coleta (DEC) de fumos capaz de gerar e recolher gases produzidos pelo aquecimento de amostras de ligante asfáltico.

Diante do exposto, em 2021, foi estabelecida no Brasil a isenção do Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação (ICMS) nas operações com cimento asfáltico de petróleo chamado de asfalto ecológico (artigo 175 do Anexo I do RICMS/2000 - Decreto 66.387/2021). A isenção passou a produzir efeitos a partir de 01/01/2022. Ficaram os Estados do Ceará, Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo e o Distrito Federal autorizados a conceder isenção do ICMS nas operações com cimento asfáltico de petróleo constituído de no mínimo 15% (quinze por cento) e no máximo 25% (vinte e cinco por cento) de borracha moída de pneus usados, produto classificado no código 2713.20.00 da Nomenclatura Comum do Mercosul - NCM.

De acordo com a Ecorodovias (2021) a utilização do asfalto-borracha se estende das regiões sul, sudeste até a região norte. A Greca asfaltos (2021) informa a aplicação de 13.000km de asfalto-borracha em pavimentos brasileiros nos últimos 20 anos. A experiência de aplicação do asfalto-borracha tradicional é grande no Brasil, com sucesso nas obras. Porém, o uso dos péletes não possui ainda um histórico de aplicações no país sendo, portanto, importante sua avaliação ainda em laboratório.

A Figura 02 fornece uma visão sobre as pesquisas realizadas utilizando pó de borracha de pneus inservíveis nas construções de Engenharia em nível mundial.

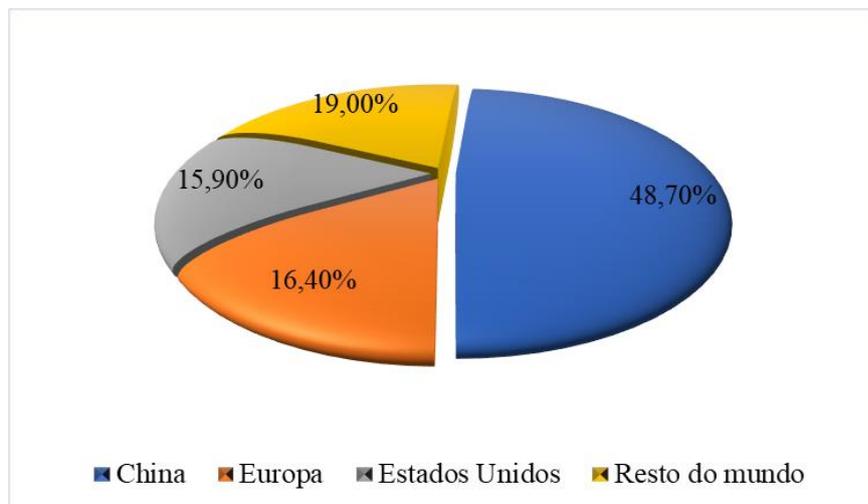
Figura 02 - Número de publicações por ano utilizando pó de borracha na Engenharia no mundo



Fonte: Adaptado de Bressi *et al.* (2019)

A Figura 03 mostra que a China lidera as pesquisas relacionadas ao reaproveitamento de borracha reciclada com 48,7% das publicações. Europa e Estados Unidos estão atrás, ambos com aproximadamente a mesma porcentagem de publicações (16,4% para Europa e 15,9% para os Estados Unidos, respectivamente). Nos últimos dez anos, a China foi o líder indiscutível em esforço científico e financiamento dedicado à reciclagem de borracha para pneus (Bressi *et al.*, 2019).

Figura 03 - Porcentagem de publicações financiadas pela China, Europa, Estados Unidos e resto do mundo (projetos, políticas governamentais, subsídios etc.)



Fonte: Adaptado de Bressi *et al.* (2019)

O presente estudo comparou as propriedades reológicas do ligante asfalto-borracha AB-08 com os asfaltos-borracha resultantes de misturas de ligante asfáltico do tipo CAP 50/70 com duas amostras de péletes, produzidos por uma empresa norte-americana (Indústrias Phoenix), denominados *PelletPave-Plus* e *PelletPAV*. Os péletes foram incorporados nas proporções de 20% e 30% (em relação à massa total do ligante). Os quatro ligantes modificados com péletes e a amostra de AB-08 foram submetidas aos ensaios das especificações ASTM 8239/21, ao ensaio de resistência à fadiga por varredura linear de amplitude LAS (AASHTO T 391-20 e DNIT 439/2022), estabilidade a estocagem e ao DEC (Ferraz, 2015). Também foram determinados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas densas descontínuas (*gap graded*) produzidas com péletes de asfalto-borracha e realizados os seguintes ensaios de comportamento mecânico: Resistência à tração por compressão diametral – RT (Norma DNIT 136/2018 – ME) e Módulo de resiliência – MR (Norma DNIT 135/2018 – ME).

Sendo o Brasil um país de dimensões continentais, cujo modal preponderante é o rodoviário, torna-se imprescindível o estudo de novas tecnologias que possam promover maior vida útil, economia e sustentabilidade durante a execução dos pavimentos, e em especial dos revestimentos asfálticos. O uso de péletes de asfalto-borracha pode ser um dos caminhos, porém é necessário testar suas qualidades e eventuais dificuldades, visando um embasamento local, e não apenas da literatura internacional ou informações do próprio fabricante.

A justificativa para esta linha de pesquisa se deve ao fato de que a tecnologia de uso em forma de péletes está sendo executada no país sem passar por estudos prévios que permitam comprovar em laboratório a eficiência ou não deste modo de configuração do asfalto-borracha, aplicando-se os péletes baseados nas informações dos fornecedores somente.

A introdução deste tipo de produto no mercado brasileiro precisa ser avaliada sob o ponto de vista da comparação com os asfaltos-borracha convencionais que já estão em aplicação na pavimentação brasileira desde 2001. Pela experiência acumulada no país de sucesso no emprego dos asfaltos-borrachas tradicionais, que inclusive já possuem especificações, não se pode inferir que o mesmo desempenho vá ser obtido com os péletes.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência da incorporação de péletes de asfalto-borracha em ligantes e misturas asfálticas e o seu mecanismo. Os aspectos técnicos do asfalto-borracha “peletizado” foram estudados individualmente e compondo uma mistura asfáltica, comparando os seus resultados com as especificações vigentes pertinentes. A partir desta pesquisa em laboratório, procurou-se inferir a viabilidade técnica e ambiental do uso dos péletes de borracha de pneu na pavimentação nacional.

### 1.2.2 Específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, alguns passos foram realizados, como os apresentados a seguir:

- Estudo do procedimento para incorporação dos péletes ao ligante asfáltico (CAP 50/70), nas proporções pré-definidas em laboratório;
- Execução de ensaios laboratoriais para caracterização física e reológica dos ligantes modificados estudados nesta pesquisa, visando comparar suas propriedades com os critérios requeridos pelas especificações da ASTM 6114/19, ASTM 8239/21 e ao ensaio de resistência à fadiga por varredura linear de amplitude (LAS);
- Os resultados obtidos também foram comparados com dados de literatura específica;
- Verificação dos níveis de emissão de gases de efeito estufa (GEE), utilizando o Dispositivo Extrator Coletor de Fumos (DEC), a partir do aquecimento dos ligantes asfálticos empregados neste estudo;
- Combinação de agregados com amostras de ligante asfáltico CAP 50/70 modificado com adição de pélete (*Pellet Pave-Plus*) em misturas descontínuas (vias seca e úmida), a fim de testar o produto compondo uma mistura asfáltica e estabelecer as suas propriedades mecânicas.

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

A Tese está estruturada em 5 (cinco) capítulos, sendo o primeiro constituído por esta Introdução, na qual são expostos os objetivos, a relevância da pesquisa e a organização da Tese.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre os assuntos considerados importantes para o tema da Tese. A revisão bibliográfica aborda os ligantes asfálticos modificados por borracha de pneus inservíveis e os ensaios para caracterização física e reológica. Versa também sobre ensaios complementares para uma melhor compreensão das características dos péletes de asfalto-borracha. Os parâmetros volumétricos e os ensaios mecânicos de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas também são comentados. São apresentadas as tecnologias de peletização de asfalto, os tipos de péletes de asfalto existentes e os estudos envolvendo a tecnologia dos péletes de asfalto-borracha.

O Capítulo 2 trata ainda dos pavimentos de baixo carbono, evidenciando a importância da gestão sustentável do ciclo de vida na pavimentação. Expõe os esforços e as recomendações realizadas mundialmente, principalmente após o Acordo de Paris no ano de 2015, para otimizar as práticas construtivas e utilização de recursos naturais e rejeitos. Apresenta o dispositivo para extração e coleta de fumos – DEC (Ferraz, 2015) e os tipos de substâncias nocivas provenientes do aquecimento dos produtos asfálticos. Enfatiza também sobre os HPA's (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) prioritários quanto à sua carcinogenicidade, segundo a IARC (*International Agency for Research on Cancer*), (2013).

No Capítulo 3 é mostrada a metodologia da pesquisa com todos os procedimentos de ensaios e materiais envolvidos no presente estudo. Descreve-se o processo de incorporação dos péletes aos ligantes asfálticos, a preparação das amostras para o ensaio de DSR, a escolha dos agregados e da curva granulométrica e o método de dosagem das misturas asfálticas. Adicionalmente versa sobre o ensaio realizado no DEC para previsão de níveis de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

No Capítulo 4 são analisados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização física e reológica dos ligantes, comentando as dificuldades

encontradas. Posteriormente são avaliados os resultados dos ensaios especiais propostos para os ligantes asfálticos modificados, assim como, dos ensaios mecânicos realizados com misturas asfálticas compostas por eles.

E, por fim, no Capítulos 5 são exibidas as principais conclusões deste estudo, bem como, as sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos itens a seguir constam informações consideradas relevantes acerca do tema proposto para esta pesquisa, conforme mencionado no item 1,3.

### 2.1 BREVE HISTÓRICO

Desde 1999, no Brasil, as empresas produtoras e as importadoras de pneus são obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida em função das quantidades de pneus fabricados, de acordo com a Resolução 258/1999 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a qual posteriormente teve alguns acréscimos de detalhes com a Resolução 301/02.

Ainda, no Brasil, a instrução normativa N.º 09 de 20 de julho de 2021, instituiu no âmbito do IBAMA, procedimentos inerentes ao cumprimento da resolução Conama N.º 416, de 30 de setembro de 2009, estabelecendo que compete aos fabricantes e importadores, realizar a coleta, dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, devendo estes promover a destinação correta para os pneus inservíveis na proporção de um pneu inservível para cada um pneu novo comercializado (relação 1:1).

Os pneus inservíveis sem destinação final de maneira correta constituem um passivo ambiental que pode ocasionar danos ao meio ambiente e à saúde pública. Destaca-se que no Brasil são descartadas por ano pelo menos 450 mil toneladas de pneus, o que equivale a cerca de 90 milhões de unidades utilizadas em carros de passeio conforme relatado em [www.reciclanip.org.br](http://www.reciclanip.org.br) (2020).

Andrietta (2002) citaram os três principais riscos dos pneus depositados ao ar livre para a saúde humana: (1) a proliferação de insetos nocivos e transmissores de doenças; (2) os pneus contêm substâncias tóxicas que quando são liberadas na atmosfera contaminam o solo, os rios e o lençol freático; (3) o risco de incêndio é sempre iminente como ilustrado na Figura 04.

Figura 04 -Substâncias tóxicas provenientes da queima de pneus sendo liberadas na atmosfera



Fonte: Sockwell (2013)

Existem inúmeras opções para os pneus inservíveis no mercado. Desde os enormes pneus de aviões até os singelos pneus de bicicletas, carrinhos de mão utilizados na construção civil, passando pelos veículos leves, pesados e máquinas agrícolas.

O conhecimento de seus componentes e efeitos após sua inclusão no ligante asfáltico são importantes, pois espera-se que o ligante asfáltico modificado transfira para a mistura asfáltica suas características e contribua para que a resistência à fadiga e à deformação permanente sejam adequadas às cargas e temperaturas a que estarão sujeitos os pavimentos.

De acordo com o Departamento de Transportes de Nevada/USA (NDOT, 2016) os pneus são compostos por 3 (três) principais componentes: borracha, aço e fibras. Cada pneu tem características próprias para sua finalidade e, assim, é possível identificar qual tipo de pneu está mais adequado para contribuir no pavimento sob a ação de cargas e temperaturas elevadas.

Conforme indica Shulman (2000), o componente mais importante de um pneu é o polímero do tipo elastômero, composto de borrachas sintética e natural. O segundo componente mais importante é o negro de fumo, que é utilizado principalmente para aumentar a rigidez das bandas de rodagem dos pneus, para adicionar flexibilidade e reduzir o acúmulo de calor nas paredes laterais. Os fios de aço de alta qualidade são

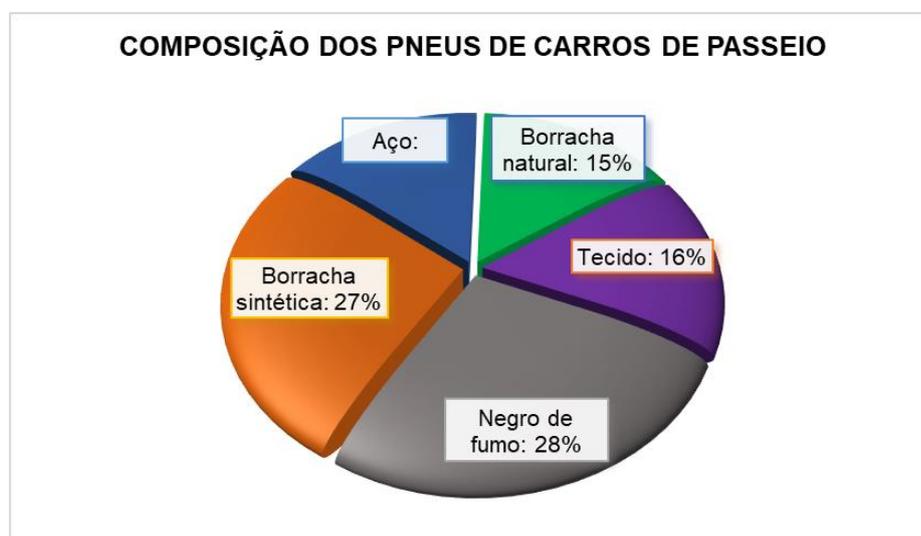
o terceiro componente, que confere rigidez e resistência, bem como flexibilidade ao revestimento dos pneus.

Bressi *et al.* (2019) relataram que o material mais comumente utilizado na composição dos pneus dos veículos de passeio é o copolímero elastomérico de butadieno estireno (SBR), uma borracha sintética que quando aquecida se decompõe antes de amolecer, enquanto o pneu de caminhão é composto principalmente por borracha natural. Ambos são usados como modificadores de ligantes asfálticos para uso nas estradas, tanto na condição “virgem” (os polímeros propriamente) quanto como pó de pneu.

Segundo a CBB Asfaltos (2023) outro ponto importante na diferenciação entre os pneus de veículos leves e caminhões são as quantidades de negro de fumo e cinzas. A quantidade maior de fíler nos pneus dos veículos leves auxilia no processo de oxidação precoce dos polímeros sintéticos, os quais são menos resistentes ao calor do que as borrachas naturais. O aço, presente em maior quantidade nos pneus de caminhões, deve ser totalmente eliminado do processo de modificação dos ligantes asfálticos por não acrescentarem benefícios e causarem danos aos equipamentos de usinagem das misturas asfálticas (filtros, bombas, bicos etc.).

Way *et al.* (2012) relatam que os pneus de carros de passeio são compostos, no total, por cerca de 70% de borracha, sendo 27% borracha sintética, 15% borracha natural e 28% negro de fumo. Os demais componentes incluem 15% de aço e 16% de tecido. Na Figura 05 é mostrada uma composição dos pneus de carros de passeio.

Figura 05 - Composição dos pneus de veículos de passeio



Fonte: Adaptado de Way *et al.* (2012)

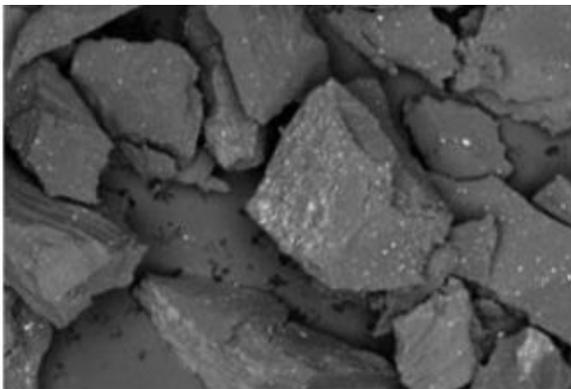
As particularidades que contribuem no desempenho do ligante asfalto-borracha são (CBB Asfaltos, 2023):

- Maior quantidade de borracha natural;
- Menor quantidade de polímeros sintéticos;
- Menor teor de negro de fumo e cinzas;
- Menor quantidade de material têxtil.

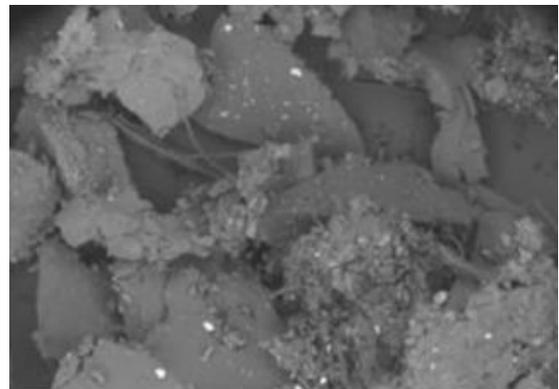
Conforme indicam Venudharan *et al.* (2016), essencialmente, o pó de borracha de pneus inservíveis a ser incorporado ao ligante asfáltico é obtido principalmente por dois métodos: (1) trituração ambiente: a sucata de pneu é moída em temperatura ambiente ou acima desta e (2) moagem criogênica que usa o processo de nitrogênio líquido para congelar a borracha até que esteja quebradiça e, em seguida, usa um moinho de martelo para quebrar o material em partículas menores.

A principal diferença entre partículas de borracha produzidas usando o procedimento criogênico e o ambiente está na forma da partícula resultante. Na moagem criogênica as partículas exibem uma superfície lisa, comparável ao vidro quebrado. Na trituração ambiente as partículas tendem a exibir uma superfície mais áspera, produzindo assim maior área de superfície do que partículas criogênicas. A borracha moída em temperatura ambiente exibe áreas superficiais de aproximadamente 2,5 vezes maiores do que a borracha moída na forma criogênica (ver Figura 06).

Figura 06 - Amostras de borracha de pneu, moídas: a) Moagem criogênica (à esquerda) b) trituração ambiente (à direita)



a)



b)

Fonte: NDOT (2016)

A introdução do asfalto-borracha como material de engenharia ocorreu em virtude de sucessivos eventos. O desenvolvimento dos materiais de asfalto-borracha para uso como selantes de juntas, adesivos e membranas começou no final da década de 1930. No início dos anos 1950, Lewis e Welborn, do *Bureau of Public Roads* (BPR), conduziram um extenso estudo em laboratório para avaliar o efeito de diversos tipos de borrachas nas propriedades dos asfaltos de petróleo intitulado “*The Effects of Various Rubbers on the Properties of Petroleum Asphalts*” (Caltrans, 2003).

Na década de 1960, Charles H. McDonald, engenheiro de materiais da cidade de Phoenix (Arizona, EUA), iniciou pesquisas sobre um método para selagem de trincas em pavimentos (Way *et al.*, 2012). Este engenheiro foi o primeiro a usar rotineiramente borracha na mistura asfáltica a quente para remendos e tratamentos de superfície para reparo e manutenção, sendo fundamental para o desenvolvimento do "processo úmido", também chamado de processo McDonald (Caltrans, 2003). De acordo com Morilha e Greca (2003) o produto era composto por ligante asfáltico com 25% de borracha moída de pneu (nas dimensões de 0,6mm a 1,2mm) misturados a 190°C durante 20 minutos, para ser utilizado em remendos que passaram a ser conhecidos popularmente como “*band-aid*”.

Desde então, o pó de borracha de pneus inservíveis misturado ao ligante asfáltico se tornou um produto muito popular, não apenas para fins de manutenção, mas também amplamente utilizado em aplicações de mistura asfáltica a quente em revestimento de pavimentos (Venudharan *et al.*, 2016).

A maioria das misturas de asfalto-borracha são fabricadas usando várias versões do processo McDonald original, em que a borracha moída e o asfalto são misturados a uma temperatura elevada por aproximadamente duas horas. As partículas de borracha incham para criar uma matriz de borracha dentro do asfalto. Existem duas limitações fundamentais para o processo de borracha para mistura asfáltica do Processo McDonald que impedem a fabricação em um terminal centralizado (KING, 2015):

- As partículas de borracha suspensas se separam rapidamente se a agitação for interrompida;
- O aglutinante atinge sua consistência ideal após um período de mistura relativamente curto (por exemplo, 2 horas a 175°C), mas rapidamente se degrada com o aquecimento contínuo durante o armazenamento.

De acordo com Takallou e Takallou (2003) em 1964 o Departamento de Transportes do Arizona (ADOT) começou a utilizar asfalto-borracha em serviços de conservação de pavimentos. No início dos anos 1970, a empresa *Arizona Refining Company* desenvolveu um sistema asfalto-borracha semelhante ao sistema de Charles McDonald. De acordo com Way (2003) no Estado do Arizona mais de 28.000km de pavimentos foram construídos ou restaurados utilizando ligantes modificados por borracha até essa data.

O asfalto-borracha é um ligante asfáltico modificado que pode ser utilizado na construção de vários tipos de revestimentos de pavimentos, incluindo concreto asfáltico (CA), tratamentos superficiais (TS), *Stone Matrix Asphalt* (SMA), camada porosa de atrito (CPA) e para selagem de trincas e de juntas.

## 2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS

Os requisitos físicos dos ligantes modificados por borracha de pneu estão padronizados atualmente nos EUA, pela Norma ASTM D 6114/19 "*Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*". De acordo com esta norma, o pó de borracha deve apresentar umidade inferior a 0,75%, massa específica de  $1,15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05$ , não deve apresentar partículas metálicas não ferrosas visíveis; não deve ter mais que 0,01% em peso de partículas metálicas ferrosas e o conteúdo de fibras deve ser inferior a 0,5% em peso para aplicações do ligante asfáltico a quente. Todas as partículas de borracha devem passar na peneira de 2,36mm de abertura (nº8).

A análise granulométrica do pó de borracha é determinada pelo ensaio manual, utilizando-se uma série normal de peneiras com a amostra seca ao ar, conforme a ABNT NBR 7217- Agregados - Determinação da composição granulométrica.

O regulamento técnico nº 39 da ANP, de 24/12/2008, estabelece as especificações de asfalto-borracha distribuído para o consumo em todo o território nacional. O ligante asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis é normatizado também pela Norma DNIT 111/2009-EM – Cimento Asfáltico Modificado por Borracha pelo Processo Via Úmida, do tipo "*Terminal Blending*". Os cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha são classificados, segundo sua

viscosidade *Brookfield* a 175°C (spindle 3 e 20rpm) em AB-08 e AB-22, conforme mostrado na Tabela 01.

Tabela 01 - Exigências estipuladas em norma DNIT para caracterizar o asfalto-borracha

Características	Unid.	Asfalto-borracha TIPO		Métodos de ensaio
		AB-08	AB-22	
Penetração, 100g, 5s, 25°C	0,01 mm	30-70	30-70	DNER ME 003/99
Ponto de Amolecimento, mín, °C	°C	55	57	DNER ME 247/94
Viscosidade Brookfield a 175°C, 20rpm, spindle 3	cP	800- 2000	2200- 4000	NBR 15529
Ponto de Fulgor, mín	°C	235	235	DNER ME 148/94
Recuperação elástica dutilômetro, 25°C, 10cm, mín	%	50	55	NBR 15086/2006
Estabilidade à estocagem, máx	°C	9	9	DNER ME 384/99
Efeito do calor e do ar a 163°C				
Varição em massa, máx	%	1	1	NBR 15235/2006
Varição do ponto de amolecimento, máx	°C	10	10	DNER ME 247/94
Porcentagem de penetração original, mín	%	55	55	DNER ME 003/99
Porcentagem de recuperação elástica original, 25°C, 10cm, mín	%	100	100	NBR 15086/2006

Fonte: Adaptada da Norma DNIT 111/2009 – EM

As propriedades físicas do asfalto estão associadas à sua temperatura, visto que se trata de um material sólido elástico a temperaturas baixas, viscoelástico a temperatura ambiente e líquido viscoso a altas temperaturas. A característica de termo-viscoelasticidade do asfalto se manifesta no seu comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo de aplicação e à intensidade de carregamento, e, também, à temperatura de serviço. Todos os ensaios realizados para medir as propriedades físicas dos ligantes asfálticos têm temperatura especificada, alguns também definem o tempo e a velocidade de carregamento (Bernucci *et al.*, 2022).

Na Tabela 02 estão os parâmetros de caracterização do ligante asfalto-borracha definidos em três tipos (I, II e III), segundo a Norma norte-americana ASTM D 6114/2019. Os ensaios de classificação são: viscosidade aparente a 175°C de preferência no equipamento Brookfield, (podendo usar o DSR), com alguns cuidados

na preparação e execução do ensaio; penetração a 25°C e a 4°C; ponto de amolecimento; resiliência; ponto de fulgor; penetração retida a 4°C após envelhecimento na estufa de filme fino (TFOT – D 1754/ 1754M). O tipo I é recomendado para locais de clima mais quente e usa um asfalto base mais duro, o tipo II é mais para clima intermediário e o III para região com temperatura mínima de -9°C ou maior (Bernucci *et al.*, 2022).

Tabela 02 - Exigências estipuladas pela norma americana para caracterizar o asfalto-borracha

<b>Requerimentos físicos para o ligante asfalto-borracha</b>				
Caracterização do ligante		Tipo I	Tipo II	Tipo III
Viscosidade aparente, 175°C, cP	mín	1500	1500	1500
	máx	5000	5000	5000
Penetração, 25° C (77°F), 100g, 5s (0,01mm)	mín	25	25	50
	máx	75	75	100
Penetração, 4°C (39°F), 200g, 60s (0,01mm)	mín	10	15	25
Ponto de amolecimento °C (°F)	mín	57 (135)	54 (130)	52 (125)
Resiliência, 25°C (77°F), %	mín	25	20	10
Ponto de Fulgor °C (°F)	mín	232 (450)	233 (450)	234 (450)
Estufa de filme fino	...	...	...	...
Penetração retida, 4° C (39,2°F), % original	mín	75	75	75

Fonte: Adaptada da Norma ASTM D 6114/2019

Ensaio mais modernos, especialmente os reológicos, se correlacionam melhor com o desempenho no campo, e passaram a ser usados para qualificar os ligantes e especificar classes para pavimentação. De acordo com Bernucci *et al.* (2022) para a análise dos ligantes asfálticos por critérios mais adequados, pode-se recorrer às especificações por desempenho do tipo da ASTM D 6736 ou D 8239 para ajudar a selecionar o ligante asfáltico em função das temperaturas que o pavimento vai atingir durante sua vida útil, nível de tráfego e velocidade do veículo.

A especificação 517 (*Main Roads Western Australia*) de 2023 denominada “*Crumb Rubber Gap Graded Asphalt*”, em sua seção 517.08 descreve o ligante modificado por borracha. No item 517.16 trata da borracha (*crumb rubber*) e no 517.27 define o projeto da mistura *Gap Graded* com asfalto-borracha, entre outros itens. Recomenda ainda que o ligante modificado com borracha deve conter no mínimo 18% de borracha de pneu em massa do ligante total. Os agregados graúdos e miúdos

usados na mistura *Gap Graded* devem ser somente agregados britados de rochas. Cita a especificação 511 como contendo critérios para atendimento. A dosagem deve ser feita no compactador giratório e define o volume de vazios (Vv) entre 2,5 e 5,5%. Muitos outros aspectos são contemplados nesta especificação, tais como equipamentos, preparação da superfície etc.

Bredenhann *et al.* (2020) mostraram que o tráfego e o clima na África do Sul têm levado à consideração de que o asfalto modificado por borracha se tornou atrativo e economicamente viável. Novas especificações são necessárias e as propriedades reológicas passam a ser utilizadas, especialmente o uso do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) para ensaios de fluência e recuperação de múltiplas tensões (MSCR) antes e após o envelhecimento de curto e longo prazos. Aspectos práticos como o tamanho máximo dos grãos da borracha foram analisados. Estes autores concluíram que para ensaiar asfalto-borracha o espaçamento no DSR deve ser aumentado.

A Tabela 03 mostra a proposta de especificação por desempenho do asfalto-borracha da África do Sul.

Tabela 03 - Proposta de especificação por desempenho do asfalto-borracha da África do Sul

	Classe do Tráfego				Método de teste
	S	H	V	E	
Temperatura máxima de projeto (°C)	T <sub>máx</sub>				
Temperatura mínima de projeto (°C)	T <sub>mín</sub>				
G*  e $\delta$ (T <sub>máx</sub> + T <sub>mín</sub> /2+4) °C					ASTM D 7175
G* /Sen $\delta$ @10rad/s(kPa) @T=T <sub>máx</sub>	≥1.0				ASTM D 7175
Viscosidade a 165°C (Pa.s)	≤0.9				ASTM D 4402
Estabilidade à estocagem a 180°C (% dif  G*  em T <sub>máx</sub> )	≤10				ASTM D 7175
Ponto de amolecimento °C	≥230				ASTM D92b
	<b>Após RTFO</b>				ASTM D2872 / TG1 MB3
G*  e $\delta$ (T <sub>máx</sub> + T <sub>mín</sub> /2+4) °C					ASTM D 7175
Varição em massa % (mm)	≤0.3	≤1.0	≤1.0	≤1.0	ASTM D2872 / TG1 MB3
Jnr em T <sub>máx</sub> (kPa <sup>-1</sup> )	≤4.5	≤2.0	≤1.0	≤0,5	ASTM D7405
G* RTFO / G*  ORIGINAL	≤3.0				ASTM D 7175
	<b>Após RTFO + PAV</b>				ASTM D6521
G*  e $\delta$ (T <sub>máx</sub> + T <sub>mín</sub> /2+4) °C					ASTM D 7175
G* PAV /  G*  ORIGINAL	≤6.0				ASTM D 7175

Fonte: Adaptada de Bredenhann *et al.* (2020)

Cabe destacar que a especificação sul africana não traz um parâmetro de controle à fadiga. Vale mencionar que consta um parâmetro para controle da estabilidade à estocagem de asfaltos modificados ( $|G^*|_{\text{topo}}/|G^*|_{\text{fundo}} \leq 15$  – estabilidade a 180°C), além dos 2 (dois) índices de envelhecimento ( $|G^*|_{\text{RTFO}} / |G^*|_{\text{original}} \leq 3$  e  $|G^*|_{\text{PAV}} / |G^*|_{\text{original}} \leq 6$ ) - (usa a propriedade viscoelástica oscilatória viscoelástico linear) mostrados na Tabela 03.

Lo Presti, Medina, Dalmazzo *et al.* (2020) comentaram sobre o mais recente material, denominado de asfalto-borracha híbrido, que consiste em incorporar dois ou mais modificadores poliméricos de diferentes naturezas a um ligante asfáltico, a fim de tirar proveito de seus recursos complementares. Para a produção do asfalto-borracha isso geralmente acontece adicionando compostos de pó de borracha e polímeros sintéticos, como estireno-butadieno estireno (SBS) e/ou copolímero à base de etileno. Na Tabela 04 constam as exigências estipuladas pela norma espanhola para caracterizar o asfalto-borracha híbrido.

Tabela 04 - Exigências estipuladas pela norma espanhola para caracterizar o asfalto-borracha híbrido

EN 14023			PMB 10/40- 70C	PMB 25/55- 65C	PMB 45/80- 60C	PMB 45/80- 65C	PMB 45/80- 75C	PMB 75/130- 60C
Características	EN	Unidade	Ensaio					
Penetração a 25°C	1426	0,1mm	10-40	25-55	45-80	45-80	45-80	75-130
Ponto de amolecimento	1427	°C	≥70	≥65	≥60	≥65	≥75	≥60
Ductilidade (5cm/min)	13589 13703	J/cm <sup>2</sup>	≥2 (15°C)	≥2 (10°C)	≥2 (5°C)	≥3 (5°C)	≥3 (5°C)	≥1 (5°C)
Frass	12593	°C	≤-5	≤-7	≤-12	≤-15	≤-15	≤-15
Recuperação elástica à 25°C	13398	%	**	≥50	≥50	≥70	≥80	≥60
Estabilidade à estocagem*	Dif PA 13399 1427	°C	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5
	Dif Pen 13399 1426	0,1mm	≤9	≤9	≤9	≤9	≤13	≤13
Ponto de fulgor	ISO 2592	°C	≥235	≥235	≥235	≥235	≥235	≥220
Durabilidade – resistência RTFOT EN 12607- 01								
Perda de massa	12607-1	%	≤0,8	≤0,8	≤1,0	≤1,0	≤1,0	≤1,0,
Penetração retida	1426	%	≥60	≥60	≥60	≥60	≥60	≥60
Acréscimo Ponto de amolecimento	1427	°C	≤8	≤8	≤10	≤10	≤10	≤10
Decréscimo Ponto de amolecimento	1427	°C	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5
*ligantes que não são produzidos “in situ” / **valor não informado								

Fonte: Adaptada de Lo Presti, Medina, Dalmazzo *et al.* (2020)

### 2.2.1 Conceitos gerais

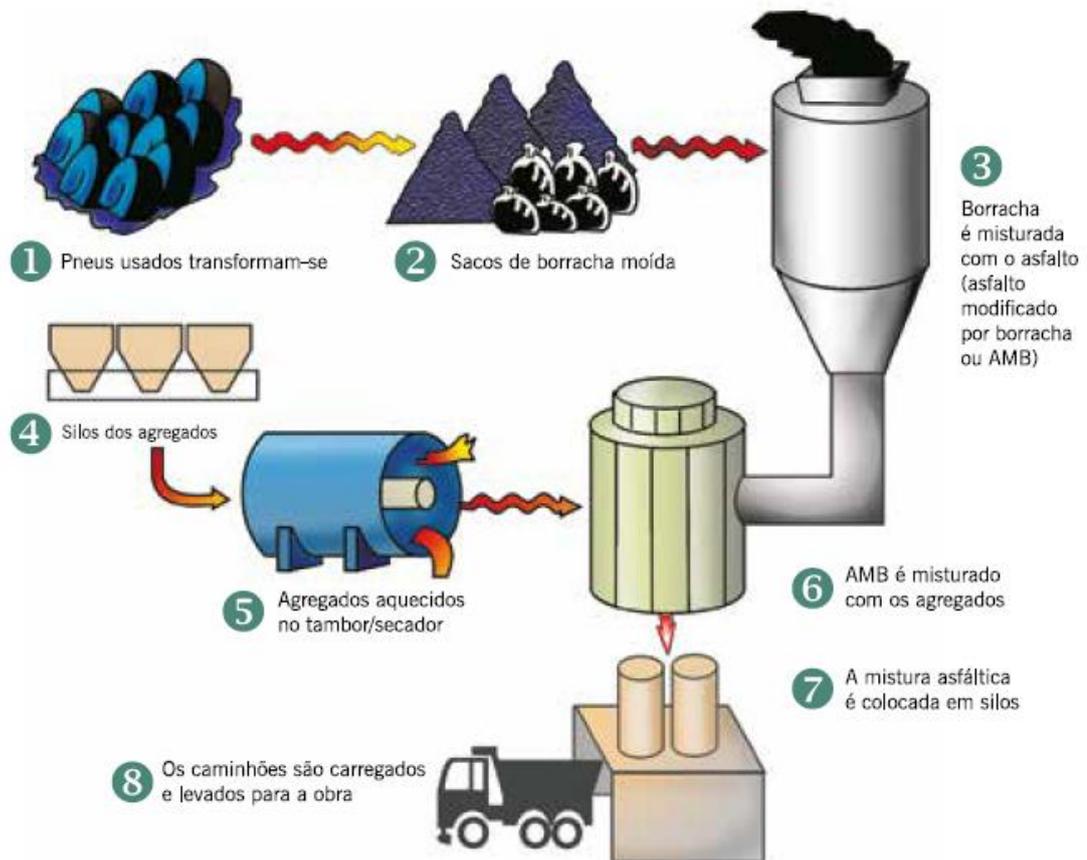
Existem dois meios de incorporação da borracha triturada de pneus às misturas asfálticas: processo seco e processo úmido. Na via seca, os grãos de borracha são adicionados na usina como parte dos agregados. Segundo Bertollo (2002) a borracha adicionada deve substituir no máximo 3% do peso total dos agregados, e pode ser adicionada em misturas de granulometrias densas ou descontínuas a depender do tamanho dos grãos de borracha incorporados.

De acordo com Fontes *et al.* (2008), o processo úmido abrange dois sistemas de produção: *continuous blend* e *terminal blend*. No sistema *continuous blend* a modificação do ligante ocorre na própria usina de fabricação da mistura asfáltica. Bernucci *et al.* (2022) comentam que o asfalto-borracha obtido pelo processo imediato, chamado de não-estocável (*continuous blend*), deve ser aplicado logo após a produção devido à sua instabilidade. Neste método não ocorre a despolimerização, nem desvulcanização da borracha e a agitação é realizada em baixo cisalhamento. Durante esse processo a borracha combinada nos maltenos do CAP apresenta um inchamento superficial possibilitando o uso de borracha com maior tamanho de partícula, ocasionando o aumento da viscosidade.

Bernucci *et al.* (2022) relataram que o sistema estocável, conhecido como *terminal blending*, é preparado com borracha moída de pneus finíssima (partículas passantes na peneira nº 40) e devidamente misturado em um terminal especial, produzindo um ligante estável e relativamente homogêneo, posteriormente transportado para cada obra.

No sistema *terminal blend* após a produção do ligante base na refinaria a borracha é adicionada, por meio de agitadores mecânicos, com tempo de digestão e temperatura controlados. O asfalto-borracha estocável (*terminal blend*) deve ser processado em elevadas temperaturas, permitindo a despolimerização e a desvulcanização da borracha de pneu, outrossim, possibilitando a reação da borracha desvulcanizada e despolimerizada com moléculas do CAP, por agitação em alto cisalhamento, resultando numa menor viscosidade do produto ao final. O material resultante possui estabilidade à estocagem e pode ser transportado para as obras sem alterar suas propriedades, conforme esquematizado na Figura 07.

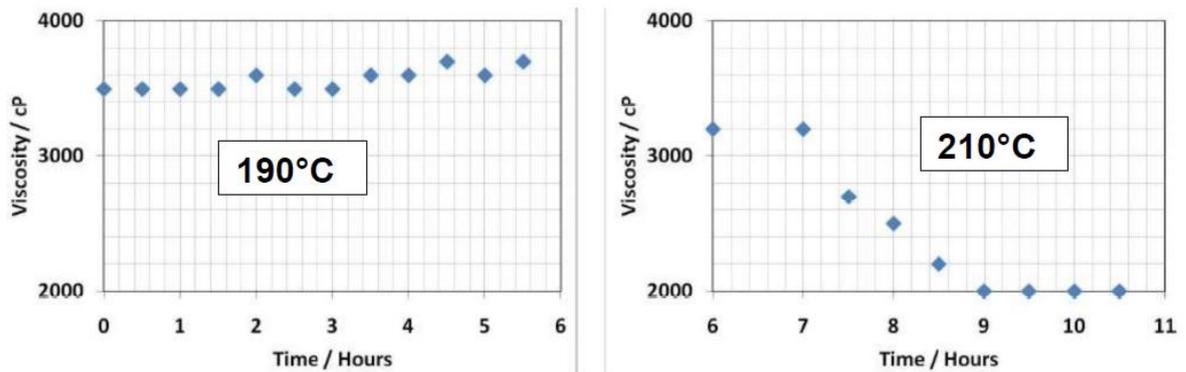
Figura 07 - Esquema de fabricação de asfalto-borracha via úmida do tipo *terminal blending*



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

A temperatura e o tempo de digestão da mistura asfalto-borracha dependem principalmente da granulometria da borracha, conforme mostrado em Specht (2004). Quanto mais fina, maior a área superficial e menor será a temperatura e o tempo de digestão necessário para se obter um material homogêneo. A Figura 8 mostra o efeito da temperatura na curva de digestão da mistura asfalto borracha.

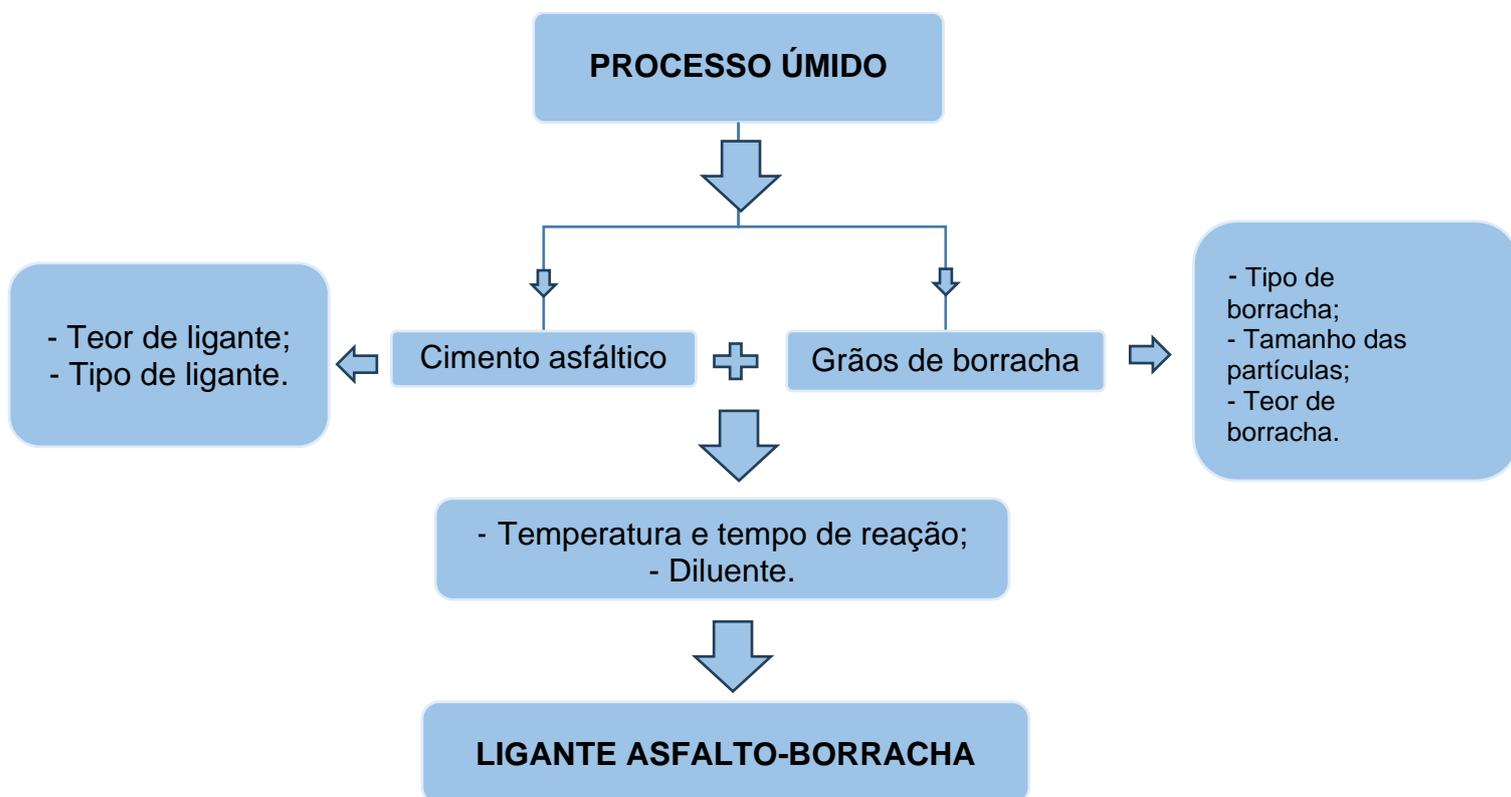
Figura 08 - Efeito da temperatura na curva de digestão



Fonte: Mturi *et al.* (2011/2014)

Lo Presti (2013) ressalta que o termo processo úmido se refere a toda uma família de tecnologias que varia muito com relação ao processamento escolhido. A interação entre o ligante asfáltico e a borracha é específica e depende de uma série de fatores básicos, incluindo: variáveis de processamento como temperatura, tempo e dispositivo (aplicando agitação /cisalhamento), propriedades do ligante de base (fonte) e eventual uso de óleo extensores, propriedades da BMP (fonte), métodos de processamento, tamanho de partícula e composição. O fluxograma da Figura 09 detalha as variáveis envolvidas para o processo de produção do asfalto-borracha via úmida.

Figura 09 - Variáveis envolvidas no processo de produção do ligante asfalto-borracha (via úmida)



Fonte: Autora (2023)

Shatnawi (2011) comparou os desafios na utilização de asfalto-borracha obtido pela via úmida na forma de mistura contínua “*just in time*” (*continuous blend*), com a forma estocável, mostrando as dificuldades de cada tipo.

No Brasil, o habitual é o uso do asfalto-borracha estocável produzido via úmida nos distribuidores (*terminal blend*). Apesar de facilitarem a aplicação de asfalto-borracha durante a produção da mistura asfáltica, as misturas do tipo *terminal blend* podem apresentar desempenho mecânico inferior quando comparadas com misturas *continuous blend*, segundo Shatnawi (2011).

Morilha e Greca (2003) perceberam que na tecnologia mais usada nas obras brasileiras (*terminal blend*), o asfalto-borracha apresentava estabilidade sem que ocorresse a separação de fases durante o armazenamento, ou seja, as características deste asfalto permitiam a sua utilização muito tempo após a sua produção. Entretanto, para a utilização do asfalto-borracha na usina, os tanques de estocagem deveriam ser adaptados com agitadores.

Considerando a elevada viscosidade do asfalto-borracha, superior à viscosidade dos asfaltos convencionais, o transporte do asfalto-borracha produzido no sistema *terminal blend* é realizado por caminhões tanque dotados de equipamentos especiais para manter a estabilidade, como aquecedores, agitadores helicoidais e bomba de ligante de alto desempenho (para bombeamento e mistura de líquidos altamente viscosos) com controle de velocidade (Morilha e Greca, 2003).

A Norma ASTM D 6114/19 define o processo úmido que dá origem ao ligante asfalto-borracha como uma combinação de cimento asfáltico, borracha moída de pneus - BMP e outros aditivos, caso necessário.

A Figura 10 ilustra as amostras de asfalto-borracha obtidas por via úmida.

Figura 10 - Amostra de *Continuous Blend* (à esquerda) e *Terminal Blend* (à direita)



Fonte: Fontes *et al.* (2006)

As Normas brasileiras que indicam os requisitos para o uso do asfalto-borracha do tipo “*terminal blending*” estão listadas a seguir:

- Resolução ANP Nº 39, de 24.12.2008 - DOU 26.12.2008. No Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes - DNIT esta especificação é adotada pela norma DNIT 111/2009 – EM: Cimento Asfáltico Modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo da via úmida, tipo “*Terminal Blending*”;
- Norma DNIT 111/2009 - EM – Cimento Asfáltico Modificado por Borracha pelo Processo Via Úmida, do tipo “*Terminal Blending*”;
- A Norma DNIT 112/2009 – ES define as especificações para a execução de concreto asfáltico utilizando asfalto-borracha, via úmida, do tipo “*Terminal Blending*”;

- Em 2005 o Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná – DER/PR – editou a especificação de serviço DER/PR ES – P 28. Esta especificação foi atualizada em 2018 e regulamenta o uso de asfalto-borracha em obras de pavimentação em misturas a quente;
- O DER/SP apresenta a especificação ET- DE P 00/030/2007;
- O DEINFRA de Santa Catarina tem a especificação DEINFRA/SC ES-P 05/16 de concreto asfáltico com asfalto-borracha.

### 2.2.2 Vantagens e desvantagens do asfalto-borracha

Os benefícios do uso do asfalto-borracha, de acordo com Caltrans (2003) e Way *et al.* (2012) são os seguintes:

- Redução dos trincamentos, com melhoria da resistência à fadiga;
- Ótima durabilidade, apresentando melhor resistência ao envelhecimento e oxidação;
- Redução da espessura dos revestimentos em relação ao uso de ligante asfáltico convencional;  
A Instrução de Projeto IP.DIN 009 da ARTESP – Conservação especial de pavimento destaca em seu item 5.1.11 (Tabela 11) os fatores de redução de espessura admitidos para utilização de ligante asfáltico modificado.
- Redução dos ruídos, devido à maior película de ligante asfáltico e a presença da borracha;
- Boa resistência à derrapagem;
- Boa resistência à deformação permanente, em virtude do aumento da viscosidade e do ponto de amolecimento;
- Diminuição dos efeitos de borrifos de água (*splash e spray*), propiciando uma superfície mais segura;
- Redução dos custos de manutenção;
- Uso benéfico de pneus inservíveis;
- Compatível com as técnicas construtivas disponíveis;
- Material sustentável e especificado pela ASTM.

Pang *et al.* (2014) comentaram que hidróxidos da dupla camada (LDHs), um elemento de resistência à luz ultravioleta (UV), foram adicionados em um asfalto-borracha e seu efeito na resistência ao envelhecimento foi avaliado. O asfalto foi submetido ao envelhecimento de curto e de longo prazo e à radiação UV. Houve alterações em vários parâmetros do material, mas mostraram que o asfalto-borracha apresentou boa resistência ao envelhecimento por UV.

Kaloush (2014) relatou que várias pesquisas foram feitas na Universidade do Arizona (EUA) sobre asfalto-borracha, chamado por ele de AR e misturas asfálticas usadas em pavimentos novos e em reforço. Analisando 30 (trinta) referências, ressaltou que o AR melhora a suscetibilidade à temperatura. A modificação do asfalto com a borracha modifica o Grau PG do ligante. O efeito de confinamento no valor do módulo dinâmico é maior no AR e o ensaio de fadiga aponta que a mistura com AR tem maior potencial de resistir à propagação das trincas quando comparado com o asfalto polímero convencional.

Camargo (2016) avaliou as propriedades de um ligante convencional e ligantes modificados com SBS e borracha granulada de pneus usados. O asfalto-borracha foi obtido pela via úmida (*field blend*) incorporado em uma mistura asfáltica de granulometria descontínua e foi aplicado pela primeira vez no Brasil em um trecho da rodovia RJ 122. O autor realizou ensaios laboratoriais de fadiga e deformação permanente nos ligantes e em uma mistura asfáltica de graduação descontínua densa (*gap-graded*) e constatou que, tanto no ligante quanto na mistura asfáltica, houve ganhos com a adição de borracha granulada para deformação permanente e para fadiga.

De acordo com Alfayez, Suleiman e Nehdi (2020), o uso de borracha de pneu reciclada em pavimentos asfálticos pode melhorar o desempenho geral, a economia e a sustentabilidade. Por isso, ganhou considerável atenção nas últimas décadas. Vários estudos têm indicado que a borracha de pneu reciclada reduz a deformação permanente de pavimentos flexíveis e aumenta a sua resistência ao trincamento. O panorama da prática do uso de borracha reciclada de pneus em pavimentos asfálticos é feito em termos de propriedades de engenharia, desempenho e avaliação de durabilidade. Esta análise crítica do estado-da-arte deve melhorar o entendimento do uso de borracha de pneu reciclada nos pavimentos, definir recomendações

pertinentes, identificar lacunas de conhecimento e destacar as linhas de investigação que ainda precisam ser melhor destacadas.

A pesquisa de Buttlar e Punyaslokrath (2021) mostrou que o asfalto modificado com borracha prolonga a vida útil do pavimento resistindo a modos precoces de falhas, como buracos e trincas. Além disso, também mitiga significativamente o ruído do tráfego, e melhora a qualidade do conforto ao rolamento e segurança. Demonstrou ser uma opção econômica, pois aumenta a vida útil de um pavimento e reduz e/ou retarda a ocorrência de atividades de manutenção. Isso reduz significativamente os custos quando avaliada usando técnicas de análise de custo de ciclo de vida.

Conforme Lo Presti (2013) e NDOT (2016) as limitações dos ligantes asfálticos modificados por borracha de pneus inservíveis são as seguintes:

- Custos unitários iniciais mais altos (em comparação com misturas convencionais), que são compensados pelo uso de espessura reduzida, resultando em menores custos do ciclo de vida;
- Maiores teores de ligantes de projeto;
- No passado, o desempenho era variável devido principalmente às más práticas de construção ou construção durante condição climática desfavorável. Essas deficiências foram corrigidas com a melhoria das especificações técnicas;
- Construção mais desafiadora, devido aos requisitos de temperatura mais restritivos;
- Potenciais problemas de odor e qualidade do ar, produzindo mais gases poluentes e nocivos à saúde humana;
- Menor trabalhabilidade da mistura asfáltica;
- No caso da produção de misturas em campo é necessário adaptar a usina de asfalto de mistura quente padrão, por exemplo, com unidades portáteis.

### **2.2.3 Ensaios de caracterização reológica**

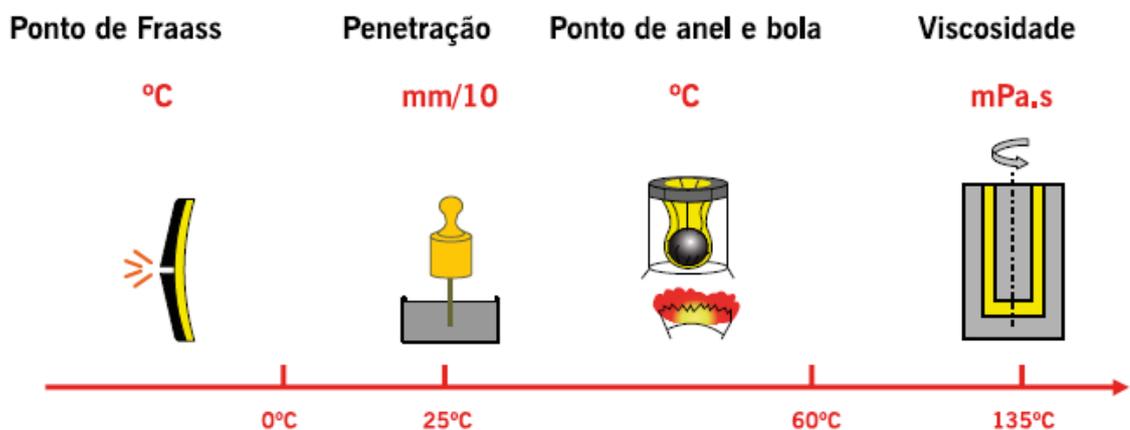
Em meados da década de 1980, o programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) foi iniciado, com o objetivo de investigar novas propriedades reológicas a serem aplicadas na caracterização dos ligantes asfálticos. Esta pesquisa culminou no lançamento da especificação *Superpave* (*Superior Performing Asphalt*

*Pavements*), atualmente normatizada pela ASTM D6373/2016 denominada “*Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*”.

As especificações *Superpave* apresentam procedimentos diferentes dos convencionais, tanto para os ligantes quanto para as misturas asfálticas. Em relação à avaliação de ligantes asfálticos são enfatizadas as propriedades reológicas mediante ensaios mais representativos do que os ensaios empíricos como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade *Saybolt-Furol*, recuperação elástica e ductilidade.

A viscosidade é uma propriedade fundamental na caracterização do ligante, porém fornece informações sobre o comportamento viscoso a altas temperaturas, não havendo dados sobre o desempenho às temperaturas médias e baixas. Já a penetração apenas descreve a consistência a uma temperatura intermediária (25°C), conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Métodos de medida da consistência do CAP em diferentes temperaturas

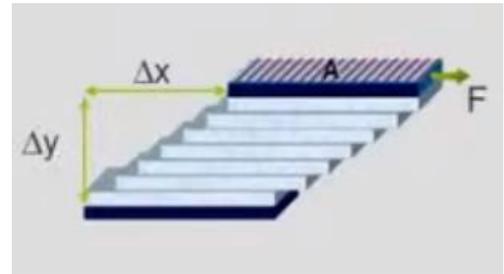
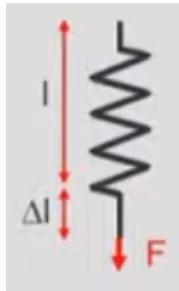


Fonte: Alves (2011)

As propriedades dos ligantes asfálticos mudam de acordo com a temperatura: para as mais altas, alcançadas durante a usinagem e compactação, o material age como um fluido viscoso Newtoniano. Nas temperaturas de serviço, tipicamente entre 10°C e 70°C no Brasil, o ligante se comporta como material viscoelástico. Para as temperaturas mais baixas se apresenta como um material elástico com menores taxas de deformação se tornando um sólido frágil. Abaixo de sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) o ligante é descrito como um sólido vítreo (Cravo, 2016).

Quem primeiro descreveu a característica referente à deformação elástica foi Robert Hooke (1635-1703), que postulou que “a frequência de qualquer mola é proporcional à extensão dela”. A Lei de Hooke, adaptada para a reologia é expressa como: a força aplicada é proporcional à extensão da deformação, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Deformação elástica (à esquerda) e exemplo de amostra viscoelástica. (à direita)



Fonte: Adaptado de Petri (2020)

$$F = k * \Delta l \quad \text{Lei de Hooke} \quad \tau = G * \gamma \quad (1) \text{ e } (2)$$

$$\text{Lei de Hooke adaptada para a reologia (deformação elástica): } \tau = G * \gamma \quad (3)$$

Onde:

- K = constante de mola;
- F = força;
- L = comprimento;
- G = módulo de rigidez (Pa);
- $\tau = \text{tensão} = \frac{F}{A}$ ;
- $\gamma = \text{deformação} = \frac{\Delta x}{\Delta y}$ .

Para a análise de amostras viscoelásticas aplica-se o modelo de Newton:

$$\text{Lei de Newton (escoamento viscoso): } \tau = n * \dot{\gamma} \quad (4)$$

Onde:

$n$  = coeficiente de viscosidade (Pa.s);

$\dot{\gamma}^\circ$  = taxa de corte ou cisalhamento (s-1),

Os fluidos newtonianos são aqueles cuja viscosidade é constante em condições de temperatura e pressão constantes. Por outro lado, nessas mesmas condições, existem muitos fluidos cuja viscosidade não é constante, em virtude de poder variar com a taxa de cisalhamento e/ou tempo de carregamento. Tais fluidos são designados como não newtonianos e a sua viscosidade é habitualmente chamada de viscosidade aparente, embora se utilize igualmente o símbolo  $\eta$  (Malkin, 1994).

Nos materiais cuja viscosidade depende da taxa de cisalhamento, distinguem-se usualmente dois tipos de comportamento: “pseudo plástico” (*shear-thickening* em inglês) e “dilatante” (*shear-thinning* em inglês). A Figura 13 ilustra os dois comportamentos. O primeiro se caracteriza por um aumento da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento enquanto o segundo corresponde à situação oposta (diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento). De forma semelhante, existem também materiais que podem exibir tixotropia ou reopexia, isto é, uma diminuição ou um aumento gradual da viscosidade com o tempo de carregamento, respectivamente (Pereira, 2014).

Figura 13 - Representação esquemática de alguns comportamentos não-newtonianos



Fonte: Pereira (2014)

Pode-se concluir que nestes materiais haverá sempre uma parte elástica e uma viscosa, dependendo das condições de tempo, temperatura e condições de carregamento. Combinando os dois componentes, tem-se:

$$\tau = G^* \gamma = (G' + iG'')^* \gamma \quad (5)$$

O Módulo Complexo é representado por partes real e imaginária e é definido conforme ilustrado na Figura 14 e nas Equações seguintes:

$$G^* = G' + iG'' \quad (6)$$

$$G' = G^* \cos \delta \quad (7)$$

$$G'' = G^* \sin \delta \quad (8)$$

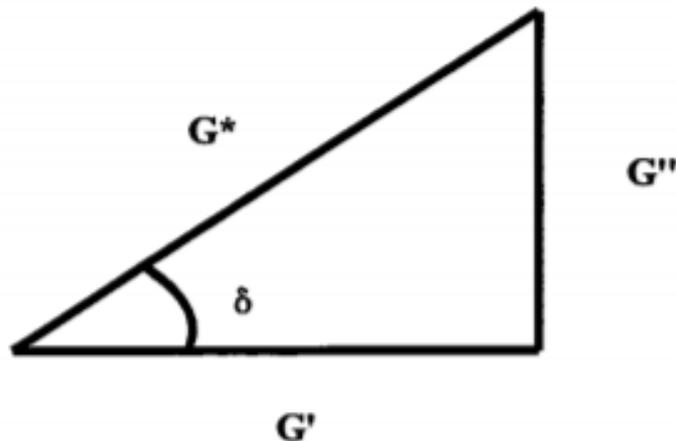
$$\frac{G''}{G'} = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \tan \delta \quad (9)$$

$$|\eta|^* = \frac{|G^*|}{\omega} \quad (10)$$

Onde:

- $G^*$  = Módulo complexo de cisalhamento;
- $G'$  = Módulo de armazenamento - elasticidade (Pa);
- $G''$  = Módulo de perda - viscosidade (Pa);
- $\delta$  = ângulo de fase;
- Fator de perda:  $\frac{G''}{G'}$ ;
- $\omega$  = frequência angular, 1/s;
- $\eta^*$  = Viscosidade dinâmica complexa com  $G^*$  em valor absoluto (Módulo dinâmico).

Figura 14 - Relação entre o módulo complexo de cisalhamento, o módulo de armazenamento, o módulo de perda e o ângulo de fase



As Leis de Hooke e Newton são lineares, mas a Teoria da viscoelasticidade linear nem sempre é válida, visto que a faixa de tensões e deformações em que os materiais se comportam linearmente é limitada e esse limite pode ser bastante baixo. Os ensaios, neste caso, devem ser realizados em níveis de tensão e deformação da zona linear (Barnes *et al.* 1989).

Na reologia, a distinção entre um material sólido ou líquido é feita pelo número de Deborah (D). Este parâmetro foi introduzido pelo Professor Marcus Reiner e pode ser expresso pela seguinte relação:

$$D = \frac{T}{t} \quad (11)$$

Onde:

- T = tempo de relaxação (característico do material);
- t = tempo de solitação mecânica.

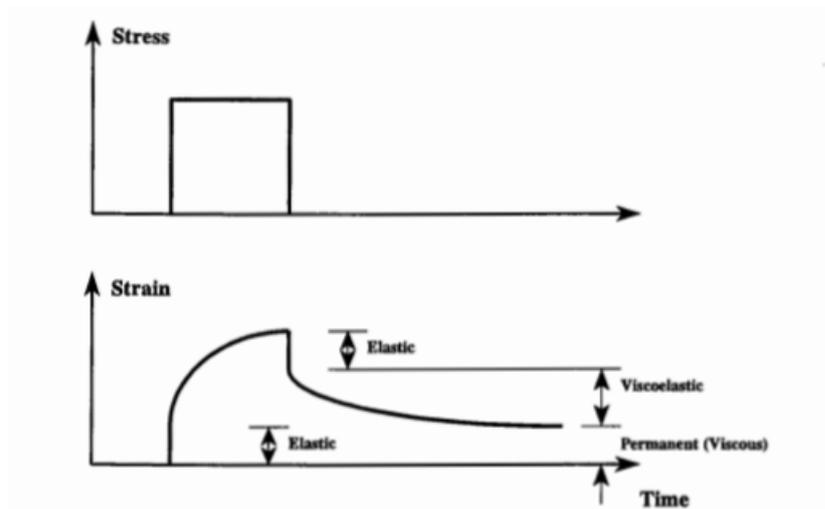
Se D é alto, então significa que o material precisa de mais tempo para relaxar do que a carga que está sendo imposta, logo parece um sólido. Se D é baixo, o material consegue acompanhar a carga mecânica e consegue relaxar rápido, então vai parecer um líquido. Quando D se aproxima de 1 o material é dito viscoelástico.

Segundo Pereira (2014) é importante ressaltar que, se uma tensão for aplicada em um material puramente elástico, a tendência é que ele retorne à sua forma inicial imediatamente, mas se o material for viscoso a deformação permanece, ainda que a tensão tenha sido removida. Em um material viscoelástico uma parcela da deformação retornará instantaneamente ao cessar a tensão e outra irá se deformar permanentemente, conforme ilustrado na Figura 15. Em temperaturas normais de serviço, as propriedades do ligante asfáltico se enquadram na região viscoelástica.

Specht *et al.* (2007) apresentam resultados de viscosidade medidos em asfalto borracha com amostras preparadas variando a porcentagem de borracha, o tamanho das partículas, a duração e a temperatura da mistura. Foram criados modelos estatísticos e por redes neurais. A porcentagem de borracha e a duração da mistura tiveram maior influência na viscosidade.

De acordo com Specht *et al.* (2019), as propriedades dos CAP's podem ser estimadas por ensaios empíricos, como medidas de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, mas, de forma mais adequada pelas propriedades reológicas fundamentais. Essas são fornecidas por ensaios que medem a viscosidade aparente (viscosímetro rotacional), viscosidade cinemática (viscosímetro capilar), módulo complexo, ângulo de fase, módulo de armazenamento, módulo de dissipação e viscosidade complexa (reômetro de cisalhamento dinâmico - DSR), além de rigidez e taxa de relaxação sob baixas temperaturas (reômetro de flexão em viga - BBR).

Figura 15 - Resposta de um material viscoelástico a uma tensão aplicada em um intervalo de tempo.



Fonte: Airey, 1997

As especificações norte-americanas *Superpave* estão em permanente revisão desde a sua criação na década de 1980, e novos requisitos estão sendo incluídos para melhor diferenciar o comportamento dos diversos ligantes (Leite *et al.*, 2011). Os ensaios e as especificações *Superpave* foram desenvolvidos para a obtenção de parâmetros relacionados ao desempenho em pavimentos, visando poder prever as deformações permanentes, trincas por fadiga, trincas térmicas e envelhecimento precoce. Estes ensaios estão descritos a seguir.

### 2.2.3.1 Ensaio de reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR

O método de ensaio do reômetro de cisalhamento dinâmico - *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), descrito nas normas AASHTO T315/12 e ASTM D7175/15, possibilita prever a contribuição do ligante no comportamento à fadiga e à deformação permanente de misturas asfálticas, considerando os parâmetros reológicos dos ligantes asfálticos. Tais parâmetros, fornecidos pelo ensaio no DSR e requeridos pela especificação *Superpave*, são o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ). O  $G^*$  representa a rigidez ou resistência do material à deformação quando submetido a um carregamento, e o  $\delta$  informa a defasagem entre o componente elástico (recuperável), relacionado à energia armazenada a cada ciclo de carregamento, e o componente viscoso (não recuperável), relacionado à energia dissipada, ratificando o comportamento viscoelástico dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP) (Tonial e Leite, 1994; Leite *et al.*, 1997; Leite *et al.*, 2002; Nascimento, 2008, Fontes, 2009; Specht *et al.*, 2019; entre outros).

O módulo complexo e o ângulo de fase podem ser definidos como:

$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} \quad (12)$$

$$\delta = \omega (\Delta t) \quad (13)$$

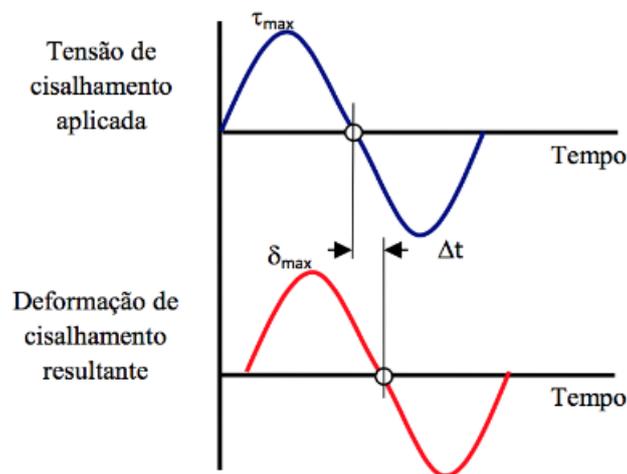
Onde:

- $G^*$  = módulo complexo de cisalhamento, Pa;
- $T_{máx}$  = máxima tensão de cisalhamento aplicada, Pa;
- $\gamma_{máx}$  = máxima deformação devido à tensão de cisalhamento aplicada;
- $\delta$  = ângulo de fase;
- $\omega$  = frequência angular, 1/s;
- $\Delta t$  = tempo de defasagem, s.

Sendo o ligante um material que apresenta comportamento viscoelástico a temperaturas intermediárias, quando uma tensão de cisalhamento é aplicada a deformação de cisalhamento não ocorre imediatamente. Na Figura 16 o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) representa o atraso na deformação obtida em relação à tensão aplicada,

sendo representada pelo ângulo de fase ( $\delta$ ). O ângulo de fase ( $\delta$ ) é função da velocidade angular ( $\omega$ ) e do tempo ( $\Delta t$ ). Se não há atraso entre a tensão de cisalhamento e a deformação, então,  $\Delta t = 0$ ,  $\delta = 0^\circ$  e o ligante se comportará como um sólido elástico. Nos materiais viscosos a deformação obtida estará totalmente defasada,  $\Delta t$  é máxima,  $\delta = 90^\circ$  e o ligante se comportará como líquido viscoso. Segundo Pereira (2014) o parâmetro  $\delta$  (ângulo de fase) é bastante importante na análise de materiais viscoelásticos, uma vez que permite representar a quantidade relativa de deformação instantânea e atrasada.

Figura 16 - Tensão de cisalhamento máxima x deformação máxima num ensaio de cisalhamento



Fonte: (Fontes, 2009)

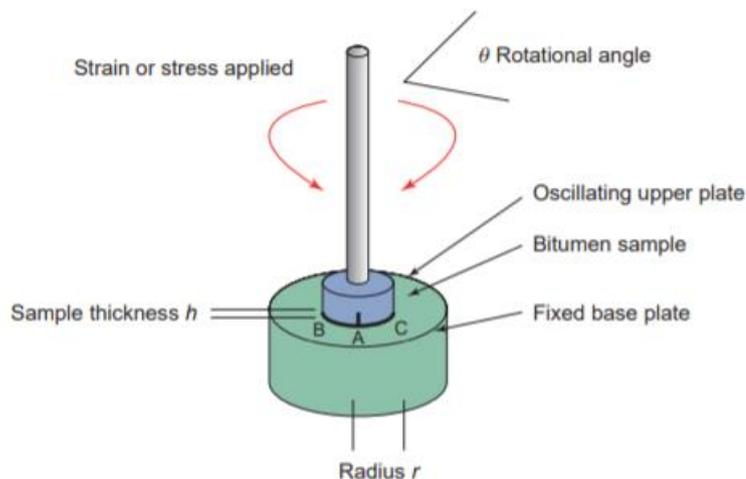
As estimativas de resistência à deformação permanente e à fadiga são realizadas a temperaturas altas e intermediárias, empregando o reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR, por meio dos parâmetros denominados  $|G^*|/\sin \delta$  e  $|G^*|\sin \delta$ , respectivamente (Martins e Leite, 2009).

A execução do ensaio no DSR ainda permite a obtenção de curvas mestras que servem para avaliar o desenvolvimento de uma propriedade reológica qualquer em função da frequência, ou do tempo de aplicação do carregamento. Descreve o comportamento reológico do material para uma única temperatura em um espectro amplo de tempos ou frequências de carregamento (Cravo, 2016).

Normalmente os reômetros podem trabalhar no modo de tensão controlada ou de deformação controlada. No primeiro caso, o esforço binário a aplicar no prato

superior é fixo, sendo medida a rotação angular (ângulo de deflexão) correspondente, a partir da qual se obtém a deformação. No caso de deformação controlada, o prato superior move-se entre os pontos de amplitude extrema a uma frequência estipulada, sendo medido o binário transmitido à amostra, a partir do qual se mede a tensão necessária para manter a oscilação (Pereira, 2014). Segundo Airey (1997), para determinar as propriedades reológicas do asfalto costuma-se utilizar o modo de deformação controlada. O equipamento é composto de duas placas paralelas, sendo uma fixa e outra oscilante, conforme exibido na Figura 17. A amostra de asfalto é colocada entre as placas e submetida a esforços de cisalhamento com frequência de 1,59 Hz.

Figura 17 - Esquema do equipamento reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)



Fonte: (Shell, 2015)

As especificações Superpave estabeleceram os seguintes valores mínimos de  $|G^*|/\sin \delta$  para a garantir adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes:

- 1,0 kPa para amostras virgens;
- 2,2 kPa para amostra envelhecidas a curto prazo no equipamento RTFOT (medido na temperatura máxima de projeto).

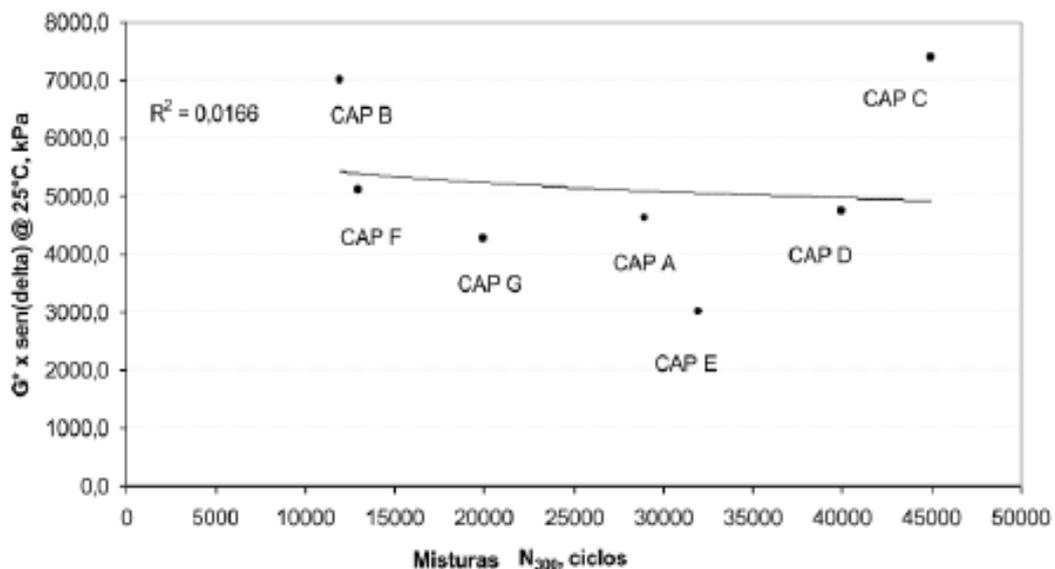
E para o dano por fadiga, especificou-se um limite máximo para o parâmetro  $|G^*|.\sin \delta$  de 5000 kPa (medido na temperatura intermediária de projeto) após o envelhecimento a longo prazo no equipamento (RTFOT+PAV) (Melo, 2014). De

acordo com a AASHTO M 332 é indicado um valor máximo de 5.000kPa para tráfego padrão ou 6.000kPa para tráfego pesado/muito pesado/extremamente pesado.

Porém, com o uso, percebeu-se que as correlações entre estes parâmetros e o desempenho em campo não tinham a correspondência esperada, especialmente para os ligantes modificados. Assim, vários autores, tal como Domingos (2011), concluíram que o parâmetro de deformação permanente tem se mostrado inadequado, devido à determinação do valor de  $|G^*|/\text{sen } \delta$  na faixa de viscoelasticidade linear dos ligantes asfálticos e não considerando toda a contribuição elástica proveniente da adição de modificadores ao ligante asfáltico.

Chacur e Nascimento (2010) avaliaram o desempenho de diferentes ligantes com relação à resistência à fadiga. Mostraram que não houve boa correlação dos ensaios reológicos das especificações *Superpave* com os resultados obtidos nos ensaios de vida de fadiga determinados em misturas asfálticas produzidas com estes ligantes. Deduziram que o parâmetro  $|G^*| \cdot \text{sen } \delta$  não classificava adequadamente o ligante quanto à fadiga em comparação ao desempenho do mesmo determinado na mistura asfáltica, conforme mostra o gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Correlação entre os resultados da fadiga de misturas asfálticas e o parâmetro  $|G^*| \cdot \text{sen } \delta$  dos ligantes asfálticos



Fonte: Chacur e Nascimento (2010)

Zhou *et al.* (2013) confirmaram o desempenho insatisfatório do parâmetro  $|G^*| \cdot \text{sen } \delta$  para correlacionar a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos e das

misturas asfálticas. Recomendam o ensaio de DENT (*double edge notch tension*) para caracterizar a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos.

Segundo Pamplona *et al.* (2013) a ineficácia do parâmetro  $|G^*| \cdot \sin \delta$  seria devido ao fato de ser determinado por meio de ensaios realizados na região de viscoelasticidade linear, para níveis baixos de deformação, enquanto o fenômeno real se daria na região de viscoelasticidade não-linear, sob grandes deformações.

A atual especificação *Superpave*, elaborada a partir do Programa SHRP e atualizada recentemente, fundamenta-se em propriedades reológicas, condições climáticas e de tráfego para avaliar os ligantes asfálticos baseado no Grau de Desempenho (PG – *Performance Grade*) em amplas faixas de temperatura e condições de serviço. A especificação se baseia em ensaios que simulam os diferentes estágios da vida do ligante: viscosidade aparente utilizando o equipamento *Brookfield* (transporte, armazenagem e manuseio); envelhecimento em ensaio de rotação de filme fino em estufa, RTFOT - AASHTO T 240-13 (produção e aplicação da mistura na pista); e envelhecimento em vaso de pressão, PAV - ASTM D6521-13. A metodologia conta ainda com o seguinte ensaio de dano (Martins, 2014, Specht *et al.* 2019):

- MSCR - *Multiple Stress Creep and Recovery*: AASHTO M332/21, ASTM 7405/15 e DNIT 423/2020 ME.

Além deste, tem-se os ensaios a baixas temperaturas que são:

- BBR - *Bending Beam Rheometer*, (AASHTO T313-12 e ASTM D6648-08);
- DTT – *Direct Tension Tester* (AASHTO T 314).

Martins (2014) concluiu que o ensaio para a resistência à fadiga de varredura linear de amplitude - LAS, em conjunto com o ensaio MSCR para avaliação da resistência à deformação permanente, são excelentes para uma proposta de especificações brasileiras por desempenho. O emprego destes dois ensaios elimina a necessidade de estufa PAV e estufa a vácuo, presentes na especificação *Superpave*, bastando a estufa RTFOT já constante na especificação brasileira atual. Assim sendo, a proposta de criar as especificações brasileiras por desempenho, para CAP e CAP

modificado poderia ser atendida com a inclusão de um único equipamento, o DSR, que é capaz de realizar os dois ensaios, substituindo os ensaios empíricos constantes das especificações vigentes.

Enquanto não se tem a especificação de ligantes por desempenho brasileira e nem todas as normas necessárias pela ABNT ou DNIT, indicam-se o emprego das normas AASTHO M320, M332, T350 e 315 ou ASTM D6373/2016.

A seguir são descritos estes dois ensaios e os respectivos parâmetros a serem determinados que complementam a especificação *Superpave*.

### 2.2.3.2 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla - MSCR

O parâmetro do DSR de deformação permanente  $|G^*|/\text{sen } \delta$  foi substituído pela compliância não recuperável ( $J_{nr}$ ), obtida a partir do ensaio cíclico de Fluência e Recuperação sob Múltipla Tensão – MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*), também realizado no DSR. A troca ocorreu em virtude do parâmetro  $|G^*|/\text{sen } \delta$  ser determinado na faixa de viscosidade linear (baixos níveis de deformação) não sendo condizente com a realidade em campo. Verificou-se uma melhor correlação entre  $J_{nr}$  e o desempenho no campo, do que o  $|G^*|/\text{sen } \delta$  (Martins, 2014).

No MSCR utiliza-se o reômetro com geometria de placas paralelas de 25mm de diâmetro, distância entre placas de 1mm, em amostras envelhecidas no RTFOT para temperatura alta da classificação PG. São 20 ciclos de fluência e recuperação para uma tensão de 100Pa, os primeiros dez ciclos para condicionamento da amostra e os últimos dez para análise de dados. Após os vinte ciclos de fluência e recuperação para a tensão de 100Pa, são realizados dez ciclos de fluência e recuperação para uma tensão de 3200Pa, conforme mostrado na Figura 19. A deformação não recuperável representa a diferença entre a deformação total e a deformação elástica ou recuperável, sendo a compliância não recuperável, a relação entre a tensão e a deformação (Macedo, 2018).

A norma DNIT 423/2020 descreve este ensaio já incorporado à especificação Superpave norte-americana mais atual, e que já vem sendo realizado em muitas universidades brasileiras há alguns anos. Portanto, já se tem um certo banco de dados de ligantes nacionais convencionais e modificados.

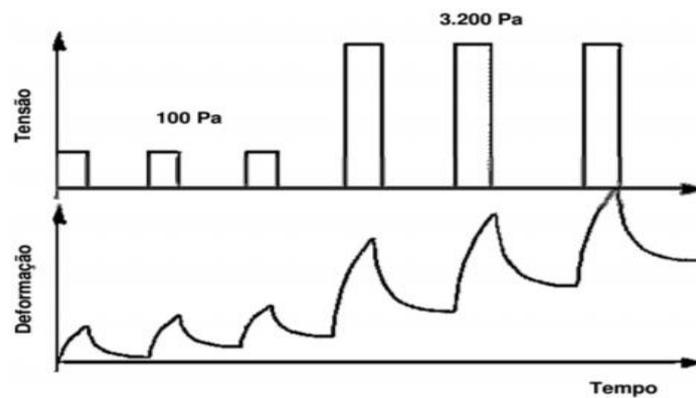
O valor da compliância não recuperável e a recuperação são determinadas por meio de três leituras de deformação na amostra de ligante asfáltico em cada um dos

dez ciclos de fluência e recuperação, sendo elas: uma no início do ciclo de fluência (0s), outra no final do ciclo de fluência (1s) e outra no final do ciclo de recuperação com 10s, ver Figura 20, (Domingos, 2011).

As Normas norte-americanas ASTM 7405/15 e AASHTO 332/21 descrevem a determinação da porcentagem de recuperação e não recuperação da fluência sob múltiplas tensões (MSCR), que no Brasil está descrita na norma DNIT 423/2020 ME.

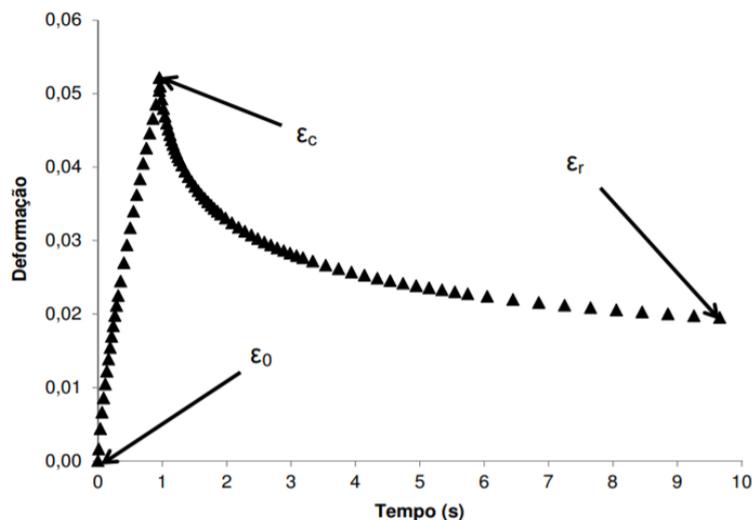
A norma DNIT ME 423/2020 especifica o procedimento de ensaio e os cálculos a serem feitos. Vários autores brasileiros já realizaram este tipo de ensaio, tais como: Domingos (2011, 2017); Dantas (2015); Camargo (2016); Fengler (2018); Macedo (2018), Klinsky (2020), entre outros.

Figura 19 - Esquema das tensões e deformações durante a realização do ensaio MSCR



Fonte: Domingos (2011)

Figura 20 - Localização das deformações em um ciclo de fluência e recuperação do ensaio MSCR



Fonte: Domingos (2011)

### 2.2.3.3 Ensaio de varredura linear de amplitude - LAS

Este ensaio avalia a resistência à fadiga de asfaltos por carregamento cíclico empregando aumento linear da amplitude da carga. De acordo com a Norma DNIT 439/2022, a varredura da amplitude deve ser efetuada no DSR na temperatura intermediária do pavimento de 19°C. Chacur e Nascimento, 2010; Pamplona *et al.* 2013; Zhou *et al.* 2013 e Martins, 2014 constataram que os parâmetros obtidos no ensaio de LAS representam melhor o dano de fadiga do que o parâmetro expresso por  $|G^*| \sin \delta$ . Os ligantes são submetidos ao ensaio após o envelhecimento de curto prazo.

O procedimento para execução do ensaio de LAS pode ser encontrado na especificação AASHTO TP 101-12 (2018) e na Norma DNIT 439/2022. O ensaio LAS é dividido em duas etapas. A primeira é varredura de frequência, para propriedades viscoelásticas na região linear, determinando os parâmetros  $\alpha$  e  $m$  que avaliam o material não danificado. A segunda etapa emprega cisalhamento oscilatório na frequência de 10Hz. O esquema de carregamento consiste na varredura contínua de deformação oscilatória, aumentando linearmente de 0,1% a 30%, até 3100 ciclos de carregamento. Os picos da deformação e tensão de cisalhamento são registrados a cada 10 ciclos de carga (1 segundo) junto com módulo dinâmico de cisalhamento ( $|G^*|$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ).

Existem cinco critérios para determinar o número de ciclos até o dano: 35% de redução no  $|G^*| \sin \delta$ ; tensão máxima; pico em  $C \times N$ ; pico no ângulo de fase e máximo da pseudo-energia. A habilidade em separar ligantes modificados dos não modificados usa atualmente o critério da máxima pseudo-energia ( $W_S^R$  máximo).

O ensaio LAS estima o tempo em que ocorre o dano com o critério relativo ao máximo da pseudo-energia e, a partir deste, o fator de fadiga de ligante (FFL). Os resultados são analisados utilizando o princípio de dano contínuo viscoelástico (VECD).

Pelo critério da pseudo-energia máxima, determina-se o valor ( $W_S^R$ ) e verifica-se o tempo correspondente ao  $C_f$ , calculando-se em uma planilha, as constantes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $A$  e  $B$  e o número de ciclos final,  $N_f$ .

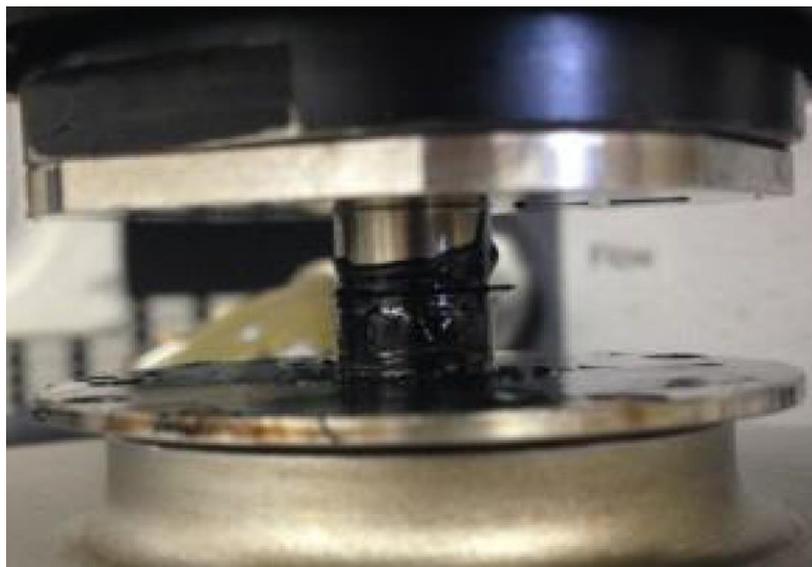
Para as misturas asfálticas, tem-se o fator de fadiga da mistura – FFM determinado no ensaio de tração direta, referente à área entre deformações de 100 e

200µε e ciclos correspondentes. O índice FFM apresenta boa correlação com a área trincada de revestimentos asfálticos. Verificou-se que existe correlação do FFM com FFL, definido como a área entre 1,25% e 2,5% de deformação, no gráfico N versus deformação, Fator de Fadiga do Ligante a 19°C (FFL19°C), calculado conforme equação seguinte:

$$FFL = \frac{(\log \log(N_{f,1,25\%}) + \log(N_{f,2,5\%}))}{2} \times (\log(0,025) - \log(0,0125)) \quad (14)$$

Na Figura 21 consta a imagem de uma amostra fraturada no DSR durante o ensaio de LAS.

Figura 21 - Amostra fraturada no DSR por meio do ensaio de LAS



Fonte: Martins (2014)

Segundo Martins (2014) o ensaio de LAS foi proposto por Johnson *et al.* (2007), utilizando o DSR, e em seguida foram sugeridas as seguintes modificações por Johnson (2010), Hintz (2012) e Hintz e Bahia (2011): alteração no esquema de carregamento da varredura linear de amplitude de deformação e na adoção do modelo de fratura para definição do critério de ruptura em função do tamanho da fissura crítica.

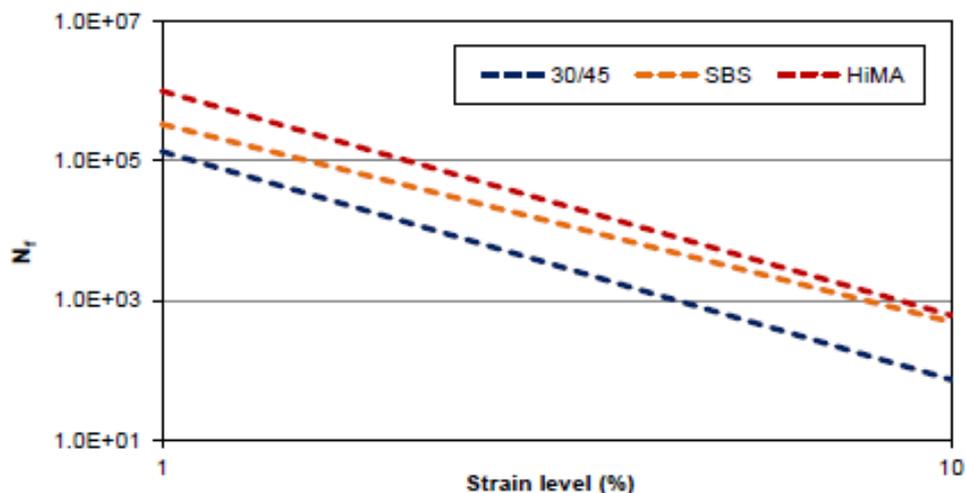
Segundo Safaei e Castorena (2017) a maioria dos esforços anteriores usando o protocolo de análise S-VECD negligenciaram os efeitos da não linearidade do

material e simplificaram a interpretação atribuindo para todos uma mesma perda de integridade do material aos danos.

De acordo com Wang *et al.* (2020) a energia de fratura, definida como a área sob a curva de tensão-deformação dos ensaios de LAS até o ponto de falha, tem forte correlação com a vida de fadiga prevista de ligantes em análise S-VECD rigorosa. Portanto, a energia de fratura baseada em ensaio LAS pode ser considerada como um indicador simples e confiável para classificar o desempenho à fadiga de diferentes ligantes.

Na Figura 22 constam as curvas de fadiga obtidas no ensaio de LAS durante a pesquisa de Bessa (2017) indicando que o ligante convencional CAP 30/45 apresenta menor resistência quando comparado com os ligantes modificados por SBS e HiMA, de alta performance. A curva referente ao ligante modificado com SBS apresenta uma inclinação menos pronunciada, indicando que a resistência à fadiga desse material é menos afetada pelo nível de deformação a que o material estará sujeito.

Figura 22 - Curvas de fadiga obtida no Ensaio de LAS



Fonte: Bessa (2017)

Segundo Fengler (2018) para realização do ensaio de LAS a condição ideal é quando ocorre o trincamento coesivo por fadiga do ligante asfáltico durante o procedimento.

Safaei e Castorena (2016) sugerem que a temperatura de ensaio adotada deve ser aquela na qual o ligante asfáltico apresente valores de  $|G^*|$  dentro da faixa de 12MPa a 60MPa.

#### 2.2.4 Balanço e novas tendências internacionais no uso de asfalto-borracha

Lo Presti, Medina, Dalmazzo *et al.* (2020) elaboraram um histórico do uso de asfalto-borracha na Europa desde 1960. Listam os vários países que tiveram alguma experiência nos últimos anos. Como exemplo mais recente, o asfalto-borracha híbrido tem pesquisas na Áustria, República Tcheca, Itália e Espanha no processo úmido e no processo seco na França e Itália. Mostraram várias especificações de alguns países. Também comentaram sobre as especificações de Portugal de asfalto modificado por alta porcentagem de borracha, com granulometria tipo *Gap Graded* e indica módulo de rigidez medido no ensaio de viga de 4 pontos, a 20°C e 10Hz de frequência, entre 3000 e 4500MPa se o ligante de inclusão for de penetração 35/50 e valores entre 2500 e 3500MPa para ligante 50/70.

Buttlar e Punyaslokrath (2021) relataram que todos os anos cerca de 300 milhões de pneus são feitos nos Estados Unidos. A borracha obtida a partir de pneus inservíveis pode ser usada de várias maneiras benéficas. Uma das formas mais benéficas envolve a produção de borracha de pneu moída (GTR) a partir de pneus inservíveis e o uso do GTR para criar o Asfalto Modificado por Borracha (RMA). O RMA tem sido usado nos EUA desde a década de 1960, mas a adoção extensiva do mercado ainda não ocorreu. Assim, uma questão central em relação ao RMA que ainda permanece sem resposta é: pode o asfalto modificado por borracha ajudar a eliminar os estoques de pneus inservíveis nos EUA, aumentar a sustentabilidade e a longevidade do pavimento, e permitir que mais quilômetros de estradas sejam reparados?

Xu *et al.* (2016) analisaram as propriedades reológicas de ligante asfáltico modificado com base no tipo de ligante e de cinco polímeros ou ácido combinado com 7% de borracha de pneu (GTR), a alta temperatura. O estudo foi realizado com base nos parâmetros da especificação *Superpave* e de outros parâmetros. O ligante modificado com 7% de GTR e várias concentrações de outros polímeros ou ácido, conduziu a um PG 76-22 ou PG 76-16 mostrando características reológicas adequadas na temperatura alta.

Wang *et al.* (2017) apresentaram um breve histórico do asfalto-borracha (AB) e discutem vantagens e desvantagens do asfalto-borracha tradicional. Versaram sobre vários aspectos como, por exemplo, o efeito da temperatura na degradação química do tamanho da borracha e da composição química do ligante e, também, como

produzir asfaltos-borracha de alto desempenho com a combinação com polímeros, fíler, plastificantes e outros materiais, como o ácido polifosfórico (PPA). Avaliaram que o enfoque químico para resolver problemas associados com o asfalto-borracha cresceu rapidamente nos últimos anos. Minimiza-se a sedimentação e reduz-se a degradação das propriedades físicas que são requisitos da estabilidade à estocagem. Misturar polímero ao asfalto borracha parece ser um caminho. Para aumentar o desempenho, a combinação com diferentes aditivos químicos pode ser um método para resolver a baixa resistência ao afundamento, a alta viscosidade e a baixa estabilidade à estocagem do AB. Comentaram que o potencial de poluição do AB causado pelos fumos e metal pesado, como o zinco, não está ainda definido. Por isso, devem ser investigadas as fontes e os processos para minimizar a poluição.

Lin *et al.* (2018) analisaram um asfalto-borracha composto com polímero SBS e ácido polifosfórico (PPA). O ligante composto foi avaliado para baixas temperaturas no reômetro de viga (BBR) por cromatografia GPC, por FTIR e por calorimetria (DSC). O resultado indicou que a borracha e o SBS melhoraram as características do material nas temperaturas baixas, enquanto o PPA teve efeito contrário. O ligante híbrido mostrou melhor comportamento do que só com o SBS.

Zhang *et al.* (2021) avaliaram um asfalto-borracha do tipo *Terminal Blend* (TBRA) como uma nova aplicação de asfalto modificado tradicional (CR). Em comparação com o asfalto modificado CR tradicional, o TBRA tem boa estabilidade de armazenamento com uma viscosidade mais baixa. No entanto, TBRA geralmente tem desempenho inferior em altas temperaturas, portanto, um polímero SBS foi incorporado para modificação do compósito. Estudaram o desempenho do asfalto modificado composto TB/SBS com diferentes teores de borracha e polímero SBS. Ensaio de desempenho, curva mestra e ensaio Semicircular (SCB) a baixa temperatura foram realizados para avaliação do desempenho nesta condição. Os ensaios de *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) e *Hamburg Wheel Tracking* (HWT) foram executados para verificação do desempenho em altas temperaturas. Os resultados mostram que uma adição de 2% de SBS pode aumentar a resistência ao afundamento e à umidade da mistura TBRA sem prejudicar seu desempenho em baixas temperaturas. Mas elevar a quantidade de SBS não melhora o comportamento. Observaram que na presença do SBS quimicamente ativo, as moléculas de borracha também participam da rede de reticulação do polímero e otimiza a mistura. Com base

no desempenho, a avaliação e análise de custos indicaram que a combinação de 10%TB mais 2% SBS foi a recomendada.

FHWA (2021) trouxe informações sobre a adição de borracha moída de pneu ao ligante asfáltico e à mistura, uma prática que consome cerca de 16,5% do mercado total de borracha moída de pneus atualmente nos EUA. A modificação de ligantes e misturas asfálticas com borracha está bem estabelecido e pode compor pavimentos de alto desempenho que ajudam na redução dos resíduos de pneus descartados em aterros sanitários e outros locais. O concreto asfáltico de graduação densa, SMA e camada porosa de atrito com asfalto-borracha, concreto asfáltico híbrido e adição via seca de borracha podem ser projetados pelo método *Marshall*, *Hveem* ou *Superpave*. Este relatório apresentou uma revisão e atualização dos processos de projeto de diversas misturas para pavimentos asfálticos promovendo o uso responsável, a fim de assegurar o desempenho em pavimentos asfálticos com benefícios ambientais medidos pela avaliação do ciclo de vida. Este relatório incluiu informações para o projeto de vários tipos de misturas e os ensaios de misturas contendo ligantes asfálticos modificados com borracha. Uma tecnologia especial referida neste relatório como híbrida utilizou uma combinação de borracha e outros modificadores, como estireno butadieno-estireno (SBS). Houve o desenvolvimento de tecnologias de processo a seco, em contraste com tecnologias de processo úmido para incorporar os produtos diretamente na mistura asfáltica durante a produção. Isso geralmente é feito adicionando a borracha diretamente ao agregado no tambor de mistura da usina de asfalto antes de introduzir o ligante asfáltico.

Howard *et al.* (2021) estudaram um asfalto híbrido, que combinou SBS com borracha de pneu (dita GTR). Compararam propriedades mecânicas medidas em laboratório com valores da literatura. Esta alternativa foi analisada no contexto da sustentabilidade sob os pontos de vista ambiental, econômico e social. Alguns estados norte-americanos já estão considerando o ligante híbrido em suas especificações. Ligantes híbridos com 1 a 2% de SBS e de 3 a 8% de GTR foram considerados adequados. Foram feitas seções experimentais em vários estados com sucesso.

Sierra-Carrillo de Albornoz *et al.* (2022) avaliaram o desempenho em campo de misturas asfálticas modificadas com borracha como camada superficial em vias de grande volume de tráfego. Para isso, diversos trechos foram construídos sob diferentes condições climáticas e usando misturas de controle fabricadas com ligantes

tradicionais modificados com polímero SBS e misturas modificadas com borracha moída de pneu. Amostras foram tiradas em diferentes períodos de vida de serviço (até 63 meses) e foram testadas em laboratório para avaliar a evolução da densidade, rigidez e resistência à fadiga das camadas. Com base nos resultados obtidos nos testes, pode-se concluir que, em condições reais de tráfego e clima severas, as misturas asfálticas fabricadas com ligantes modificados por borracha de pneu oferecem envelhecimento e desempenho mecânico muito semelhantes aos alcançados por misturas asfálticas fabricadas com ligantes modificados com SBS tradicional. Com base nestas considerações, relataram que esta aplicação pode ser uma solução interessante para minimizar os problemas ambientais causados por pneus inservíveis colocados em aterros comuns.

Wang *et al.* (2022) averiguaram as propriedades químicas e reológicas de um asfalto híbrido de mistura terminal (TBHA). Foram selecionados o polímero Estireno-butadieno-estireno (SBS), enxofre, borracha de pneu (CR) e asfalto puro para preparar o TBHA. O envelhecimento de curta duração e o envelhecimento de longo prazo da TBHA foram simulados usando uma estufa de filme fino rotativo (RTFOT) e vaso de envelhecimento por pressão (PAV). As propriedades químicas e reológicas da TBHA foram avaliadas e os resultados mostram que o  $\delta$ ,  $G^*$  e  $G^*/\sin \delta$  da TBHA foram geralmente menores do que a do asfalto modificado por SBS (SBSMA) a 76°C, e as características  $\delta$ , Jnr0.1 e Jnr3.2 da TBHA foram geralmente superiores ao SBSMA a 76°C. Outras características também foram impactadas como por exemplo, o modificador SBS na TBHA degradou e tornou o asfalto predominantemente mais mole; no entanto, durante o envelhecimento de longo prazo, o endurecimento do ligante desempenhou um papel dominante e aumentou a sua elasticidade. As propriedades antienvelhecimento superiores de TBHA são também demonstradas.

Yu *et al.* (2023) estudaram o emprego conjunto de polímero SBS (estireno – butadieno – estireno) e borracha na modificação de asfalto. Alguns autores consideram que a borracha de pneu é ideal para melhorar a durabilidade do asfalto modificado com SBS. Foi utilizada borracha de pneu na escala micro e nano (MNTR – microescala e nanoescala de borracha de pneu em inglês) de forma híbrida com asfalto modificado com SBS (SMB – ligante asfáltico modificado por SBS – estireno butadieno estireno). No entanto, a reticulação característica da borracha de pneu afetou sua dispersão no ligante asfáltico modificado por SBS (SMB) e restringiu a alta

dose de adição prevista. Neste trabalho, a borracha de pneu em microescala e nanoescala (MNTR) hibridizou SMB com elevada dosagem para verificar sua evolução estrutural durante o intemperismo e a variação de propriedades físicas. Utilizaram cromatografia de permeação em gel e espectroscopia no infravermelho que mostraram que a MNTR resultou em um asfalto modificado híbrido que apresentou resistência à fissuração mais estável em comparação com SMB em baixa temperatura, e o reômetro de cisalhamento dinâmico mostrou resistência estável à deformação e excelente elasticidade em alta temperatura durante o intemperismo. Assim, a adição de MNTR de alto teor melhorou fortemente a resistência natural a intempéries de SMB com base na estrutura coloidal altamente hibridizada.

### 2.3 USO DE PÉLETES DE ASFALTO-BORRACHA EM PESQUISAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS

A preparação de uma mistura asfáltica a quente convencional pode ser onerosa e requerer uma quantidade significativa de energia para aquecer e manter uma temperatura que seja suficiente para que o ligante asfáltico permaneça na condição líquida e utilizável. Numa mistura asfáltica a quente, além do ligante asfáltico ser aquecido para modificar a sua viscosidade, o agregado é secado para remover a sua umidade e aquecido antes de ser misturado com o ligante asfáltico (Bailey, 2010).

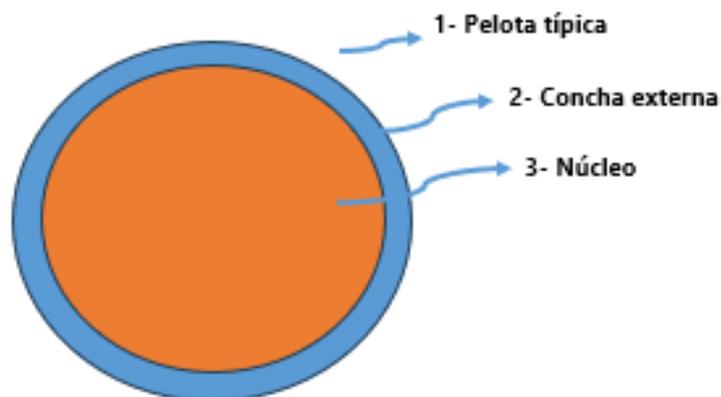
Os péletes de asfalto-borracha, designação dada à sua comercialização de forma processada como pequenas pelotas, são materiais muito recentes no mercado de pavimentação e surgiram de forma a simplificar o processo de obtenção e uso de asfalto-borracha.

De acordo com Bailey (2010) uma pelota típica (1) inclui um núcleo (3) e uma concha externa (2), como indicado na Figura 23. O núcleo pode incluir material de telha asfáltica reciclada, ligante asfáltico reciclado de pavimentação e um aglutinante asfáltico adicional. As telhas norte americanas contêm cerca de 20% a 40% de asfalto em peso. No processamento, deve-se permitir que o aglutinante asfáltico reaja e reative o asfalto antigo presente na telha reciclada, a partir do aquecimento (176°C – 193°C) por cerca de 15 minutos até 1 hora, fazendo com que o asfalto velho nas telhas se torne pelo menos parcialmente dissolvido no ligante virgem. Assim, a telha de asfalto contribui para o volume de aglutinante em uma mistura asfáltica nova. O núcleo

pode ainda ser formulado com materiais adicionais, tais como: borracha de pneus moída ou plástico moído, borracha de poliestireno Butadieno (SBS), borracha de estireno butadieno (SBR), cera Fisher-Tropsch, cera de soja, zeólitas, HDPE, LDPE, EVA e PVC.

A camada externa pode incluir diferentes materiais, sendo configurada para evitar que as pelotas asfálticas se juntem umas às outras ou às superfícies adjacentes durante o armazenamento. Os péletes podem ser fabricados em uma instalação central e em, em seguida, estocados em um local de trabalho, um armazém, ou local semelhante até que sejam necessários para a preparação de misturas asfálticas.

Figura 23 - Representação esquemática de um pélete de asfalto



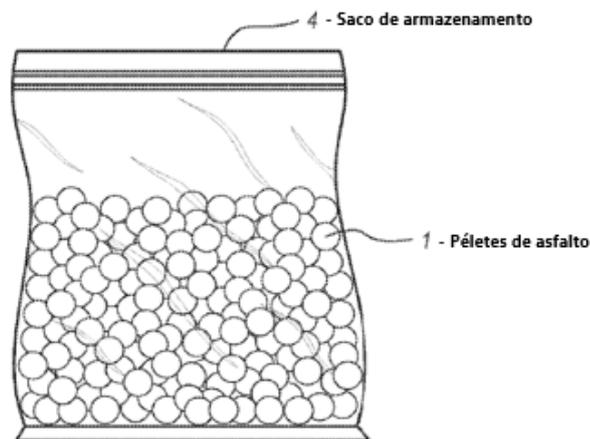
Fonte: Autoria própria (2023)

Segundo Bailey (2010) o material resultante do processo de peletização pode ser armazenado e transportado em uma ampla faixa de temperaturas ambientes, devido às suas propriedades viscoelásticas, mas que estão contidas no recobrimento. Os péletes de asfalto podem ser armazenados em sacos ou em recipientes sem haver aglomeração pegajosa, porque as pelotas asfálticas individuais são configuradas para permanecerem estáveis e unitárias. No entanto, algum grau de união pode ocorrer, desde que os péletes mantenham alguma fluidez para serem derramados de um saco, escavados e manuseados como péletes.

Na Figura 24 consta a representação esquemática de um saco de armazenamento (4) contendo péletes de asfalto (1). O armazenamento é estável e impede que uma pelota se degrade ou combine com pelotas adjacentes.

Nesse sistema de produção, alguns produtores de péletes adicionam a borracha granulada de pneus usados e polímeros ao ligante, assim como outros aditivos (fibras e fíleres minerais), antes do processo de peletização. O material resultante da peletização pode ser ensacado e estocado na forma seca à temperatura ambiente, não necessitando aquecimento constante, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub>, como mostra a Figura 25.

Figura 24 - Representação esquemática de um saco contendo uma quantidade de péletes de asfalto estáveis ao armazenamento



Fonte: Adaptado de Bailey (2010).

Figura 25 - Amostras de péletes estocados à temperatura ambiente



Fonte: Disponível em <https://www.pelletpave.com>, acesso em out/2022

De acordo com Sockwell (2013) o transporte de ligante asfáltico líquido por navios é vantajoso, porque os seus custos são relativamente baixos. Mas, há uma grande preocupação em manter o ligante líquido na temperatura correta durante o transporte. Além disso, as desvantagens de transportar ligante asfáltico líquido por navios são a disponibilidade limitada de locais onde as hidrovias estão disponíveis e a suscetibilidade a atrasos devido às condições do tempo. O transporte ferroviário de ligante asfáltico líquido também é comum, mas a temperatura de entrega do ligante asfáltico líquido afeta diretamente tempo de descarga e seus custos de aquecimento. Os vagões não são aquecidos durante o transporte e dependendo do tempo de viagem, os ligantes asfálticos podem requerer reaquecimento na chegada. Se o ligante asfáltico líquido tiver resfriado à temperatura ambiente, pode levar até 24 horas para reaquecer o ligante asfáltico líquido para que possa ser descarregado. O meio mais tradicional para transportar ligante asfáltico líquido é utilizando caminhões, pois oferece maior controle do tempo de entrega. Alguns reboques-tanque podem ser equipados com aquecedores, para manter o ligante asfálticos líquido a uma determinada temperatura. No entanto, estes aquecedores são geralmente queimadores que funcionam com óleo diesel, aumentando os custos de transporte. Na forma peletizada, o ligante pode ser transportado sem ter que ser aquecido, reduzindo assim o custo do transporte.

Diante do exposto, percebe-se que uma das vantagens mais óbvias dos péletes de asfalto-borracha é a facilidade de transporte a temperatura ambiente do material, usando todos os meios de transporte possíveis. A versatilidade dessa tecnologia tem amplas implicações para a resolução de problemas, como: transporte para locais remotos, estabilidade de temperatura, evitar eventual segregação de aglutinantes/aditivos, evitar alto consumo de energia, atender a cronogramas de produção lentos, não gerar materiais residuais e proporcionar segurança do trabalhador (King, 2015).

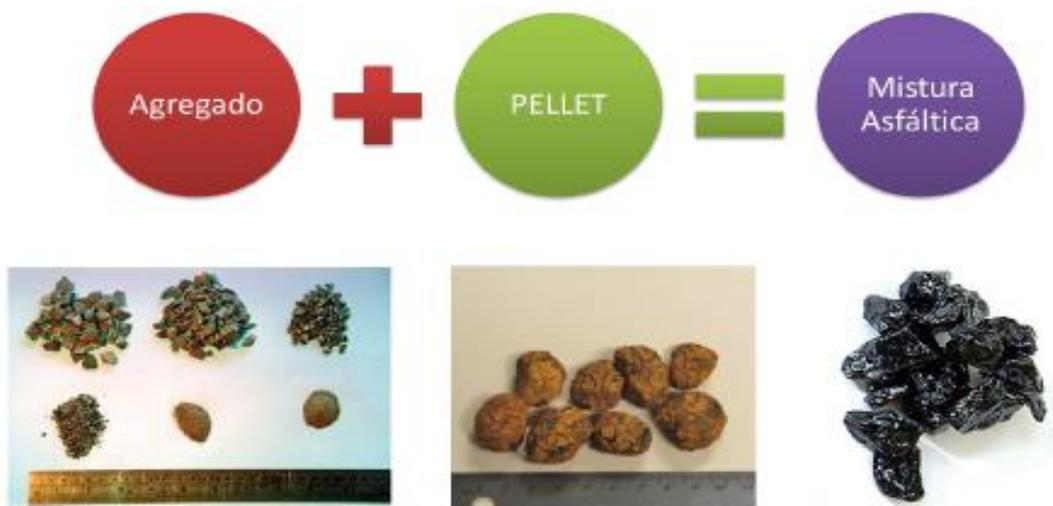
Vários fabricantes oferecem atualmente esta alternativa, sendo um dos produtores de asfalto-borracha em forma de péletes a empresa norte americana Phoenix Industries, que tem fornecido os péletes de asfalto-borracha utilizados no Brasil. Destaca-se que ainda não há relatos de produção no Brasil, sendo importante averiguar sobre a viabilidade técnica, ambiental e econômica desta nova metodologia na pavimentação nacional.

De acordo com os fornecedores da Phoenix Industries, a composição desse material inclui ligante asfáltico, borracha de pneu moído, cal hidratada, cimento Portland, fileres minerais e agente “peletizante”.

Kim (2014) diz que na saída do reator há um peletizador acoplado a um resfriador, com alimentação de fíler para formação dos péletes. Amirkhanian, Xiao e Sockwell (2015) confirmam este processo de produção informando que o fíler é cal hidratada e, após a formação dos péletes, eles são revestidos para evitar coagulação.

Para a confecção da mistura asfáltica o pélete pode ser projetado sendo aquecido diretamente junto aos agregados, conforme mostra a Figura 26. Também, pode ser utilizado outro tipo de processo que envolve a modificação de ligante asfáltico convencional por meio da incorporação dos péletes de asfalto-borracha em proporções pré-determinadas sendo, posteriormente, misturado aos agregados na temperatura de mistura.

Figura 26 - Processo peletizado: péletes misturados diretamente aos agregados



Fonte: Relatório Dynatest Engenharia Ltda (2015)

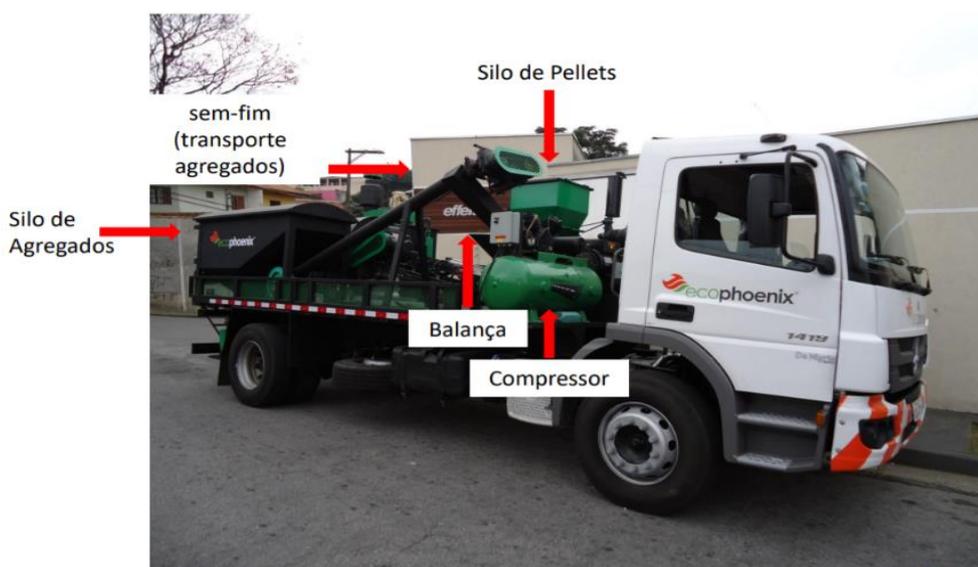
Segundo Amirkhanian, Xiao e Sockwell (2015) trata-se de um produto que permite diversas formulações possibilitando que a mistura seja adaptada para diferentes aplicações. Modificar o ligante asfáltico com os péletes diretamente na usina para um projeto de mistura asfáltica, sem a necessidade de mistura prévia em distribuidoras, evita problemas de estabilidade a estocagem em tanques e caminhões tanques.

A mistura pode ser usada com equipamentos convencionais de pavimentação e, também, em usinas móveis que podem ser empregadas para execução de reparos localizados, conforme mostra a Figura 27.

A massa asfáltica nestes caminhões pode ser produzida pelo processo manual ou pelo processo automático, quando a usina operar com um computador embarcado, capaz de realizar todo o processo de usinagem, acionamento da comporta da balança, elevação do tambor misturador e a comporta da descarga da massa asfáltica produzida, por um sistema pneumático.

Esta usina móvel é capaz de produzir massas asfálticas nas temperaturas determinadas pelo laboratório para cada tipo de mistura desejada. Ela dispõe de compressor de ar e mangueira de jato de ar comprimido para utilização na limpeza do local onde será realizada a pintura de ligação para posterior aplicação da massa asfáltica. Possui um tanque para armazenamento de emulsão asfáltica provido de uma bomba pneumática para circulação da emulsão e limpeza do sistema da tubulação. Também dispõe de uma mangueira com dispositivo de regulagem para realização da pintura de ligação do local de aplicação da massa asfáltica produzida.

Figura 27 - Exemplo de Usina móvel utilizada para fabricação de massa asfáltica com asfalto-borracha peletizado.



Fonte: Relatório Dynatest Engenharia Ltda. (2015).

De acordo com King (2015) para aplicações de pavimentação em locais remotos, os péletes podem ser formulados com todo o ligante asfáltico necessário ao

projeto da mistura presente na pelota, sem ser usado como um aditivo do ligante asfáltico convencional. Esta opção permite:

- Empreiteiros e municípios produzirem seu próprio mix quente para pavimentação e remendos, incluindo trabalho em áreas remotas que estão longe da usina;
- Clientes de locais de climas muito frios poderem continuar fazendo remendos e pavimentando durante todo o inverno;
- Aglutinantes modificados de alta qualidade para serem utilizados para pequenas obras.

O pélete de asfalto pode ser utilizado como uma alternativa ao processo de mistura asfalto-borracha via úmida (*terminal blend*) ou na usina (*continuous blend*), quando as especificações do projeto requerem um elevado teor de borracha e alta viscosidade, para atender requisitos de viscosidade, penetração, ponto de amolecimento e resiliência.

King (2015) comentou que várias tentativas de peletização de asfalto tiveram pouco sucesso devido aos altos custos, bem como problemas com a aglomeração de pelotas no armazenamento, até que a tecnologia fosse bem estabelecida.

### **2.3.1 Tecnologias de peletização do asfalto-borracha**

Em 06/12/2012 foi publicada a patente de classificação internacional, C08L 95/00 (2006.01), concedida a *Billian Limited* e William R. Bailey, que também foi o criador do processo e solicitou benefícios de prioridade na invenção dos péletes de asfalto-borracha. O número da publicação internacional é WO 2012/167152 AI e o número de aplicação internacional, PCT/US2012/040554.

Segundo King (2015) a empresa *Billian IP Limited* é proprietária das seguintes patentes que tem ligação com os péletes de asfalto-borracha:

- Patente europeia nº 1.885.660;
- Patente canadense nº 2.608.867;
- Patente russa nº 201.111.729;
- Patente chinesa nº. ZL200980115630.0;
- Patentes dos EUA nº 7.303.623, 7.517.401 e 8.182.726.

A *Billian IP Limited* também solicitou mais dois pedidos de patente até 2015:

- EP 09810555.4;
- EP 14177971.0.

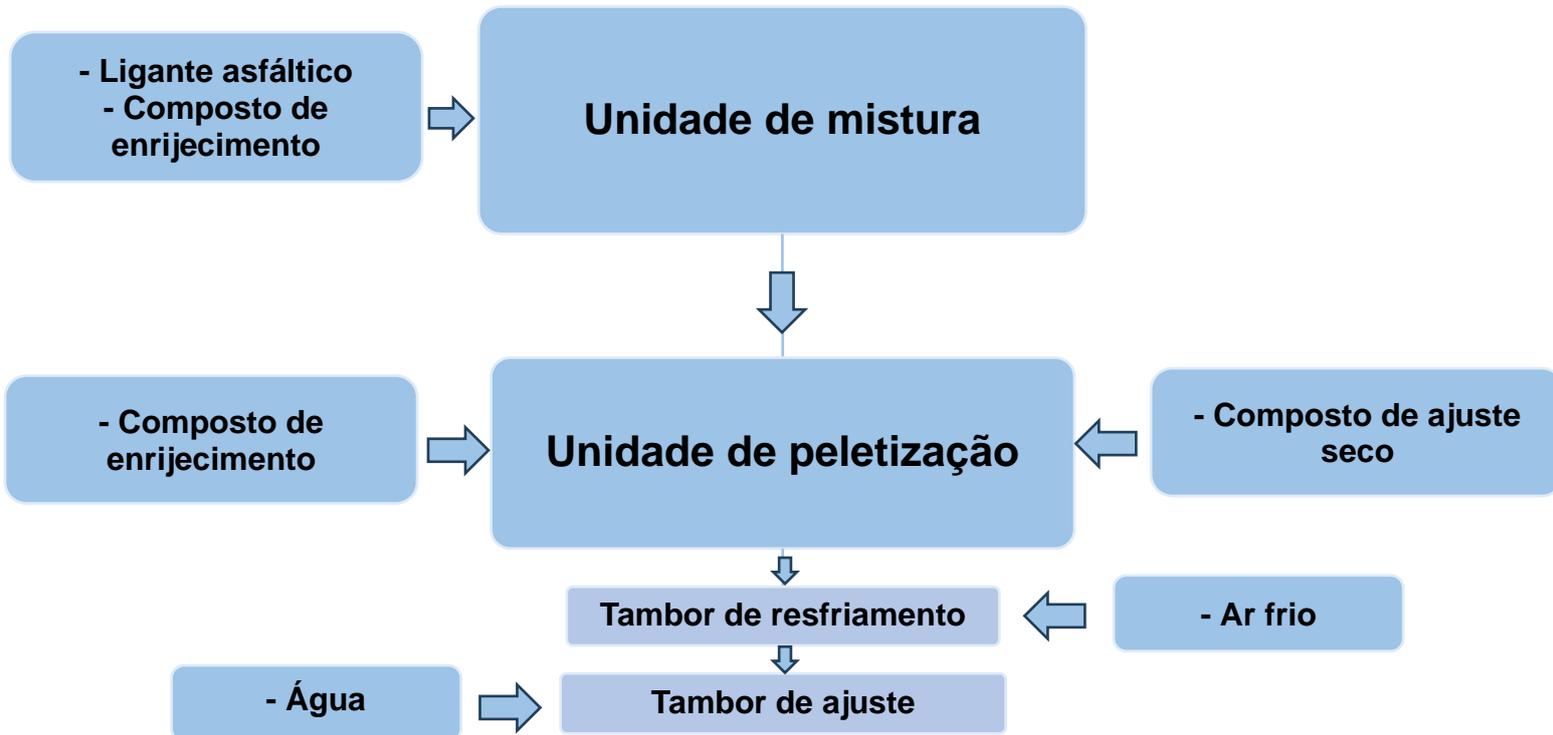
Em 26/03/2013 a Phoenix Industries USA recebeu a patente norte-americana nº 8.404.164 pelo Escritório de Patentes e Marcas dos EUA (USPTO) por seu processo inovador relacionado à peletização do asfalto modificado por borracha de pneus para uso na pavimentação.

Diferente das composições para asfalto peletizado que são patenteadas por Behelfer *et al.* (U.S. Pub. No. 2010/0056669) ou Bailey (U.S. Pub. N°. 2009/0272676), a composição feita por Sockwell (2013) usada pela Phoenix permite que o asfalto peletizado possa ser armazenado em temperaturas extremamente quentes, sem que haja aglutinação entre as pelotas.

Em áreas como Nevada ou Arizona - USA, onde as temperaturas do ar podem subir até 46°C ou mais altas, as composições de pelotas do Behelfer *et al.* e de Bailey foram inadequadas, porque o calor extremo fez as pelotas derreterem e grudarem umas nas outras formando grandes massas globulares (SOCKWELL, 2013).

Na Figura 28 consta um fluxograma mostrando o método de processamento de asfalto peletizado de Sockwell (2013). A composição do asfalto peletizado neste caso pode incluir ligante asfáltico, um composto de enrijecimento, um composto de ajuste seco e água.

Figura 28 - Diagrama de um método de processamento dos péletes de asfalto



Fonte: Adaptado de Sockwell (2013)

O processo da Figura 28 foi descrito por Sockwell (2013), conforme segue:

- Para iniciar o processo de peletização do asfalto, o ligante asfáltico deve ser mantido a uma temperatura controlada entre cerca de 225°F a 425°F (107°C a 218°C). É preferível que a temperatura do ligante asfáltico seja de aproximadamente 325°F (163°C), mas benefícios também podem vir do ligante asfáltico mantido a qualquer temperatura dentro da faixa desejada. O ligante asfáltico pode ser mantido em um tanque que está conectado a uma unidade de mistura. No entanto, também pode ser entregue na unidade de mistura diretamente de um caminhão de transporte, ou qualquer outro modo de transporte adequado, que possa ser conectado à unidade de mistura;
- O composto de enrijecimento é então adicionado na unidade de mistura por um funil de alimentação, ou outro mecanismo adequado, e é misturado com o ligante asfáltico dentro da unidade de mistura. O composto de enrijecimento pode incluir telhas asfálticas em uma

quantidade entre 10% e 20% em peso do pélete de asfalto; borracha vulcanizada em uma quantidade entre 5% e 10% em peso do pélete de asfalto; uintahite (asfalto vítreo encontrado apenas em Utah e no Oeste do Colorado) em uma quantidade entre 1% e 2% em peso do pélete de asfalto; e zeólita em uma quantidade de até 0,5% em peso do pélete de asfalto. A velocidade da unidade de peletização pode ser ajustada para controlar o tamanho das pelotas de asfalto resultantes;

- Na unidade de peletização a mistura de ligante asfáltico é polvilhada com o composto seco, fazendo com que se formem os péletes de asfalto. O composto seco não é apenas misturado no ligante asfáltico (formando assim uma parte do corpo da pelota de asfalto), mas também forma uma fina camada na superfície externa do pélete de asfalto.
- Os péletes podem então ser colocados em um tambor de resfriamento que pode ser posicionado em ângulo e girado enquanto o ar frio é bombeado dentro dele. À medida em que passam pelo tambor de resfriamento os péletes endurecem. Ao saírem do tambor de resfriamento, a temperatura das pelotas de asfalto pode ter caído de cerca de 180°F (82°C) para cerca de 75°F (23°C);
- Os péletes são então passados por um tambor de ajuste. À medida em que passam pelo tambor de ajuste, são pulverizados com água. A água reage com a fina camada que havia se formado na superfície externa das pelotas de asfalto, fazendo com que o composto se cristalice. É esta superfície externa cristalizada das pelotas de asfalto que impede que elas derretam, grudem e formem grandes massas globulares quando armazenadas em áreas de temperaturas climáticas muito quentes.

A Figura 29 exibe a vista de uma usina de fabricação de péletes de asfalto-borracha da Phoenix Industries USA indicando seus componentes.

Figura 29 - Vista e componentes da usina para fabricação dos péletes de asfalto-borracha



Fonte: Relatório Dynatest Engenharia Ltda. (2015)

### 2.3.2 Tipos de péletes de asfalto-borracha

#### a) Péletes de asfalto com SBS e mistura de borracha

De acordo com a ATDM (fabricante de petróleo e produtos petroquímicos nos Emirados Árabes, Irã e Turquia), os péletes de asfalto com SBS e mistura com borracha são formulados para reduzir a suscetibilidade à temperatura, aumentando a viscosidade do asfalto em altas temperaturas e melhorando a recuperação elástica sob altas tensões. Tem-se mostrado um bom material para aumentar a durabilidade e a resistência à fadiga, segundo consta no site denominado <https://gilsonite-bitumen.com/en/products/bitumen-pellets> (acesso em 30/08/2020).

#### b) Péletes de GTR – *Ground Tire Rubber*

De acordo com o Departamento de Transportes do Estado de Nevada – NDOT (2016) o GTR (*Ground Tire Rubber*) é um tipo de modificador de asfalto composto por pedaços de borracha produzidas a partir de pneus inservíveis. Os ligantes asfálticos

modificados pelo GTR podem conter aditivos ou modificadores adicionais (tais como polímeros, diluentes e óleos aromáticos) além de borracha de pneus inservíveis. A borracha do pneu moído aumenta a elasticidade do aglutinante e aumenta sua resistência ao envelhecimento devido aos antioxidantes contidos nos pneus. Os principais usos de ligantes asfálticos modificados pelo GTR em aplicações de pavimento incluem selantes, misturas asfálticas a quente e membranas.

As pelotas de pavimentação GTR produzidas pela *Billian IP Limited* (exibidas na Figura 30) são um aditivo de concentrado de borracha reciclada e asfalto, fabricado sob um processo patenteado para uso em substituição ao asfalto modificado por polímero (Billian UK Limited, 2015).

Figura 30 - Amostra de péletes de GTR



Fonte: Billian UK Limited, (2015)

c) *PelletPAVE-AR*

O *PelletPAVE-AR* é o principal produto da Phoenix Industries USA (ver Figura 31). Segundo informações do fabricante ele é usado como uma alternativa ao processo de mistura de borracha de pneu ao asfalto em campo quando a especificação do projeto exige um alto teor de borracha e alta viscosidade do ligante asfáltico. Normalmente, é usado em misturas com granulometria do tipo *Gap-Graded* ou *Open-Graded* a uma taxa de aplicação de 20% a 40% (em peso de aglutinante

total) para atender a um requisito de ligante asfáltico modificado por borracha dado por viscosidade, penetração, ponto de amolecimento e resiliência.

O *PelletPAVE-AR* é usado como processo úmido reagido segundo a norma ASTM D6114/19. No momento do uso, a quantidade proporcional do *PelletPAVE-AR* é misturada, seja através de uma esteira de RAP de uma planta asfáltica de fluxo contínuo ou diretamente no misturador de uma planta gravimétrica, onde derrete e é misturado com o agregado aquecido para produzir uma mistura asfáltica modificada por borracha, (informação disponível em [//https://www.PelletPAVE.com](https://www.PelletPAVE.com)).

Segundo a Phoenix Industries, o ligante asfáltico modificado com *PelletPAVE-AR* pode alcançar o desempenho de asfalto-borracha processado via úmida, com a simplicidade do método de processo seco.

Figura 31 - Amostra de *PelletPAVE-AR* - (*PelletPav*) desta pesquisa.



Fonte: disponível em: [www.PelletPAVE.com](http://www.PelletPAVE.com), em 27/08/2022

As propriedades aprimoradas da mistura incluem os seguintes aspectos, conforme a Phoenix Industries:

- Maior resistência à tração;
- Mais elasticidade;
- Melhor adesão e coesão;
- Maior flexibilidade a temperatura baixa;
- Rigidez elevada a alta temperatura.

d) *PelletPAVE-TR*

De acordo com a Indústria Phoenix, o *PelletPAVE - TR* pode ser considerado um substituto para o processo úmido de mistura do tipo *terminal blend*. Este produto é formulado especificamente com polímero SBS e de 12% a 15% de um pó de borracha fino usado para melhorar o desempenho de misturas asfálticas densas ou apenas para alcançar um determinado grau PG (Performance Grade). A Figura 32 mostra a aparência do produto.

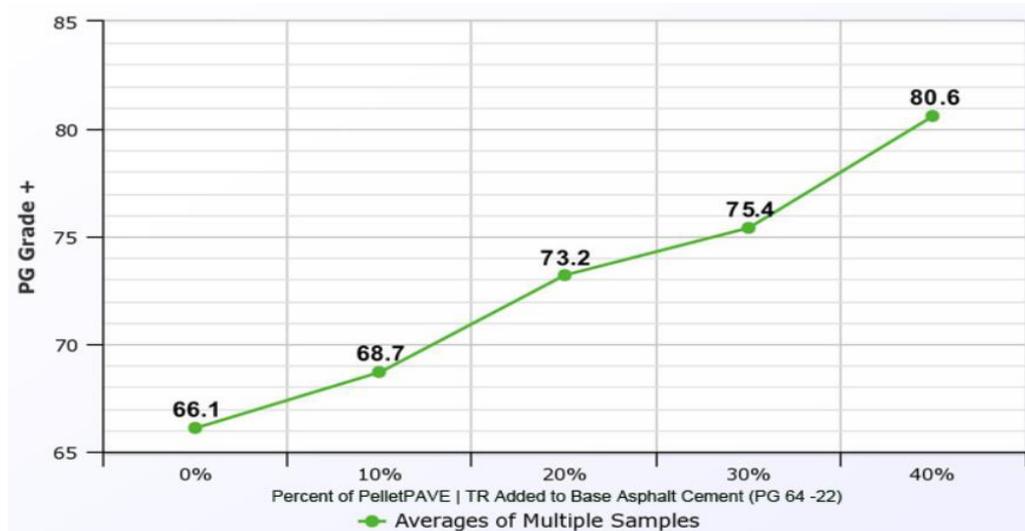
Figura 32 - Amostra de *PelletPAVE-TR* – (*PelletPAVE- Plus*) desta pesquisa



Fonte: disponível em: [www.PelletPAVE.com](http://www.PelletPAVE.com), em 27/08/2022

Como pode ser constatado na Figura 33, a porcentagem de *PelletPAVE-TR* adicionada ao CAP convencional pode chegar a 40%, e cada proporção eleva o PG do CAP de forma diferente. Segundo os fabricantes, este tipo de pélete não deve ser utilizado puro na composição da mistura asfáltica, mas sim como modificador do ligante asfáltico convencional.

Figura 33 - Gráfico do grau de desempenho versus % *PelletPAVE-TR*



Fonte: //https: www.PelletPAVE.com, acesso em 27/08/2022

Na Figura 34 está mostrado outro tipo de pélete disponível nas Indústrias Phoenix, composto por material reciclado, denominado *PelletRAP*.

Figura 34 - Amostra de *PelletRAP*



Fonte: disponível em: www.PelletPAVE.com, em 27/08/2022

### 2.3.3 Estudos desenvolvidos utilizando a metodologia dos péletes de asfalto-borracha

Para efeito de embasamento técnico, visto que os estudos envolvendo a tecnologia de asfalto peletizado são recentes em todo o mundo e, especialmente, no Brasil, apresenta-se a seguir uma síntese sobre publicações acerca dos péletes de asfalto e as suas peculiaridades.

Na análise publicada por Amirkhanian *et al.* (2015) foram utilizados diversos tipos de péletes com diferentes tamanhos de borracha de pneus. Um dos péletes testados foi o *PelletPAVE-Plus* (atual *PelletPAVE-TR*, da Phoenix Industries), com alta porcentagem de borracha miúda, ligante asfáltico virgem PG 64-22 e uma pequena fração de outros materiais, resultando em um aglutinante polimérico (PG 76-22). O *PelletPAVE-Plus* foi adicionado numa taxa de 1,25% por peso total da mistura e o teor de ligante total foi de 5,2%.

Na Tabela 05 constam os resultados dos ensaios de caracterização reológica realizados no ligante convencional PG 64-22 e no *PelletPAVE-Plus* na temperatura do PG de alta. A análise de custos mostrou que estas misturas são econômicas e produzem misturas compatíveis com misturas SBS.

Tabela 05 - Propriedades reológicas do pélete avaliado na temperatura do PG de alta

Tipo de ligante	$ G^* /\text{sen } \delta$ (Pa)	Ângulo de fase (°)	Viscosidade (135°C) (Pa.s)	T (°C)
PG 64-22	1725 (64°C)	86,8	0,4692	68,5
<i>PelletPave-Plus</i>	1242,2 (76°C)	81,1	1,6479	78,2

Fonte: Adaptado de Amirkhanian *et al.*, 2015

Resultados de ensaios e testes de campo realizados no estudo de Amirkhanian e Sockwell (2015) indicaram que os péletes de asfalto-borracha podem ser utilizados com sucesso em uma variedade de misturas asfálticas a quente, com melhoria do seu desempenho. Quando o *PelletPave-Plus* foi adicionado ao agregado aquecido e aglutinante virgem (70/100 *pen graded* Noruega / PG 64-22) resultou em um aglutinante de polímero (PG 76-22). Nesse caso, aproximadamente 0,5% menos aglutinante virgem foi utilizado.

Aplicações de campo desses materiais próximo aos Estados Unidos têm mostrado resultados eficazes para manutenção de pavimento, tendo sido observados por quase um ano sem qualquer sinal de deterioração (Amirkhanian e Sockwell, 2015).

Amirkhanian (2015), conduziu um estudo na China em parceria com a Universidade de Tecnologia dos Materiais em Wuhan. Na pesquisa foram apresentados resultados de ensaios laboratoriais e da experiência de campo utilizando o produto *PelletPAVE-Plus* (atual *PelletPAVE-TR*) das Indústrias Phoenix. A parte de campo envolveu o acompanhamento de três seções experimentais com SBS (40m), *PelletPAVE* (40m) e (120m) *PelletPAVE-Plus*, totalizando 200m recapeados com 4cm de espessura de revestimento. Na Figura 31 consta uma visão da condição do pavimento existente antes do recapeamento.

Segundo Amirkhanian (2015) desde maio de 2014 as seções de teste foram observadas e avaliadas inúmeras vezes. Nas Figuras 35 e 36 são exibidas as vistas da condição do pavimento existente antes do recapeamento e da seção teste pavimentada com *PelletPAVE-Plus* após o recapeamento.

Figura 35 - Vista da condição do pavimento existente antes do recapeamento



Fonte: Amirkhanian (2015)

Figura 36 - Vista da condição do pavimento existente após o recapeamento



Fonte: Amirkhanian (2015)

Na Tabela 06 constam os valores  $|G^*|/\text{Sen } \delta$  a diferentes temperaturas dos ligantes utilizados neste experimento relatado. Percebe-se que o *PelletPAVE-Plus* apresentou uma boa resposta com relação à deformação permanente quando comparado com os demais materiais ensaiados, compostos por ligante convencional (60/70 pen graded Kuwait) e ligante modificado por SBS. Na Tabela 07 constam os valores obtidos no ensaio de *creep* a 60°, em Pa.

Tabela 06 - Valores  $|G^*|/Sen \delta$  a diferentes temperaturas

Ligante Fonte	64°C	70°C	76°C
60/70 pen graded Kuit	2310	1090	540
Modificado por polímero SBS	3630	2090	1260
<i>PelletPAVE-Plus</i>	33500	7230	4980

Fonte: Adaptado de Amirkhanian (2015)

Tabela 07 - Valores obtidos no ensaio de *creep* a 60°C, Pa

Ligante Fonte	% total <i>creep</i>	% <i>creep</i> (não recuperável)	% <i>creep</i> (recuperável)
60/70	10,8	9,7	11,9
Modificado por polímero SBS	7,99	2,84	64,1
<i>PelletPAVE-Plus</i>	5,8	0,727	84,9

Fonte: Adaptado de Amirkhanian (2015)

Nunes (2017) em sua dissertação de mestrado, estudou no laboratório da Universidade de Brasília - Unb a fadiga de misturas asfálticas descontínuas utilizando os péletes de asfalto-borracha da Phoenix Industries. Observou o comportamento reológico e a resistência à fadiga do ligante convencional CAP 50/70, de ligantes modificados e de misturas de granulometria descontínua produzidos com adição de pélete de asfalto-borracha (o mesmo *PelletPave-Plus* desta pesquisa) e RAR (do inglês, *Reacted and Activated Rubber*), ambos ilustrados na Figura 37.

Figura 37 - Amostras de materiais utilizados por Nunes (2017): RAR (à esquerda) e *Pellet* (à direita)



Fonte: Nunes (2017)

Nunes (2017) considerou como teor ótimo provável para início da dosagem em sua pesquisa, o teor de 8,3% de ligante, e os demais teores variaram segundo a recomendação *Superpave* que define as variações de  $T\% \pm 0,5$  e  $T\% + 1,0$ , sendo estes de 7,8 % e 8,8 % e 9,3 %, respectivamente. A curva granulométrica utilizada foi descontínua do tipo “*Gap-Graded*” que se manteve constante durante toda a pesquisa. A temperatura para mistura foi de 170°C e para a compactação foram utilizadas temperaturas entre 150 e 160°C. Ao final do processo, foram estabelecidos como parâmetros volumétricos de projeto para todas as misturas o volume de vazios de 5,4%; o teor ótimo de ligante de 8,8% (6,2% CAP 50/70 e 2,6% de péletes); os vazios nos agregados minerais de 23,6% e a relação betume vazios de 78%.

Os resultados de Nunes (2017) mostraram que os péletes de asfalto-borracha elevaram a vida de fadiga de misturas asfálticas de granulometria descontínua, sendo este desempenho superior ao de uma mistura asfalto-borracha também descontínua produzida por via úmida (amostra de asfalto-borracha “*field blend*” - rodovia RJ-122). Os ensaios dos ligantes foram realizados no DSR e as misturas asfálticas foram ensaiadas no equipamento de viga à flexão em quatro pontos.

Amirkhanian (2018) estudou três casos de projetos em campo na África do Sul, Kuwait e Holanda que usaram asfalto-borracha peletizado como alternativa ao tradicional processo de mistura via úmida em campo (*field blend*).

No projeto de mistura asfáltica da África do Sul o ligante asfáltico 50/70 foi modificado utilizando 40% de pélete (*PelletPAVE*) com relação à massa total de ligante (teor de projeto de 7,0%, sendo 2,8% de péletes, com relação à massa total da mistura asfáltica). A curva granulométrica utilizada foi do tipo *Gap-Graded*. Na ocasião a qualidade e aparência geral da mistura foram satisfatórias. Não houve problemas durante o processo de compactação da mistura no campo.

As Figuras 38 e 39 mostram os péletes de asfalto-borracha sendo carregados na usina de asfalto e uma seção do pavimento sendo executada com a mistura com os péletes. O desempenho do pavimento foi excelente. Os valores do módulo de resiliência da mistura típica (sem péletes) e da mistura contendo os péletes foram de 1721MPa e 2911MPa, respectivamente. Foram realizados ainda ensaios de fadiga em viga de 4 pontos, resistência à tração indireta e “*creep*” (Amirkhanian, 2018).

Figura 38 - Péletes de asfalto-borracha sendo carregados na usina de asfalto



Fonte: Amirkhanian (2018)

Figura 39 - Aplicação em campo da mistura com os péletes



Fonte: Amirkhanian (2018)

De acordo com Amirkhanian (2018), no Kuwait os péletes foram usados como aditivos para melhorar as propriedades do ligante virgem. O ligante asfáltico de penetração 60/70 e a borracha fornecida pelo Kuwait foram usados na fabricação do asfalto-borracha. Além disso, uma fonte de ligante local e uma fonte de borracha dos EUA foram usadas para fins de comparação. Cada fonte de ligante foi aquecida a 175°C e, em seguida, as porcentagens adequadas da borracha foram adicionadas. A matriz foi misturada (700 rpm) por 30 minutos garantindo a produção de um ligante asfáltico modificado homogêneo antes do início de cada ensaio. Todos os ligantes foram testados quanto à viscosidade, penetração, DSR, MSCR e ITS. Neste estudo os péletes foram usados para fins de comparação em taxas de 2,0%, 2,5% e 3,5% de péletes por peso total da mistura asfáltica para cada projeto de mistura, sendo os teores de ligante de projeto definidos como 5,5%, 5,7% e 5,8%, respectivamente. Os ensaios reológicos dos ligantes modificados não são apresentados, apenas citados.

Na Holanda, segundo Amirkhanian (2018), foram conduzidos vários projetos com o *PelletPAVE*, um deles localizado na N 228 Montfoort (Utrecht), do km16,1 ao km17,3. O tamanho máximo do agregado foi de 8mm com o material de enchimento sendo calcário e 2,5% de péletes de asfalto-borracha com relação à massa total da mistura asfáltica. A estrada tinha 8m de largura e mais de 1200m de comprimento foram aplicados, sendo que o revestimento tinha 3,5cm de espessura.

As Figuras 40, 41, 42 e 43 mostram vários aspectos dos projetos conduzidos na Holanda com o *PelletPAVE*. Não houve problemas durante o processo de compactação da mistura no campo. Para os projetos realizados na Holanda, como

também ocorreu com outros projetos nos EUA e em outros países, não houve grandes problemas de produção, aplicação e desempenho.

Figura 40 - Aspecto de projeto conduzido com *PelletPAVE* na Holanda



Fonte: Amirkhanian (2018)

Figura 41 - Aspecto de projeto conduzido com *PelletPAVE* na Holanda



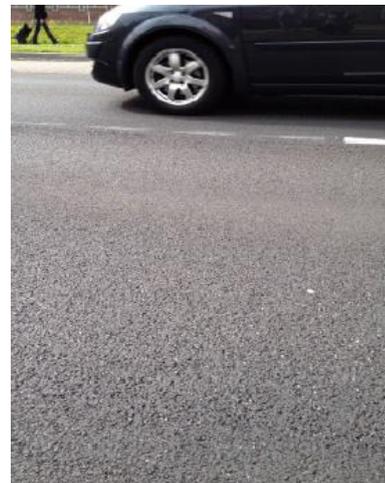
Fonte: Amirkhanian (2018)

Figura 42 - Aspecto de projeto conduzido com *PelletPAVE* na Holanda



Fonte: Amirkhanian (2018)

Figura 43 - Aspecto de projeto conduzido com *PelletPAVE* na Holanda



Fonte: Amirkhanian (2018)

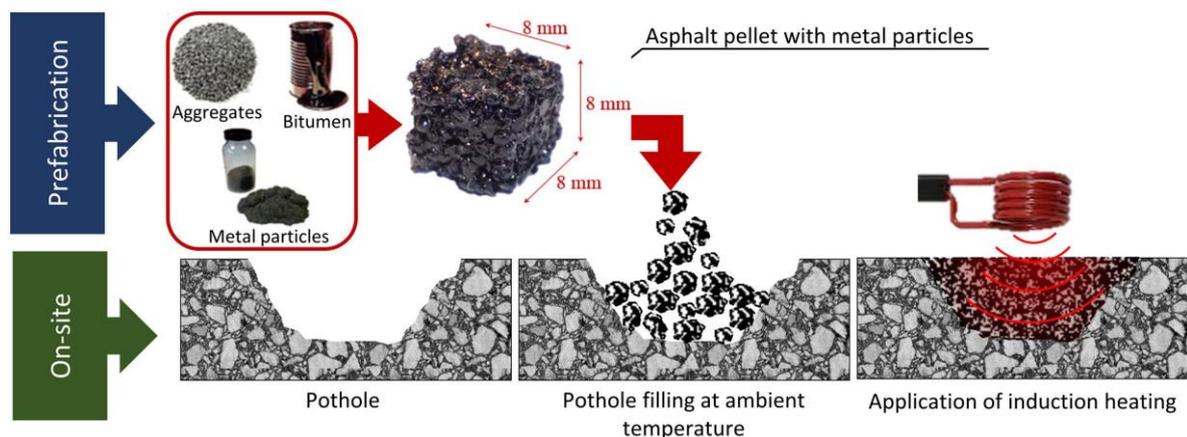
Obaidi *et al.* (2018) utilizaram péletes de asfalto, com energia de indução, para reparar buracos. Foram realizados testes mecânicos (ensaios de resistência a tração, ao cisalhamento e simulador de tráfego) e uma análise comparativa, com relação às misturas asfálticas convencionais. O objetivo do método empregado consistiu em

minimizar o consumo energético e otimizar as condições de trabalho dos operários, uma vez que não são produzidos vapores quando se utilizam os péletes.

No estudo de Obaidi *et al.* (2018) os péletes de asfalto eram compostos por agregados de calcário, ligante asfáltico PEN 40/60 e partículas eletricamente condutoras (grãos de aço). O calcário teve contínua gradação com tamanho máximo de 2 mm, enquanto o grão de aço teve um tamanho uniforme entre 0,425 e 1 mm. Um campo eletromagnético alternado induziu o calor nas partículas eletricamente condutoras, aumentando a temperatura dos péletes por condução. Quando os péletes atingiram uma temperatura de aproximadamente 100°C, a viscosidade do ligante asfáltico diminuiu o suficiente para permitir que as partículas, os agregados e o ligante asfáltico formassem uma massa homogênea. A Figura 44 mostra o esquema do processo para operações de reparos em buracos utilizando os péletes e a indução de calor.

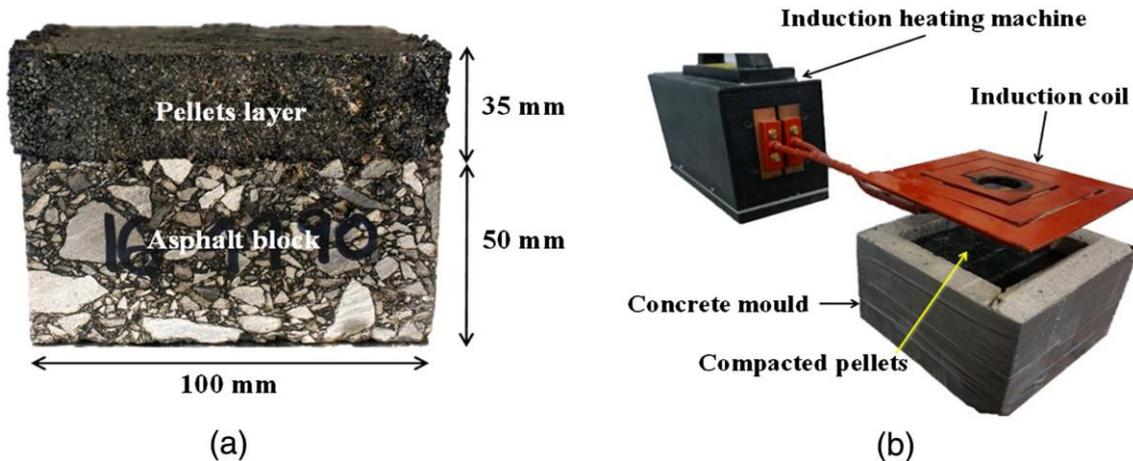
O aquecimento por indução foi aplicado por meio de uma bobina plana de 3 voltas conectada a um gerador de indução de 6 kW (EASYHEAT LI 5060), com frequência de trabalho de 348 kHz. A temperatura da superfície foi registrada usando uma câmera de 320 x 240 pixels, cor completa, infravermelho, termo IMAGER TIM 160 (ver Figura 45).

Figura 44 - Esquema do processo de reparo de buracos com péletes de asfalto e indução de calor



Fonte: Obaidi *et al.* (2018)

Figura 45 - Amostras teste (a) e o equipamento indutor de calor (b)



Fonte: Obaidi *et al.* (2018)

Os resultados de resistência à tração mostraram que há uma correlação direta entre força e conteúdo de aço, sendo 22 (vinte e duas) vezes maior para amostras com 45% (255 kPa) do que para amostras com 5% (9 kPa) de conteúdo de aço.

O estudo de Obaidi *et al.* (2018) concluiu que os péletes de asfalto podem ser fortes concorrentes das técnicas atuais para reparos isolados e pontuais de buracos, mas ainda não podem ser usados como um substituto para grandes operações de manutenção, como reabilitação de pavimentos. O desempenho mecânico do asfalto peletizado poderia ser melhorado aumentando o conteúdo de ligante e aço ou incluindo outros materiais.

Zoorob *et al.* (2018) apresentaram resultados de ensaios laboratoriais realizados com péletes compostos por borracha derivada de pneu descartados (*PelletPave*) e ligante asfáltico de penetração 60/70 do Kuwait. Os péletes de asfalto-borracha foram testados com os conteúdos de 2,5%, 3,0% e 3,5% com relação à massa total da mistura asfáltica. Foram determinados os teores de ligante total de 5,5%, 5,7% e 5,8%, respectivamente, por massa total de mistura asfáltica. Para os testes, os materiais foram misturados utilizando alta agitação a 177°C. O volume de vazios das misturas produzidas foi de 4,48% para todos os teores estudados.

Os dados experimentais forneceram resultados preliminares de laboratório e foram realizados no Instituto Kuwaitiano de Pesquisa Científica em colaboração com Phoenix Indústrias, para avaliar a compatibilidade do pó de borracha de pneus descartados com asfalto padrão kuwaitiano 60/70 e os efeitos do teor de borracha em

propriedades reológicas da mistura de asfalto-borracha resultante. No geral, todas as propriedades volumétricas foram satisfatórias, mas são necessários ensaios mais detalhados para caracterizar o comportamento reológico, incluindo "creep" e fadiga.

Os péletes de asfalto-borracha (*PelletPave*) utilizados no estudo de Al-Baghli (2020) foram testados nas proporções de 2,5%, 3,0% e 3,5% com relação à massa total da mistura asfáltica, considerando os teores de ligante de 5,5%, 5,7% e 5,8%, respectivamente. Foram empregados dois tipos ligantes base: 60/70 *pen graded* Kuwait/ ligante PG 67-22 proveniente da refinaria de Inman/EUA. A incorporação dos péletes (Indústrias Phoenix) aos ligantes asfálticos foi realizada com agitação em alto cisalhamento a 175°C. A melhor performance foi com a taxa 3,0% de pélete, com relação à massa total da mistura asfáltica. Foram apresentados ensaios de DSR, MSCR (40°C até 70°C) para os ligantes modificados por borracha e análise das curvas de densificação de péletes de asfalto-borracha realizadas no compactador giratório no Laboratório do Instituto de Pesquisa Científica do Kuwait.

Ensaio de laboratório empregando simulador de tráfego em misturas dosadas pelo método Marshall mostraram que uma mistura porosa de atrito com 2% péletes das Indústrias Phoenix apresentou boa energia de fratura e excelente capacidade de drenagem em 160 ml/min de intensidade de chuva (Song *et al.*, 2022).

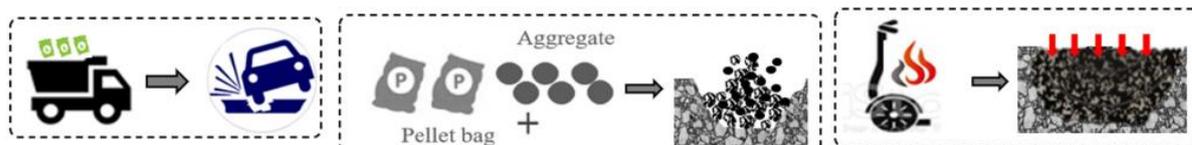
Al-Baghli *et al.* (2022) relataram a construção de trechos experimentais, com diferentes seções para comparar o desempenho das misturas em pavimentos restaurados com tráfego de baixo a médio. Na ocasião, foram elaboradas misturas asfálticas com diferentes porcentagens de *PelletPave* (2,5% - 3,0%), a fim de obter propriedades volumétricas das misturas asfálticas modificadas com péletes de asfalto-borracha. A compactação foi adequada para misturas asfálticas projetadas para tráfego médio a pesado. O esforço da compactação giratória foi pré-definido em  $N_{ini}=8$ ,  $N_{des}=100$  e  $N_{max}=160$  giros. A temperatura da mistura foi especificada em 180°C e a faixa de compactação alvo entre 157°C-158°C. A mistura asfáltica com 2,5% de *PelletPave-Plus* + 4,55% de ligante pen 60/70 satisfaz os requisitos de vazios do Kuwait. Sendo assim, o teor ótimo foi de 7,05% (ligante + pélete).

No estudo de Al-Baghli *et al.* (2022) para a formulação das misturas de asfalto-borracha, o pélete foi pesado previamente e adicionado na forma seca ao agregado (basalto) durante o estágio de aquecimento da mistura seguido da quantidade requerida de ligante asfáltico. O autor relatou que o pélete não se

dispersou de forma adequada e uniforme por toda a massa, mesmo após alta temperatura contínua da mistura.

Lee *et al.* (2023) também estudaram processo executivo semelhante ao relatado por Obaidi *et al.* (2018) para procedimentos de manutenção em pavimentos asfálticos, conforme mostra a Figura 46. As proporções de mistura apropriadas para materiais de pavimentação asfáltica do tipo pélete foram determinadas através da realização de testes de laboratório em misturas com conteúdo de pó de borracha nas proporções de 5%, 10% e 20%. A eficiência da técnica sugerida e combinações foram comparadas usando o teste de estabilidade de Marshall, teste de rastreamento de roda de Hamburgo e testes de módulo dinâmico.

Figura 46 - Esquema do processo de reparo de buracos com péletes de asfalto e indução de calor



Fonte: Lee *et al.* (2023)

De acordo com os resultados da pesquisa de Lee *et al.* (2023), a abordagem do pélete de asfalto-borracha é uma solução viável para a manutenção sustentável de pavimentos, particularmente em pequenas áreas, como buracos.

Zhao *et al.* (2023) prepararam uma espécie de pélete de asfalto-borracha e utilizaram o *PelletPave* das Indústrias Phoenix como grupo de controle. Primeiramente foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para examinar a microestrutura interna dos péletes. A capacidade de armazenamento foi verificada posteriormente. Foram executados ensaios com o viscosímetro rotacional, reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e reômetro de feixe de flexão (BBR). Finalmente, a espectroscopia infravermelha foi usada para explorar o mecanismo de modificação. Concluíram que 50% de borracha triturada, 40% de asfalto e 10% de hidróxido de cálcio são as composições de materiais ideais para a preparação de péletes de asfalto-borracha. Destacam que os péletes de asfalto-borracha produzidos não manifestaram nenhuma interface óbvia entre a borracha e o asfalto no interior, que é diferente da interface nítida entre a borracha e o asfalto no *PelletPave*. A capacidade de armazenamento foi equivalente para ambos os péletes.

Zhao (2023) *et al.* realizaram o aquecimento do ligante asfáltico base (pen 60-80) até o estado fluido e, em seguida, adicionaram uma certa quantidade de péletes de asfalto-borracha (*PelletPave* - Indústrias Phoenix), nas proporções de 20%, 30% e 40% com relação à massa total de ligante. O asfalto modificado foi obtido com um agitador em alta velocidade e cisalhamento, na temperatura em 180°C, durante uma hora. Além disso, relataram que 50g de amostra de asfalto foram despejados em uma placa de aço inoxidável e mantidos a uma temperatura de 163°C por cinco horas a uma velocidade de 5,5 r/min para obter um asfalto envelhecido de curto prazo para testes posteriores.

Na Tabela 08 consta uma síntese das análises descritas neste item indicando os tipos de péletes utilizados nas referências citadas, a proporção de cada um com relação à massa total da mistura asfáltica, a faixa granulométrica, os ensaios realizados e os principais resultados. Percebe-se que a investigação sobre o desempenho do asfalto utilizando *PelletPAVE* ainda não é abrangente e a análise do mecanismo não está clara.

Tabela 08 - Síntese dos estudos desenvolvidos utilizando péletes de asfalto-borracha

Autor/Ano	Ligante Asfáltico convencional	Tipos de "Pellets" utilizados	Faixa granulométrica	Local	Ensaio realizados	Proporção de "Pellets" com relação à massa total da mistura asfáltica	Teor de Ligante (%)	Tipo de processo	Resultados
Zhao et al (2023)	60/80 pen	<i>PelletPave</i> e duas configurações de péletes com borracha	-	Wuhan University of Technology, Wuhan, China	Viscosímetro rotacional, DSR, BBR, estocagem e MEV	2,0%, 3,0% e 4,0%	-	-	Os péletes podem efetivamente elevar o desempenho do asfalto, notadamente pela resistência à fadiga
Lee et al (2023)	AP-05	-	-	Laboratório/ Campo - Instituto de Tecnologia de Seul (Coreia do Sul)	Estabilidade Marshal, Hamburgo e Módulo dinâmico (laboratório)/ FWD (campo)	-	-	Processo via seca	O pélete configurou-se como solução viável para a manutenção sustentável de pavimentos
Song et al (2022)	60/80 pen	Pellets de asfalto-borracha (American Phoenix Corporation)	Graduação aberta	Laboratório - Universidade de Tecnologia de Wuhan (China)	Propriedades reológicas (DSR), resistência à fadiga, deformação permanente (Hamburgo teste), coeficiente de permeabilidade, estrutura molecular (FTIR, FM)	2,0%	-	Processo úmido	Boa energia de fratura e excelente capacidade de drenagem em 160 ml/min de intensidade de chuva
Al-Baghli (2022)	60/70 pen Q8	<i>PelletPAVE-Plus</i>	Graduação densa	Laboratório - KISR	Propriedades volumétricas e teste de TSR - <i>Tensile Strength Ratio</i>	2,5% e 3,0%	7,05%	Processo seco	Preencheu os requerimentos com relação ao volume de vazios
Al-Baghli (2020)	60/70 pen graded Kuwait/ Ligante PG 67-22 proveniente da refinaria de Inman/EUA	<i>PelletPAVE</i>	Graduação densa	Laboratório - Instituto de pesquisa científica do Kuwait	DSR, MSCR (40°C até 70°C) de asfaltos-borracha convencionais e análise das curvas de densificação de misturas com "pellets" no compactador giratório	2,5% , 3,0% e 3,5%	5,5%, 5,7%, e 5,8%	Processo úmido	Melhor performance foi com a taxa 3,0% de pélete com relação à massa total da mistura asfáltica
Amirkhanian (2018)	África do Sul: 50/70/ Kuwait: 60/70 pen graded/ Países baixos: não consta	<i>PelletPAVE</i>	Graduação descontínua do tipo <i>Gap-Graded</i>	África do Sul, Kuwait e Países baixos	África do Sul: MR, Fadiga em viga de 4 pontos, ITS, " <i>creep</i> " / Kuwait: Viscosidade, penetração e parâmetros volumétricos das misturas/ Países baixos: não constam	África do Sul: 2,8% / Kuwait: 2,0%, 2,5% e 3,5% / Países baixos: 2,5%	África do Sul: 7,0% / Kuwait: 5,5%, 5,7% e 5,8% / Países baixos: 5,5%	Processo úmido	Para os projetos realizados não houve grandes problemas de produção, aplicação e desempenho da mistura asfáltica
Zoorob et al (2018)	60/70 pen graded Kuwait	<i>PelletPAVE</i>	Graduação densa	Laboratório - Instituto de pesquisa científica do Kuwait	DSR , G'/sin e MSCR (40°C até 70°C) de ligantes modificados com 15% e 18% de borracha. Parâmetros volumétricos de misturas asfálticas com <i>péletes</i>	2,5%, 3,0% e 3,5%	5,5%, 5,7% e 5,8%	Processo úmido	Ensaio mais detalhados são necessários para caracterizar o comportamento reológico, incluindo " <i>creep</i> " e fadiga
Obaidi et al (2018)	ligante asfáltico PEN 40/60	<i>Pellet</i>	Graduação densa	Nottingham Transportation Engineering Centre, Univ. of Nottingham	Propriedades volumétricas das misturas asfálticas, ensaios de resistência à tração, ao cisalhamento e simulação de cargas de tráfego	-	-	Processo via seca	Os péletes de asfalto podem ser fortes concorrentes das técnicas atuais para reparos pontuais de buracos
Nunes (2017)	CAP 50/70	<i>PelletPAVE</i>	Graduação descontínua do tipo <i>Gap-Graded</i>	Laboratório da Universidade de Brasília - Unb	Caracterização reológica e fadiga dos ligantes no DSR e ensaio de viga à flexão em 4 pontos para fadiga de misturas asfálticas	2,6%	8,8%	Processo úmido	Os péletes aumentaram a vida de fadiga de misturas asfálticas com granulometria descontínua
Amirkhanian (2015)	60/70 pen graded Kuwait	<i>PelletPAVE-Plus</i>	-	Laboratório - Universidade de Tecnologia de Wuhan (China)/ Campo - 120m executados utilizando <i>PelletPAVE-Plus</i>	Dutibilidade, ponto de amolecimento, penetração, DSR, MSCR para caracterização dos ligantes asfálticos e ensaio de viga à flexão em 4 pontos para fadiga de misturas asfálticas	-	-	Processo úmido	Bons resultados de performance um ano após a selagem das trincas
Amirkhanian et al (2015)	PG 64-22	<i>PelletPAVE-Plus</i>	Graduação do tipo <i>Open-Graded</i>	Laboratório - Universidade do Alabama e Universidade de Tongji	Propriedades volumétricas das misturas asfálticas, ensaios de resistência à tração, ao cisalhamento e simulação de cargas de tráfego	1,25%	5,2%	Processo úmido	Comportamento do ligante modificado compatível com o SBS

## 2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS CONSTITUÍDAS POR BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS

As misturas asfálticas são constituídas por agregados minerais e ligantes asfálticos com graduações e características próprias que, de forma adequadamente dosada e processada, asseguram os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (Ceratti *et al.*, 2015).

A execução de misturas asfálticas modificadas com borracha de pneus inservíveis visa obter uma camada de revestimento com alta resistência à deformação permanente e melhoria das condições de aderência em pista molhada.

ARPG (1989) *apud* Sousa *et al.* (2006) afirmou que uma vez que o asfalto-borracha possui valores de viscosidade elevada quando comparado a um asfalto convencional, esse apresenta melhor desempenho quando incorporado a uma mistura de granulometria graúda, com maiores valores de vazios do agregado mineral - VAM.

De acordo com Ceratti *et al.* (2015) as misturas asfálticas descontínuas densas (*gap-graded*) são assim denominadas, pois apresentam-se com graduação em intervalo. A curva granulométrica é predominantemente constituída de agregados graúdos, com algumas frações intermediárias e pouca presença de material fino. Este arranjo de partículas confere robustez na composição da mistura asfáltica, apresentando um bom desempenho estrutural. Informam que nas misturas asfálticas descontínuas densas (*gap graded*), o ligante asfáltico utilizado é modificado por borracha moída de pneu ou por polímeros elastoméricos.

Conforme estudado por Pais *et al.* (2015) a curva granulométrica do tipo *Gap-Graded*, destina-se a permitir o contato pedra sobre pedra, contribuindo para resistência à deformação permanente. Verificaram que uma quantidade maior de ligante é necessária para contribuir com a resistência à fadiga. Nos casos em que se utiliza asfalto borracha, o espaçamento entre os grãos ajuda a acomodar as partículas maiores de borracha presentes no ligante asfáltico modificado por borracha

Apesar dos ligantes modificados com borracha otimizarem o desempenho das misturas asfálticas em geral, observou-se que granulometrias descontínuas do tipo densa e aberta são mais adequadas para produzi-las, melhorando significativamente

suas características de desempenho em comparação com misturas de granulometria contínua densa (Kaloush, 2014; Way *et al.*, 2012b).

Bernucci *et al.* (2022) comentaram que as misturas asfálticas do tipo *gap-graded*, (mistura descontínua) são amplamente utilizadas na Califórnia em serviços de pavimentação com asfalto-borracha. Informaram que, no Brasil, a tecnologia do asfalto-borracha já foi empregada pelas concessionárias, destacando a Ecovias dos Imigrantes, com extensa e bem sucedida obra no sistema Anchieta/ Imigrantes.

Ressalta-se que, conforme disposto em Dapper (2020), apesar de ser considerado como sendo um asfalto ambientalmente amigável (no caso do reaproveitamento adequado dos pneus inservíveis), existem algumas vulnerabilidades que merecem ser comentadas. As elevadas temperaturas de usinagem das misturas asfálticas com uso de borracha, necessárias à homogeneização da borracha, podem prejudicar a atmosfera devido ao aumento da poluição por meio da emissão de gases do efeito estufa. Outro ponto de destaque está relacionado a possíveis maiores distâncias de transportes devido à pouca oferta atual de ligante desse tipo.

Yu *et al.* (2020) relataram que o asfalto modificado com borracha de pneu é reconhecido como uma técnica adequada por aumentar a durabilidade, reduzir o ruído e consumir os pneus descartados. Porém, muitos criticam este emprego alegando altas emissões durante a construção do pavimento com asfalto-borracha. A técnica de mistura morna pode reduzir as temperaturas de mistura e aplicação para valores próximos aos valores utilizados nas misturas convencionais. A técnica de asfalto-borracha morno é promissora. Muitos estudos mostram que a técnica de mistura morna pode ser aplicada reduzindo as emissões. Estes autores analisaram 165 publicações considerando vários aspectos: propriedades reológicas, projeto da mistura, desempenho mecânico, aplicação no campo, emissões na construção e aditivos. Apresentaram estudos com vários aditivos de mistura morna e concluíram que a técnica de mistura morna pode ser utilizada nas misturas com asfalto-borracha. O projeto da mistura e a produção na usina precisam de poucas adaptações e a compactação no campo é semelhante nos dois casos.

## 2.5 PRÁTICAS NACIONAIS

No período compreendido entre os anos de 2013 e 2016 foram encontrados registros de aplicação dos péletes de asfalto-borracha no Brasil em operações de conservação, conforme exposto nos itens a seguir.

### 2.5.1 Concessionária Nova Dutra BR-116 – Trecho de São Paulo

Na Rodovia Presidente Dutra (BR-116), que liga São Paulo/SP ao Rio de Janeiro/RJ, com incidência de alto volume de tráfego, dois tipos de péletes de asfalto-borracha (“*PelletPav*” e *PelletPAVE-Plus*”) das Indústrias Phoenix foram utilizados em operações de conservação.

Entre os km 138+240 e o km 226+230 foram realizados reparos localizados compostos por material fresado + péletes. Adiante constam exemplos dos tipos de intervenções realizadas e as suas condições após alguns dias de tráfego pesado.

No geral, de acordo com o relatório da Concessionária CCR Nova Dutra (2013), os reparos ainda apresentavam boas condições após certo tempo de serviço, variável como indicado nas figuras adiante. As Figuras 47, 48, 49 e 50 mostram as condições do pavimento antes do recapeamento, como também, as condições após dias de tráfego pesado. Não há relatos de usos posteriores.

Figura 47 - Vista da condição do pavimento antes do recapeamento no km 175+490



Fonte: CCR Nova Dutra (2013)

Figura 48 - Vista da condição do remendo do pavimento após 30 dias de tráfego pesado no km 175+490



Fonte: CCR Nova Dutra (2013)

Figura 49 - Vista da condição do pavimento antes do recapeamento no km 182+960



Fonte: CCR Nova Dutra (2013)

Figura 50 - Vista da condição do pavimento no km 182+960 após 25 dias de recapeado



Fonte: CCR Nova Dutra (2013)

### 2.5.2 Rodovia dos Bandeirantes/ BR-381

Em 2013 também foram registradas aplicações de “*PelletPAVE*” para fins de manutenção na Rodovia dos Bandeirantes, SP-381 (Sockwell, 2013), ligação entre o estado de São Paulo/SP e Minas Gerais/MG. A massa asfáltica foi fabricada com 15% de “*PelletPAVE*”, a curva granulométrica utilizada para as misturas foi do tipo “*Gap-Graded*” e, na ocasião, 6,3% de ligante foi considerado o teor de projeto. Também não existem dados de usos posteriores.

### 2.5.3 Concessionária Arteris BR-381 – Trecho de São Paulo

Entre os anos de 2013 e 2016 constam registros de operações de conservação realizados pela Concessionária Arteris, aplicando os *péletes* de asfalto-borracha (Indústrias Phoenix) com material fresado em usina móvel para a execução de misturas asfálticas (Arteris, 2016). Os *péletes* utilizados foram do tipo *PelletPave*, cujas composições estão descritas a seguir:

*PelletPAV:*

- Cimento asfáltico (50-70);
- Pó de borracha moída (30%);
- Cal hidratada CH-I;

*PelletPave-Plus:*

- Cimento asfáltico (50-70);

- Pó de borracha moída (35%);
- Cal hidratada CH-I.

Foram realizados vários reparos localizados com o caminhão usina utilizando a mistura asfáltica composta por *PelletPAV* (3%) + material fresado (97%). O *PelletPave-Plus* também foi utilizado, porém como modificador do ligante CAP 50/70 na taxa de 25% da massa total do ligante asfáltico.

Os péletes do tipo *PelletPAVE-Plus* também foram utilizados com material fresado, para fins de manutenção do pavimento e, conforme pode ser observado nas Figuras 51 até 60 (km 88+0,50, km 88 + 200, km 88 + 840, km 14+310) após 180 dias os reparos apresentavam excelentes condições, de acordo com o Relatório Fotográfico da Concessionária Arteris (2016). Cabe mencionar que também há registros de trechos executados pela Concessionária Arteris – Trecho Planalto Sul da BR-381/SP e em Foz do Iguaçu – Usina Itaipu.

Figura 51 - Vista da condição do pavimento no km 88+200 antes do recapeamento



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 52 - Vista da condição do pavimento no km 88+200 durante o recapeamento (aplicação de massa asfáltica com balde)



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 53 - Vista da condição do pavimento no km 88+200 180 dias após o remendo



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 54 - Vista da condição do pavimento no km 88+200 180 dias após o remendo



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 55 - Vista da condição do pavimento no km 88+0,50 durante os remendos



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 56 - Vista da condição do remendo no km 88+0,50 após passagem de veículo



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 57 - Vista da condição do remendo no km 88+0,50 após 180 dias de tráfego pesado



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 58 - Vista da condição do pavimento no km 88+0,50 após 180 dias do remendo



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 59 - Vista da condição do pavimento no km 14+310 antes do remendo, após fresagem e pintura de ligação



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

Figura 60 - Vista da condição do pavimento no km 14+310 120 dias após o remendo



Fonte: Concessionária Arteris (2016)

## 2.6 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DE BAIXO CARBONO

O aquecimento global tornou-se uma questão ambiental significativa devido ao seu impacto negativo no planeta, e é causado principalmente por gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono e metano. Para resolver esta questão, a maioria dos países concordou em reduzir a sua produção de gases com efeito de estufa e estabeleceu metas para emissões líquidas zero até 2050 (Net zero).

Para alcançar o Net zero até 2050 é necessário reduzir os efeitos dos gases do efeito estufa (GEE) por meio do uso de energias verdes (painéis solares, energia eólica, plantação de florestas, desenvolvimento de tecnologias que absorvam o gás carbônico etc.). Sendo assim, o Net zero configura-se como o balanceamento da produção de gases de efeito estufa (GEE reduzida) com as alternativas de remoção do gás carbônico da atmosfera (Leite *et al.*, 2023).

De acordo com Leite *et al.* (2023), em 2015, em função dos países desenvolvidos terem entrado no Acordo de Paris, cada uma das grandes organizações relacionadas à pavimentos asfálticos (NAPA, EAPA, dentre outras) elaboraram as suas próprias recomendações (emprego de material reciclado, uso de bioligantes, fixação do teor mínimo de fresado na mistura asfáltica, reciclagem de materiais não asfálticos, execução de misturas mornas, controle de emissão de fumos etc).

### 2.6.1 Sustentabilidade na pavimentação

Para reduzir a emissão de gases do efeito estufa é preciso que haja uma gestão sustentável do ciclo de vida. Os gases de efeito estufa podem ser liberados em diferentes fases da construção de estradas, incluindo a produção de materiais, como ligantes e agregados, bem como o transporte, produção, restauração e demolição.

As práticas sustentáveis de pavimentação asfáltica são importantes pelos seguintes motivos (YARO *et al.*, 2023):

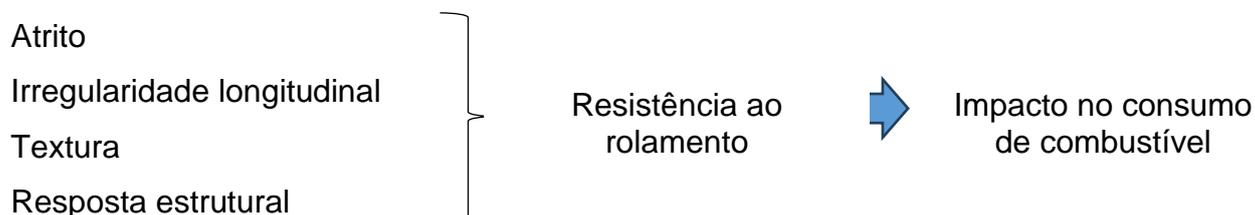
**Proteção ambiental:** O uso de materiais e tecnologias de resíduos reciclados em pavimentos asfálticos pode minimizar significativamente os efeitos ambientais negativos da construção e manutenção de estradas, como emissões de gases de efeito estufa e esgotamento de recursos baseados em combustíveis fósseis. Também se incentiva a gestão de resíduos e redução da necessidade de lixões;

**Custo-benefício:** Práticas sustentáveis de pavimento asfáltico podem economizar dinheiro a longo prazo, diminuindo a necessidade de reparos e substituições dispendiosas ao longo da vida útil do pavimento. A utilização de materiais reciclados em pavimentos asfálticos, por exemplo, minimiza a quantidade de materiais virgens, o que pode refletir nos custos de produção;

**Responsabilidade social:** Práticas sustentáveis de pavimento asfáltico podem promover a responsabilidade social, minimizando as consequências prejudiciais da construção de estradas;

**Melhoria de desempenho:** Práticas sustentáveis de pavimento asfáltico podem aumentar a durabilidade e o desempenho, o que diminui a necessidade de manutenção e reparo.

Adiante segue um exemplo do efeito das características e das condições da rodovia na performance dos veículos e das operações:



De acordo com AMOS (2006) rodovias com bom conforto de rolamento reduzem de 2,5% a 4,5% do consumo de combustível.

### **2.6.2 Detecção de Gases de Efeito Estufa (GEE)**

As emissões visíveis de fumos de asfalto normalmente começam a se desenvolver nas temperaturas em torno de 150°C e a quantidade de fumos gerados pelo asfalto quando aquecido dobra a cada 12°C de aumento na temperatura (SHELL, 2015). Os fumos são compostos basicamente de hidrocarbonetos e apresentam gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) em sua composição química. A exposição humana ao sulfeto de hidrogênio pode levar uma pessoa à morte, caso a sua concentração no ar seja superior a 500 ppm (SHELL, 2015).

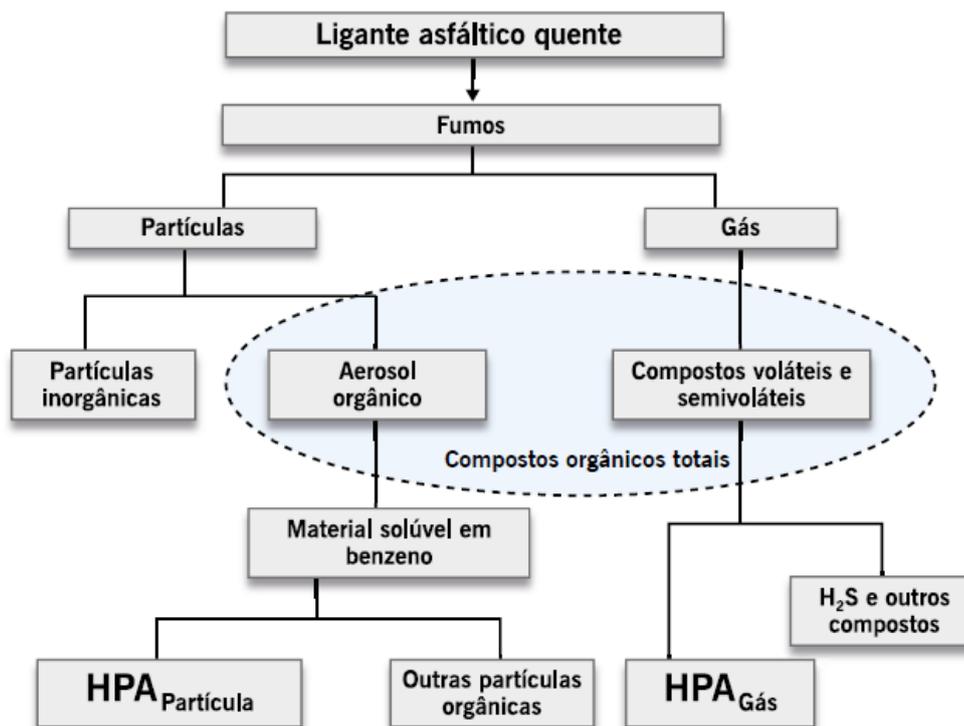
Fernandes *et al.* (2009), analisando um ligante asfáltico brasileiro, por dispersão de matriz em fase sólida (DMFS) e cromatografia gasosa (GC), encontraram 16 HPA's prioritários, alguns com potencial toxicológico alto.

Nascimento *et al.* (2015a), estudaram a emissão de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) de diferentes asfaltos comercializados no Brasil. Nascimento *et al.* (2015b) desenvolveram um método utilizando cromatografia e espectrometria de massa para a determinação de frações de HPA's. Foram encontrados 14 tipos de HPA's com elevado potencial cancerígeno e mutagênico. Adicionalmente, foi possível verificar a existência de diferenças entre as emissões de cada tipo de HPA's dependendo do tipo de asfalto e das temperaturas a que foram submetidos (POSSEBON *et al.*, 2018).

Segundo Carginin (2022) entre as substâncias geradas pelo aquecimento de produtos asfálticos, uma parte é constituída por Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA's) e seus derivados sulfurados (SHPA's), oxigenados (OHPA's) e nitrogenados (NHPA's) presentes em fumos de asfalto. Relatou que os compostos orgânicos voláteis (COVs) da composição do asfalto são emitidos na fase gasosa (fumos de asfalto), expondo os trabalhadores ao risco ocupacional, sendo esta uma das principais fontes agravantes e prejudiciais à saúde dos trabalhadores. A emissão é altamente dependente da temperatura de aquecimento do asfalto. Um aumento da temperatura de aplicação do asfalto acarreta maior concentração de compostos emitidos.

A Figura 61 apresenta a composição dos fumos de cimentos asfálticos quando aquecidos, Ferraz (2015).

Figura 61 - Composição dos fumos dos cimentos asfálticos quando aquecidos



Fonte: Ferraz (2015)

Na pesquisa de Ferraz (2015) foi utilizado o DEC (Dispositivo de Extração e Coleta) desenvolvido em sua tese de doutorado realizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), conforme mostra a Figura 62. O DEC tem capacidade para gerar e recolher fumos produzidos pelo aquecimento de amostras de ligante asfáltico. Este dispositivo é adequado para uso em bancada de laboratório e a geração de fumaça ocorre através do aquecimento do ligante, em sistema fechado, com temperatura controlada em atmosfera não oxidante utilizando argônio aquecido como gás de arraste.

Figura 62 - Vista do dispositivo de extração e coleta completo em funcionamento



Fonte: Ferraz (2015)

Ferraz (2015) realizou a extração de fumos a partir de pequenas massas de ligante. De acordo com o autor, o DEC pode ser operado em uma ampla faixa de temperaturas, cobrindo todas as temperaturas usuais de aplicação de asfalto sem perda significativa de analitos e sem risco de ignição sob esta atmosfera inerte. O ambiente que envolve o ligante consiste em gás argônio, que é aquecido à mesma temperatura do ligante, evitando que a massa esfrie (passado ao longo do bloco de aquecimento de alumínio através das bobinas de cobre). Há um termômetro anexado para medir a temperatura do ligante enquanto aquecido.

Conforme já citado, quando o ligante asfáltico é aquecido, ele libera vapores que contêm HPA's. Esses vapores são captados por um sistema de armadilha de vidro contendo um solvente (acetonitrila), que adsorve os vapores. Este material adsorvido é tratado para se tornar o mais translúcido possível e com o menor número de espécies de HPA's que não são necessárias detectar (FERRAZ, 2015). Cabe enfatizar que os fumos produzidos em altas temperaturas possuem maior capacidade para liberar HPA's do que os gerados em baixas temperaturas.

O DEC pode operar com diferentes solventes em contato com a massa betuminosa e sem a presença desses solventes, por aquecimento direto da amostra. Permite a coleta dos fumos diretamente na fase líquida (soluções absorventes) ou na fase sólida (soluções sólidas adsorventes), conforme consta em Paniz *et al.* (2018).

De acordo com Paniz *et al.* (2018) para a remoção de HPA's do ligante, é necessário aquecimento. Quando aquecido a altas temperaturas, acima das temperaturas de ponto de fulgor, o material pode pegar fogo e o experimento se tornar inseguro. Para evitar esse problema, o equipamento deve operar em temperaturas abaixo da temperatura do ponto de fulgor da amostra e envolver o material sendo mantido sob atmosfera inerte (sem oxigênio). Além disso, para captar os fumos, o sistema deve ser hermético para evitar a dissipação dos HPA's.

Zanetti *et al.* (2016) avaliaram as condições dos trabalhadores da construção a um aumento do risco associado à exposição ao fumo dos materiais betuminosos que contêm borracha de pneu. Estabeleceram um novo procedimento de ensaio laboratorial para a avaliação da composição e dos potenciais efeitos perigosos das emissões gasosas liberadas durante as operações de pavimentação com asfalto-borracha. Em termos gerais concluiu-se que o procedimento proposto pode ser extremamente valioso para a avaliação do verdadeiro potencial de emissão de misturas asfálticas contendo borracha de pneu e que, no futuro, deva ser empregado como ferramenta de avaliação durante as fases de projeto de mistura e monitoramento no campo.

### **2.6.3 Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – HPA's**

As espécies presentes nos fumos de asfalto que contêm apenas carbono e hidrogênio, são denominados como HPA's (WILSON *et al.*, 2016). Os HPA's pertencem a uma classe de compostos químicos complexos compostos cuja estrutura está na forma de anéis de benzeno ligados, e são amplamente distribuídos na atmosfera. Os HPA's têm recebido maior atenção devido aos possíveis danos a longo prazo causados por agravos crônicos à saúde humana.

Segundo Ferraz (2015) os HPA's podem existir em mais de cem combinações, porém os países adotam diferentes listas de HPA's prioritários que podem ser um grupo entre 16 e 28 compostos diferentes. A Tabela 09 mostra a classificação dos 16 HPA's prioritários quanto à sua carcinogenicidade segundo a IARC - Agência Internacional de Pesquisas sobre o Câncer - (2013).

Tabela 09 - Classificação dos 16 HPA's prioritários quanto à sua carcinogenicidade segundo a IARC\*

HPA	CLASSIFICAÇÃO *
Naftaleno	2B
Acenaftileno	3
Acenafteno	3
Fluoreno	3
Antraceno	3
Fenantreno	3
Fluoranteno	3
Pireno	3
Benzo (a) antraceno	2B
Criseno	2B
Benzo (b) fluoranteno	2B
Benzo (k) fluoranteno	2B
Benzo (a) pireno	1
Dibenzo (a,h) antraceno	2A
Ideno (1,2,3 cd) pireno	2B
Benzo (ghi) perileno	3

\**International Agency for Research on Cancer*, (1): Carcinogênico para humanos (2A): Provável carcinogênico para humanos – limitada evidência em humanos e suficiente em animais; (2B): Possível carcinogênico para humanos – limitada evidência em humanos e insuficiente em animais; (3): não é classificado como carcinogênico para humanos.

Fonte: Adaptação de IARC (2013)

Segundo Bernucci *et al.* (2022), o benzo(a)pireno é um dos HPA's que se destaca na toxicologia humana. As vias de penetração do benzopireno no organismo são duas: por inalação e pela epiderme. Quando os trabalhadores estão aplicando o asfalto quente, não apenas inalam esse agente químico, mas também são atingidos na pele do corpo. O benzo(a)pireno é um agente químico que tem potencial para desenvolver o câncer de pele.

### 2.6.3.1 Técnicas de análise para determinação de HPA'S

A cromatografia é um método utilizado para a separação, identificação e quantificação dos compostos químicos em misturas complexas (SKOOG *et al.*, 2015). A técnica cromatográfica baseia-se em um processo físico-químico de separação.

De acordo com Collins *et al.*, 2006, os componentes da mistura são distribuídos por duas fases: a fase estacionária (fixa) e a fase móvel (líquido ou gás), de tal forma que estes componentes são seletivamente retidos pela fase estacionária, o que resulta em migrações em tempos diferentes desses componentes, sendo possível sua identificação e quantificação.

Ferraz (2015) utilizou detectores espectrométricos de massa acoplados à cromatografia líquida como técnica de quantificação dos HPA's. Nesse método as espécies são separadas no processo cromatográfico e identificadas com segurança pelo espectrômetro de massas, conferindo confiabilidade aos resultados mesmo nos trabalhos com matrizes complexas, como é o caso da extração de fumos no DEC a partir do ligante asfáltico.

Segundo Cargin (2022), a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) permite o uso de colunas de fase normal ou reversa, eluição isocrática ou gradiente de solventes, assim como pode ser acoplada a vários sistemas de detecção. Entre os detectores já utilizados para determinação de compostos em amostras petroquímicas, incluem-se: detectores espectroscópicos como fluorescência, volta-métrico ou ampero-métrico, arranjo de diodos (DAD), assim como por infravermelho (IR), Índice de refração (RI), evaporativo com espalhamento de luz (ELSD), constante dielétrica (DCD) e ionização de chama (FID).

## 2.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados os pontos elencados adiante.

- Destinação final dos pneus inservíveis em território nacional;
- Necessidade do conhecimento acerca dos componentes dos pneus e os efeitos deles após a inclusão no ligante asfáltico;
- Exigências requeridas pelas normas nacionais e norte americana para caracterizar os asfaltos-borracha, outrossim, a proposta de especificação sul

africana de desempenho e a norma espanhola para os asfalto-borracha híbridos;

- Métodos de obtenção de pó de pneus, destacando a diferença entre a moagem ambiente e moagem criogênica;
- Meios de incorporação da borracha de pneus às misturas asfálticas: processo seco e processo úmido. Destaca-se que, no Brasil, o habitual é o uso do asfalto-borracha estocável produzido via úmida nas distribuidoras (*terminal blend*);
- Foram mostradas as variáveis envolvidas no processo para a fabricação do ligante asfalto-borracha via úmida: temperatura, tempo, tipo de ligante, teor de ligante, tipo de borracha, teor de borracha e tamanho das partículas da borracha;
- Vantagens e desvantagens do emprego do asfalto-borracha;
- Ensaio mais modernos, especialmente os reológicos, se correlacionam melhor com o desempenho no campo, e passaram a ser usados para qualificar os ligantes e especificar classes para pavimentação;
- Os ensaios de MSCR e LAS, complementares para previsão do dano à deformação permanente e à fadiga, respectivamente;
- As novas perspectivas de utilização do asfalto-borracha em âmbito internacional. Uma tendência atual é o uso conjunto de asfalto-borracha e polímero, o que tem sido denominado de material híbrido;
- Os péletes de asfalto-borracha, os tipos, as patentes existentes, as técnicas de pelotização e modelo de usina de fabricação dos péletes;
- Os estudos já realizados utilizando os péletes de asfalto-borracha em nível mundial. Foram mostrados esquemas de indução com calor para manutenção de vias e resultados de ensaios laboratoriais realizados com os péletes;
- Registros de práticas de operações utilizando os péletes de asfalto-borracha pelas Concessionárias Arteris e CCR entre os anos de 2013 e 2016 no Brasil;
- Sustentabilidade da pavimentação mostrando a necessidade de contribuir com o planeta minimizando a emissão de gases de efeito estufa por meio de uma gestão adequada do ciclo de vida dos pavimentos;
- Dispositivo de extração e coleta de fumos e as técnicas utilizadas para a identificação dos HPA's nocivos à saúde humana e ao meio ambiente.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata dos métodos utilizados nesta pesquisa e da definição dos materiais utilizados para atingir os objetivos propostos.

O foco principal do planejamento do experimento foram os ensaios para caracterização reológica dos péletes de asfalto-borracha selecionados para a presente pesquisa, tendo como base os ensaios requeridos pela ASTM 6114/2019 e pela especificação *Superpave*. Destaca-se também a análise sobre o potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE), a partir do Dispositivo Extrator Coletor de Fumos – DEC, Ferraz (2015). Como contraponto, os mesmos ensaios foram realizados em uma amostra de CAP 50/70 e uma de asfalto-borracha (AB-08), produzido por uma empresa nacional que já comercializa o produto no país (Stratura Asfaltos).

A especificação *Superpave* ASTM 8239/21 fundamenta-se em propriedades reológicas, condições climáticas e volume de tráfego para selecionar o ligante asfáltico. Baseia-se em ensaios que simulam diferentes estágios de envelhecimento do ligante: curto prazo relacionado à usinagem e aplicação da mistura asfáltica (estufa de película delgada rotacional, RTFOT) e longo prazo relativo à vida em serviço (vaso de pressão PAV).

Os ensaios de determinação do grau de desempenho a temperaturas alta, intermediária e baixa, nesta especificação americana, realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) asseguram a resistência à deformação permanente e à fadiga e no reômetro de fluência em viga (BBR) referem-se às trincas térmicas. Tem ainda o ensaio de viscosidade rotacional (ASTM D 4402), associado às temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica. Por fim, o ensaio de determinação da resistência à deformação permanente (MSCR - *Multiple Stress Creep and Recovery*, AASHTO M332-21, ASTM 7405-20, DNIT 423/2020 ME).

A especificação ASTM 8239/21 ainda não contempla o ensaio de resistência à fadiga por varredura linear de amplitude (LAS – *Linear Amplitude Sweep*), Norma DNIT 429/2022. Porém, este ensaio tem sido empregado no Brasil desde 2014 (Martins, 2014; Nascimento, 2015; Specht *et al.*, 2019). A Petrobras tem um banco de dados de LAS mostrando correlação do ensaio no ligante com o desempenho de misturas asfálticas no ensaio de tração direta e com a área trincada de campo. O DNIT

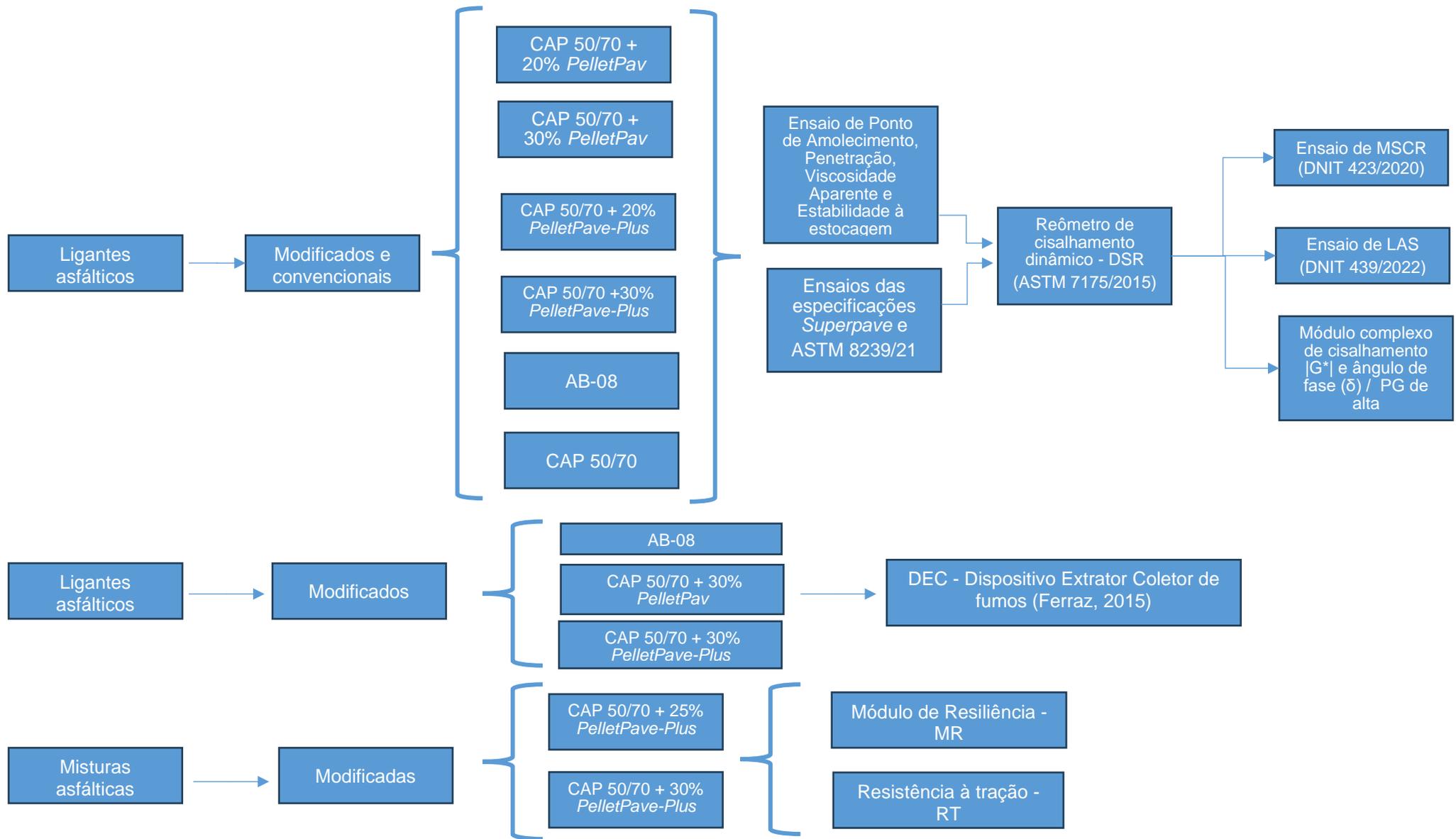
publicou a norma DNIT 439/2022 – ME, adaptada da AASHTO T 391-20 quanto ao critério de definição do tempo em que ocorre o dano. Na versão brasileira o dano ocorre quando se tem o máximo da pseudo-energia conforme proposto por Chen *et al.*, (2021).

Em um segundo momento foram verificados os parâmetros de dosagem das misturas asfálticas e executados os ensaios de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR), a fim de estimar o comportamento mecânico das misturas asfálticas preparadas com os materiais asfálticos avaliados.

A última etapa englobou a análise e discussão dos resultados e será apresentada no Capítulo 5.

A Figura 63 mostra o fluxograma desta pesquisa.

Figura 63 – Fluxograma geral dos ensaios que embasaram a presente pesquisa



Neste estudo, os ligantes modificados foram ensaiados na condição virgem e envelhecida a curto prazo no RTFOT (NBR 15235/2009), em duplicata, medindo os seguintes parâmetros:

- a)  $|G^*|/\sin \delta$  antes do RTFOT a 58, 64, 70, 76 e 82°C;
- b)  $|G^*|/\sin \delta$  após RTFOT a 58, 64, 70, 76 e 82°C;
- c) Jnr após RTFOT a 70°C;
- d) LAS após RTFOT a 19°C
- e) Ponto de amolecimento (PA);
- f) Penetração a 25°C, 100g, 5s;
- g) Viscosidade aparente a 177°C;
- h) Estabilidade à estocagem;
- i) Dispositivo extrator coletor de fumos – DEC.

Para as misturas asfálticas foram realizados os ensaios de resistência à tração - RT e módulo de resiliência - MR.

### 3.1 AGREGADOS

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram procedentes da pedra Sepetiba, localizada na região metropolitana do Rio de Janeiro/RJ, e estão disponíveis no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia a maioria das propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc. (Bernucci *et al.*, 2022).

Para esta pesquisa foi utilizada, inicialmente, a caracterização física dos agregados minerais definidos por Nascimento *et al.* (2009), também vistas em Fritzen (2016). Os ensaios constam da Tabela 12 a seguir. Estes resultados ainda podem ser considerados válidos tendo em vista que os agregados estão estocados no Laboratório de Pavimentos da COPPE desde 2009.

Segundo a Norma DNIT 112/09 – ES, os agregados graúdos devem apresentar desgaste Los Angeles  $\leq 50\%$ , índice de forma  $> 0,5$  e durabilidade  $< 12\%$ . Os agregados miúdos devem apresentar equivalente de areia  $\geq 55\%$ . Os valores

mostrados na Tabela 10 se enquadram nos limites requeridos pela norma retromencionada.

Tabela 10 - Propriedades físicas dos agregados minerais da pedreira Sepetiba que serão usados nesta pesquisa

Propriedades	Resultados	LIMITES – DNIT 112/09 - ES
	Sepetiba	
Partículas chatas e alongadas	1%	-
Perda por abrasão Los Angeles	43,3%	≤50%
Massa específica real dos agregados graúdos	2,792	-
Massa específica aparente dos agregados graúdos	2,669	-
Absorção dos agregados graúdos	0,8%	-
Massa específica real dos agregados miúdos	2,781	-
Massa específica aparente dos agregados miúdos	2,693	-
Absorção dos agregados miúdos	3,01%	-
Equivalente de areia	84%	≥55%
Angularidade dos agregados miúdos – Método A	40%	-
Ensaio de durabilidade - sanidade	10,3%	<12%

Fonte: Adaptada de Nascimento *et al.* (2009) *apud* Fritzen (2016)

A Norma DNIT 412/19 - ME mostra o método de ensaio para análise granulométrica dos agregados das misturas asfálticas.

A metodologia *Superpave*, quando trata de agregados, especifica dois grupos de propriedades: as de consenso e as de origem. As propriedades de consenso são aquelas que estão relacionadas com o desempenho das misturas asfálticas, englobando a angularidade de agregados graúdos e miúdos, o percentual de partículas alongadas e achatadas e o teor de argila encontrado por meio do ensaio de equivalente de areia. Já as propriedades de origem são aquelas usadas para qualificar as fontes dos materiais pétreos, sendo consideradas a dureza, a sanidade e a quantidade de materiais deletérios (Motta *et al.*, 1996).

Segundo os requisitos de projeto volumétrico *Superpave* de misturas da AASHTO M 323-13 “*Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*”, a curva granulométrica deve estar contida entre pontos de controle nela especificados

em função do tamanho máximo nominal (TMN) do agregado e que se evitem misturas com granulometria sobre a linha de densidade máxima.

Definiu-se para esta pesquisa o tamanho máximo nominal (TMN) dos agregados como 19mm, que é a abertura de malha de peneira imediatamente maior do que a da primeira peneira a reter mais de 10% do material.

Há várias gradações de agregado que têm sido usadas na produção de misturas de asfalto-borracha. Embora ligantes modificados com borracha melhorem o desempenho de misturas asfálticas em geral, conforme mencionado no Capítulo 2, verificou-se que gradações descontínuas são mais adequadas para produzir misturas de asfalto-borracha. As suas características de desempenho são significativamente melhores em comparação com misturas densas quando se utiliza asfalto-borracha (Venudharan *et al.*, 2016; Way, 2012b).

O *Gap-Graded* consiste em uma mistura asfáltica de duas partes: um agregado graúdo que representa cerca de 70% a 80% do total da mistura de agregados e uma segunda parte que é composta por ligante asfáltico, agregado fino e fíler, que irão preencher os espaços vazios do agregado graúdo. Para proporcionar maior durabilidade, as misturas *Gap-Graded* têm um teor de ligante relativamente elevado. Conseqüentemente, o escorrimento muitas vezes pode se configurar como um problema comum, que ocorre durante o armazenamento, transporte e aplicação.

Para a composição das misturas utilizadas nesta pesquisa, foi selecionada uma curva granulométrica descontínua do tipo “*Gap-Graded*”, que é uma faixa granulométrica especial que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas não em teor de vazios elevado (Bernucci *et al.*, 2022).

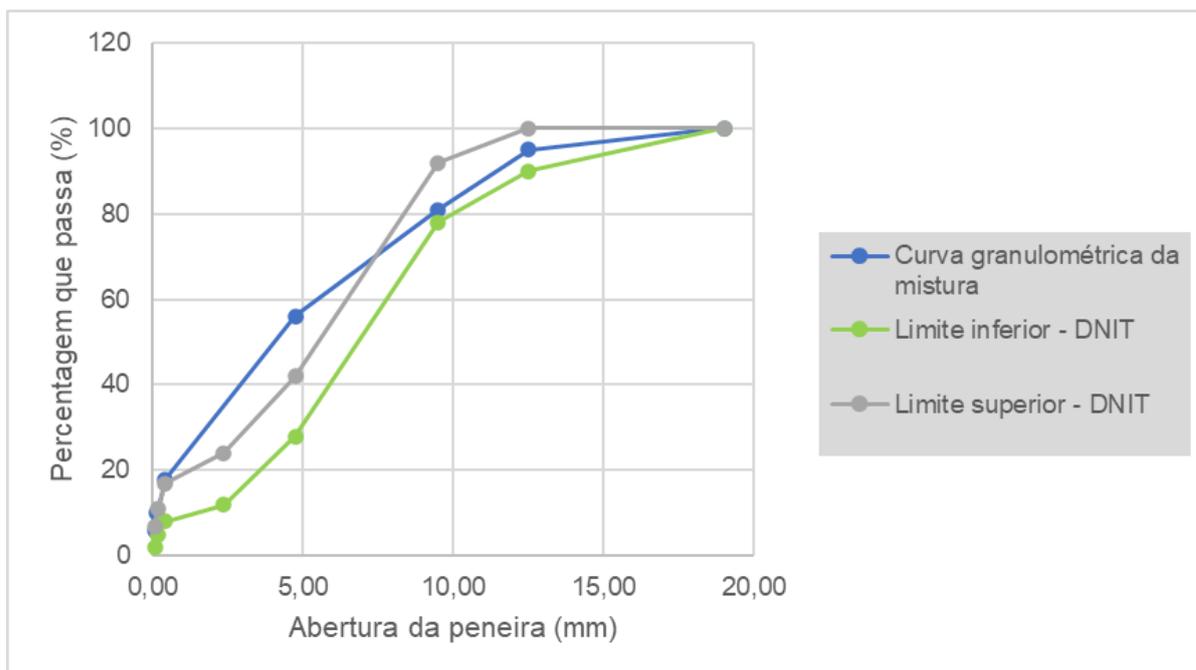
A composição granulométrica da mistura procurou enquadrar-se nos limites mínimos e máximos da faixa descontínua recomendados pelo DNIT (especificação de serviço DNIT 112/09), como é apresentado na Tabela 11 e na Figura 64. Porém, parte da curva utilizada não se enquadrou na faixa granulométrica descontínua disponível devido às condições dos agregados utilizados.

Tabela 11 - Características da faixa granulométrica utilizada para as misturas asfálticas desta pesquisa

Tamanho da malha		Porcentagem passando (%)		
ASTM	mm	Limites - DNIT ES 112/2009		Mistura
3/4"	19,00	100	100	100
1/2"	12,50	90	100	95
3/8"	9,50	78	92	81
Nº 4	4,750	28	42	56
Nº 8	2,360	-	-	47
Nº 10	2,00	14	24	-
Nº 16	1,180	-	-	26
Nº 40	0,425	8	17	18
Nº 80	0,180	5	11	-
Nº 100	0,150	-	-	10
Nº 200	0,075	2	7	6

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 64 - Curva granulométrica adotada para a mistura, com indicação dos limites máximo e mínimo segundo a faixa do DNIT (*gap graded* – Norma DNIT 112/09)



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.2 LIGANTES ASFÁLTICOS

Nesta pesquisa foram utilizados quatro tipos de ligantes asfálticos e algumas combinações entre eles:

- Convencional CAP 50/70, proveniente da refinaria Duque de Caxias (REDUC);
- Asfalto-borracha, do tipo AB-08, produzido pela Stratura asfaltos;
- Péletes de asfalto-borracha: *PelletPAVE-Plus (PPP)* e *PelletPAV (PP)*, empregados em processo seco e úmido contínuo.

Os péletes de asfalto-borracha foram disponibilizados pelas Indústrias Phoenix/EUA, totalizando 100kg de *PelletPAVE-Plus (PPP)* e 100kg de *PelletPAV (PP)*, os quais foram estocados em sacos de armazenamento na forma seca à temperatura ambiente no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ.

Nas Figuras 65, 66, 67 e 68 estão exibidos os péletes de asfalto utilizados nesta pesquisa. Cabe destacar que o *PelletPAVE-Plus (PPP)* corresponde ao atual *PelletPAVE-TR* e que o *PelletPAV (PP)* corresponde ao *PelletPAVE-AR*, produzidos pelas Indústrias Phoenix/USA.

Figura 65 - Amostra de *PelletPAV*



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 66 - Amostra de *PelletPAVE-PLUS*



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 67 - Vista do tamanho dos grãos da amostra de *PelletPAV*.



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 68 - Vista *PelletPAV* (à esquerda) e *PelletPAVE-Plus* (à direita)



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

O pélete de asfalto-borracha foi projetado para ser misturado diretamente aos agregados ou, em determinadas composições, para ser usado modificando o ligante asfáltico. Portanto, o pélete pode ser formulado com a concentração exata de ligante asfáltico e aditivos para produzir misturas asfálticas a quente, ou pode ser utilizado proporcionalmente à massa da mistura, modificando o ligante asfáltico durante a produção da mistura.

Diante deste contexto, nesta pesquisa, para comparação com uma amostra de asfalto-borracha brasileiro foi modificado um CAP 50/70 convencional com incorporação de péletes, nas proporções de 20% e 30% com relação à massa total do ligante, segundo recomendações do fabricante, sendo analisados pela Norma ASTM D 8239/21 e pelo ensaio LAS.

Segundo os fornecedores das amostras de péletes a temperatura de modificação do ligante, como também para o processo de mistura, deve estar entre 165°C e 175°C.

Ainda, de acordo com o fabricante, o pó de borracha utilizado na confecção dos péletes é oriundo de uma mistura de pneus usados de carro e caminhões (proporção

específica 4:1) contendo no máximo 10% de borracha natural. Com relação à faixa granulométrica da borracha utilizada na composição dos péletes, o *PelletPav (PP)* é composto por partículas de borracha atendendo à granulometria da Tabela 12. A diferença entre a granulometria da borracha do *PelletPav (PP)* e do *PelletPave-Plus (PPP)* é a porcentagem (%) de finos, maior no *PelletPave-Plus (PPP)*, mas não se dispõe desta granulometria. O *PelletPave-Plus (PPP)*, por conter elevado teor de borracha em sua formulação, não deve ser utilizado puro para a composição das misturas asfálticas, mas sim como modificador do ligante asfáltico convencional.

Tabela 12 - Características granulométricas da borracha de pneus usada nos péletes de asfalto- borracha

Porcentagem passando por peso	
Tamanho da peneira	Sucata de pneu (modificado)
Nº 8	100
Nº 10	90-100
Nº 16	60-85
Nº 30	15-40
Nº 50	5-15
Nº 100	0-3
Nº 200	0-1

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com informações da empresa Stratura Asfaltos, o pó de borracha utilizado na produção do asfalto-borracha AB-08 desta pesquisa é proveniente de pneus de caminhões, contendo em geral 70% de borracha natural e 30% de borracha sintética. O tamanho das partículas de borracha empregadas no processo estão em torno de 0,6mm (#30), conforme mostrado no Anexo desta pesquisa. Puga (2015) relatou que os tamanhos de borrachas comercializadas estão, normalmente, em torno de 0,6 a 2mm, ou seja, peneiras #30 e #10, respectivamente.

Enfatiza-se que a qualidade do ligante asfalto-borracha está vinculada principalmente ao tipo, teor e tamanho das partículas de borracha. Partículas mais finas são mais interessantes no processo, visto que proporcionam um bom nível de

digestão em tempos curtos e melhoram as propriedades mecânicas da mistura segundo alguns autores.

Segundo as Indústrias Phoenix/EUA, o *PelletPav (PP)* é usado em misturas do tipo *Gap-Graded*, numa taxa de 20% a 40% (em peso de aglutinante total), atendendo aos requisitos de ligante modificado por borracha ASTM D 6114/19, quanto à viscosidade, penetração, ponto de amolecimento e resiliência. O *PelletPave-Plus (PPP)* é um asfalto-borracha híbrido, ou seja, contém copolímero SBS em sua formulação, e ainda 12% a 15% de um pó de borracha fino, para uso em misturas asfálticas densas.

Os ligantes asfálticos utilizados foram nomeados da seguinte maneira:

1. CAP 50/70 convencional – CAP 50/70;
2. Asfalto-borracha – AB-08;
3. CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus* com adição de 20% com relação à massa total do ligante: CAP 50/70 + 20% PPP;
4. CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus* com adição de 30% com relação à massa total do ligante: CAP 50/70 + 30% PPP;
5. CAP 50/70 + *PelletPAV* com adição de 20% com relação à massa total do ligante: CAP 50/70 + 20% PP e
6. CAP 50/70 + *PelletPAV* com adição de 30% com relação à massa total do ligante: CAP 50/70 + 30% PP.

Os ensaios de classificação para os asfaltos modificados por borracha utilizados nessa pesquisa estão listados a seguir e estão baseados na Norma ASTM 6114/19: “*Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*”:

- Viscosidade aparente a 175°C, de preferência no equipamento *Brookfield*, podendo usar o DSR, com alguns cuidados na execução e preparação do ensaio;
- Penetração a 25°C e a 4°C (Norma DNIT 155/2010 – ME/ ASTM D 5);
- Ponto de amolecimento (Norma DNIT 131/2010 – ME);
- Envelhecimento na estufa de filme fino (TFOT – D 1754/1754M), podendo ser substituído pelo RTFOT;
- Estabilidade à estocagem.

A caracterização das amostras para verificar o desempenho dos ligantes asfálticos também foi realizada com base nos ensaios elencados a seguir:

- Reômetro de Cisalhamento dinâmico – *Dynamic Shear Rheometer* - DSR; a temperaturas altas,  $|G^*|/\sin \delta$  (kPa) e intermediárias,  $|G^*| \cdot \sin \delta$  (MPa); ASTM D 7175/15;
- Fluência e relaxação sob carregamento em tensão múltipla – *Multiple Stress Creep and Recovery Test* - MSCR; Jnr (kPa-1); DNIT 423/2020; ASTM D 7405/2020;
- Ensaio de Varredura de Amplitude Linear - *Linear Amplitude Sweep* - LAS; AASHTO TP 101/18 e DNIT 439/2022.

### **3.2.1 Procedimentos e equipamentos para os ensaios de RTFOT, DSR, MSCR e LAS**

Conforme exposto no Capítulo 2, o método de ensaio do reômetro de cisalhamento dinâmico - DSR possibilita prever o comportamento à fadiga e à deformação permanente de misturas asfálticas, a partir de parâmetros reológicos dos ligantes asfálticos.

As amostras foram preparadas de acordo com norma ASTM D7175-15, que determina o método padrão para ensaios com o *Dynamic Shear Rheometer* (DSR). Esta norma é recomendada para obtenção dos parâmetros módulo complexo  $|G^*|$  e ângulo de fase ( $\delta$ ), para ligantes não envelhecidos ou envelhecidos, entre as temperaturas de 4°C e 88°C, para tensões de 100 Pa a 10 MPa (ASTM D7175/2015).

Na classificação PG o ligante deve atender aos limites propostos numa temperatura determinada, comparada com as condições climáticas do local a ser pavimentado (Leite, 1999). As classes são agrupadas pelas temperaturas máxima e mínima previstas do pavimento (Grau PG). Para o presente estudo, não foi verificada a temperatura baixa que no PG são negativas considerando que a maior parte do território apresenta clima tropical. Os ligantes modificados foram ensaiados na condição virgem e envelhecida no ensaio *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) (Norma NBR 15235/2009), que simula o envelhecimento a curto prazo (usinagem e transporte).

Foram desenvolvidos, também, utilizando o equipamento de DSR, em amostras envelhecidas em curto prazo no equipamento *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), os ensaios para previsão do desempenho das misturas asfálticas a partir do comportamento reológico dos ligantes, sendo eles:

- Para a fadiga: LAS que forneceu parâmetros da curva de fadiga;
- Para a deformação permanente: MSCR.

A varredura da amplitude é efetuada no DSR a temperatura intermediária do pavimento de 19°C representando melhor o dano de fadiga do que o parâmetro expresso por  $|G^*| \sin \delta$  (Chacur e Nascimento, 2010; Pamplona *et al.* 2013; Martins, 2014). Os ligantes foram submetidos ao ensaio de LAS após o envelhecimento de curto prazo.

Para resistência à deformação permanente dos ligantes foi realizado o MSCR, no reômetro com geometria de placas paralelas de 25mm de diâmetro, distância entre placas de 1mm, em amostras envelhecidas no RTFOT para temperatura alta da classificação PG. São 20 ciclos de fluência e recuperação para uma tensão de 100Pa, os primeiros dez ciclos para condicionamento da amostra e os últimos dez para análise de dados. Após os vinte ciclos de fluência e recuperação para a tensão de 100Pa, foram realizados dez ciclos de fluência e recuperação para uma tensão de 3200Pa.

Cabe mencionar que, no trabalho de Nunes (2017), o ligante convencional CAP 50/70 foi envelhecido à temperatura de 163°C, porém, os ligantes modificados foram envelhecidos a 175°C, uma vez que a 163°C não se espalhavam uniformemente no frasco de ensaio. No estudo de Nunes (2017), a temperatura de modificação do ligante asfáltico convencional CAP 50/70 com adição de “*PelletPAVE*” foi de 170°C durante 15 minutos, para garantir homogeneidade à mistura.

Para a modificação do ligante asfáltico convencional o fabricante dos péletes recomenda que se utilize um misturador tipo “batedor” – com algum tipo de palheta para agitar, visto que somente um agitador centrífugo não consegue misturar adequadamente. A Figura 70 mostra o tipo de misturador que foi empregado para modificar os ligantes desta pesquisa.

Neste trabalho, inicialmente, foram realizados ensaios de DSR, MSCR e LAS com o objetivo de prever o desempenho das amostras de ligante convencional CAP 50/70, asfalto-borracha convencional, CAP 50/70 + *PelletPAV* (PP) e CAP 50/70 +

*PelletPAVE-Plus (PPP)*, em proporções definidas de 20% e 30% de péletes (com relação à massa total do ligante asfáltico). Para todos os ligantes desta pesquisa também foram realizados os ensaios de caracterização física retromencionados.

As Figuras 69 até a 77 mostram os procedimentos e equipamentos para ensaios de RTFOT, DSR, MSCR e LAS, quando utilizados para a execução dos ensaios com amostras de asfalto-borracha desta pesquisa, no laboratório da COPPE/UFRJ.

Figura 69 - Misturador tipo agitador de baixo cisalhamento com hélice



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 70 - Pesagem da amostra de ligante asfalto-borracha para RTFOT



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 71 - Temperatura da estufa para o ensaio de RTFOT (163°C)



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 72 - Amostras sendo retiradas da estufa de filme fino rotativo



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 73 - Amostras após o ensaio de RTFOT



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 74 - Amostras de 25mm sendo preparadas para o DSR



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 75 - Amostras de 25mm prontas para o ensaio no equipamento de DSR



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 76 - Reômetro de cisalhamento dinâmico



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 77 - Detalhe do equipamento



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

O ensaio de estabilidade à estocagem também foi realizado, visando prever a eficiência na modificação do asfalto (DNER ME-384/99).

### 3.2.2 Processo de incorporação dos péletes aos ligantes asfálticos

Nesta pesquisa, para a incorporação dos péletes ao CAP 50/70 foi empregado um misturador tipo batedor com palheta para agitação na câmara de aquecimento. A temperatura indicada pelo fabricante para mistura foi entre 165°C e 175°C.

A metodologia consistiu em aquecer o ligante asfáltico (CAP 50/70) na temperatura de 170°C por pelo menos uma hora. Então, as amostras, nas porcentagens pré-estabelecidas, foram adicionadas no galão de mistura, sendo colocadas dentro da câmara de aquecimento, provida de agitador. Em seguida, os péletes de asfalto-borracha foram introduzidos aos poucos, nos percentuais pré-definidos, para garantir boa homogeneização, mantendo a agitação por uma hora. Para a proporção de 30% de péletes, 1400g de ligante asfáltico (CAP 50/70) foram adicionados no galão e 600g de péletes. Para a proporção de 20% de péletes, 1600g de ligante asfáltico (CAP 50/70) foram adicionados no galão e 400g de péletes. Em ambos os casos, retirou-se uma alíquota num béquer (500g) para realização dos ensaios do reômetro, além da viscosidade a 175°C, ponto de amolecimento,

estabilidade à estocagem e penetração. O procedimento para modificar o ligante convencional com os péletes está ilustrado nas Figuras 78, 79 e 80.

Figura 78 - Pesagem de CAP



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 79 - Pesagem de pélete



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 80 - Agitador de hélice com câmara de aquecimento para modificação do ligante com pélete



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

### 3.2.3 Dispositivo Extrator Coletor de Fumos - DEC

Para a análise do potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE) dos ligantes asfálticos utilizados neste trabalho, foi executado o ensaio com o Dispositivo Extrator Coletor (DEC), conforme disposto em Ferraz (2015). Dessa forma, foi possível captar os componentes liberados durante o aquecimento dos ligantes asfálticos modificados por péletes de asfalto-borracha (nas proporções de 30% PP e 30% PPP, com relação à massa total do ligante) e confrontá-los com os identificados nas amostras de ligante convencional CAP 50/70 e ligante asfalto-borracha, do tipo AB-08.

Este ensaio foi realizado com o apoio da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, que dispõe do equipamento de DEC.

### 3.3 MISTURAS ASFÁLTICAS

Nesta etapa procurou-se definir os parâmetros volumétricos para dosagem das misturas asfálticas previstas para esta pesquisa, assim como, a realização de ensaios mecânicos de resistência à tração e módulo de resiliência para estimativa de comportamento mecânico. As misturas asfálticas foram preparadas com curva granulométrica descontínua do tipo *Gap-Graded*, mantendo os agregados e variando o ligante, utilizando a metodologia *Superpave* de dosagem, conforme faixa especificada pela Norma DNIT 112/09 – ES.

Utilizou-se o compactador giratório para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios mecânicos, de acordo com a norma DNIT 178/2018 – Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório *Superpave* ou o Marshall – Procedimento.

Também foram medidos os parâmetros CDI e TDI durante a preparação dos corpos de prova, que ajudam a definir a qualidade da curva granulométrica, que são avaliados segundo a norma DNIT 426/2020.

As misturas estudadas nesta pesquisa estão descritas a seguir:

1. Mistura Asfáltica, com granulometria descontínua, composta por CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus*, com adição de 30% com relação à massa total do ligante – 50/70 + 30% PPP;

2. Mistura Asfáltica, com granulometria descontínua, composta por CAP 50/70 com adição de 25% de PPP (com relação à massa total do ligante) aquecido junto do agregado.

Os requisitos para a produção de uma mistura asfáltica que atenda as características esperadas para um revestimento adequado de um pavimento incluem a impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade e resistência à derrapagem, uma vez que o revestimento irá suportar as cargas em movimento e fatores climáticos.

Segundo Bernucci *et al.* (2022) parâmetros tais como: massa específica aparente e real da composição de agregados, fator de absorção dessa composição de agregados, percentual de agregados em cada peneira, Volume de vazios (Vv) da mistura, massa específica do ligante e Tamanho Máximo Nominal (TMN) da peneira para a composição de agregados são utilizados para a definição do teor de ligante inicial no procedimento *Superpave*. Neste teor considera-se que os eventuais vazios dos agregados não absorvem mais ligante.

### 3.3.1 Procedimentos de ensaios das misturas asfálticas

A caracterização das misturas asfálticas para previsão do desempenho foi realizada por meio dos seguintes ensaios de comportamento mecânico:

- Resistência à tração por compressão diametral – RT (Norma DNIT 136/2018 – ME);
- Módulo de resiliência – MR (Norma DNIT 135/2018 – ME).

Experiências com a utilização de asfalto-borracha e granulometria descontínua também fundamentaram a faixa de teor de ligante a ser testada para a definição do teor de projeto.

As temperaturas de mistura e compactação seguiram as recomendações dos fabricantes dos modificadores, que alertam para a utilização de temperaturas mais baixas para ligantes menos viscosos e temperaturas mais altas para ligantes mais viscosos, a depender do asfalto utilizado como base.

Nunes (2017) também usou como ligante base o ligante asfáltico convencional (CAP 50/70), que é menos viscoso. A temperatura para mistura foi de 170°C e para a

compactação as temperaturas variaram entre 150 e 160°C. Ao final do processo, com a curva de compactação dos corpos de prova, a citada autora definiu o teor de 8,8% de ligante.

### 3.3.2 Método de dosagem das misturas asfálticas

Segundo os requisitos de projeto volumétrico *Superpave* de misturas (AASHTO M 323-13 “*Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*) a curva granulométrica deve estar contida entre pontos de controle nela especificados em função do tamanho máximo nominal (TMN) do agregado e que se evitem misturas com granulometria sobre a linha de densidade máxima.

Definiu-se para esta pesquisa o tamanho máximo nominal (TMN) dos agregados como 19mm, que é a abertura de malha de peneira imediatamente maior do que a da primeira peneira a reter mais de 10% do material.

Cada mistura de concreto asfáltico da presente pesquisa foi dosada segundo os critérios do método *Superpave*, considerando-se na escolha do teor de projeto de ligante, o percentual de 96% da massa específica máxima medida, Gmm, (4% de vazios de ar) a um dado número de giros de compactação (Nprojeto) em função do tráfego.

Os passos para a dosagem foram os seguintes:

- a) Caracterização dos agregados e montagem da curva granulométrica;
- b) Adição dos péletes de asfalto-borracha ao ligante convencional em proporção pré-definida de 30% em relação à massa total do ligante. A faixa de temperatura de mistura foi a indicada pelo fornecedor (165°C a 175°C);
- c) Preparação das amostras para os corpos de prova de dosagem nos teores de ligante de cada tipo de modificação;
- d) As amostras das misturas não compactadas permaneceram durante 2 horas em estufa na temperatura de compactação, objetivando simular o envelhecimento de curto prazo;
- e) Para definição do teor de projeto foram compactados 2 corpos de prova no teor de ligante inicial, além de mais três outros teores, conforme o intervalo de variação padrão (*Superpave*), sendo moldados 8 corpos de prova para cada mistura, pesando 1200g cada um;
- f) Definido o teor de projeto para a moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos foi realizada uma batelada suficiente para separar

duas amostras de 2500g por mistura dosada para a determinação da massa específica máxima medida (Gmm) através do método *Rice*, conforme ABNT NBR 15619/2016 – Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas.

Os agregados e os ligantes foram misturados no misturador francês modelo BBMAX80, do Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, sendo este pré-aquecido na temperatura de compactação. Utilizou-se o compactador giratório para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios mecânicos, de acordo com a norma DNIT 178/2018.

O número de giros de projeto adotado foi  $N_{proj} = 100$ , para se obter o teor de projeto. Este número representa um tráfego equivalente a uma carga de eixo simples (ESAL) entre  $3 \times 10^6$  e  $3 \times 10^7$ , considerado adequado para vias de tráfego médio a pesado.

Para a moldagem dos corpos de prova no teor de projeto, destinados aos ensaios mecânicos listados anteriormente, foi utilizado um molde de 100mm de diâmetro. A temperatura para mistura foi de 170°C e para a compactação utilizou-se temperaturas entre 150 e 160°C. As misturas desta pesquisa estão descritas, conforme segue:

1. Mistura Asfáltica, com granulometria descontínua, composta por CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus*, com adição de 30% com relação à massa total do ligante – 50/70 + 30% PPP;
2. Mistura Asfáltica, com granulometria descontínua, composta por CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus*, com adição de 25% com relação à massa total do ligante – CAP 50/70 + 25% PPP.

Para a produção das misturas asfálticas, o ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) foi modificado por meio da incorporação de péletes de asfalto-borracha na proporção de 30%, com relação à massa total de ligante asfáltico (via úmida). Nesta pesquisa também foram testadas misturas asfálticas aquecendo os péletes junto com os agregados na proporção de 25% (com relação à massa total do ligante), conforme testado no trabalho de Al-Baghli (2022).

### 3.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo versou sobre os métodos e os materiais utilizados neste trabalho, visando alcançar os objetivos desta pesquisa. Foram descritos os procedimentos de ensaios e materiais envolvidos no presente estudo. Foi mostrado o processo de incorporação dos péletes aos ligantes asfálticos, a preparação das amostras para os ensaios no equipamento de DSR, a escolha dos agregados e da curva granulométrica e o método de dosagem das misturas asfálticas. Adicionalmente, foi executado ensaio no DEC para previsão de níveis de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais realizados com os ligantes asfálticos (CAP 50/70, AB-08, CAP 50/70 + 20% PPP, CAP 50/70 + 30% PPP, CAP 50/70 +20% PP e CAP 50/70 +30% PP) durante a primeira etapa da pesquisa. Inicialmente, estão exibidos os resultados da caracterização física e reológica dos ligantes, ambos fundamentados pela Norma ASTM D 6114/2019 e pelos parâmetros requeridos pela especificação *Superpave*. Em seguida são mostradas as tentativas de dosagens e as características mecânicas das misturas asfálticas produzidas com os péletes de asfalto-borracha.

Cabe mencionar a escassez de registros na literatura acerca de estudos reológicos utilizando ligantes modificados por péletes de asfalto-borracha. No entanto, muitos autores ratificam, no geral, que, a modificação do asfalto por borracha moída de pneus melhora o desempenho dos ligantes asfálticos no que diz respeito à fadiga e à deformação permanente (Airey, 1997; Dantas Neto, 2004; Spetch, 2004; Subhy *et al.*, 2015; Pais *et al.* 2015, Camargo, 2016; Nunes 2017; Klinsky, 2020; Wang *et al.* 2020, Sierra, Moreno e Rubio 2022, dentre outros).

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS LIGANTES

A Tabela 13 mostra os resultados de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade aparente para as amostras estudadas, a fim de compará-los com os limites das especificações de asfalto-borracha da ASTM D 6114/19.

Tabela 13 - Características tradicionais dos ligantes estudados nesta pesquisa

Características	CAP 50/70	AB-08	50/70 + 20% PP	50/70 + 30% PP	50/70 + 20% PPP	50/70 + 30%PPP	ASTM D6114 (TIPO II)
Ponto de Amolecimento °C	48	60	54	54	54	56	Mín. 54
Penetração a 25°C, 100g, 5s, (1/10mm)	52	27	52	21	54	22	Mín. 25
Viscosidade rotativa, 177°C (cP)	71	1117	261,7	1017	247,9	817	Mín. 1500
Ensaio de estocagem (°C)	-	-	Topo 50/50 Base 53/54	Topo 52/52 Base 60/60	Topo 50/51 Base 54/54	Topo 54/54 Base 63/63	-

Fonte: Autoria própria (2023)

A partir dos resultados expostos na Tabela 15 foi possível observar que os parâmetros de caracterização física do ligante asfáltico CAP 50/70 e do AB-08 corroboram com a literatura específica mostrada no Capítulo 2. O AB-08 apresentou maior valor de ponto de amolecimento, menor penetração e viscosidade mais elevada do que o CAP 50/70, estando condizentes com o comportamento destes materiais. Uma elevada viscosidade, dentro da faixa de especificação, e um maior ponto de amolecimento garante ao ligante asfáltico modificado por borracha um melhor desempenho em comparação ao ligante convencional.

Ressalta-se que, o valor da viscosidade rotativa do AB-08 mostrou valor de 1117cP, inferior ao limite mínimo especificado de 1500cP pela ASTM 6114, no entanto, superior ao limite mínimo estabelecido pela Norma DNIT 111/09 EM (800cP).

Vale salientar que, conforme relatado pela Stratura Asfaltos (2022), a qualidade e a composição das borrachas de pneus disponíveis no mercado brasileiro são extremamente variáveis, o que impacta diretamente nas propriedades do asfalto-borracha, principalmente, na sua viscosidade. Por isso, a viscosidade de um ligante asfáltico modificado por borracha deve ser medida como parâmetro de controle para assegurar ao cliente que o produto está adequadamente formulado e atendendo as especificações vigentes.

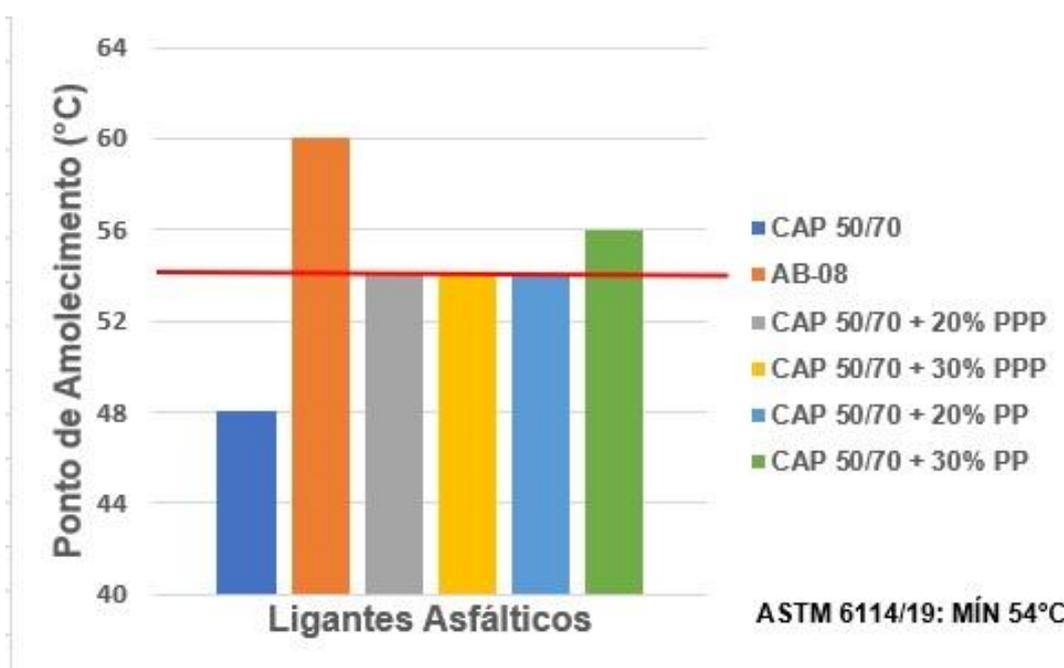
Os ligantes asfálticos modificados com 20% de PP e 20% PPP apresentaram ponto de amolecimento de 54°C, assim como, a amostra de ligante asfáltico

modificado com 30% de PPP. O ligante asfáltico modificado com 30% de PP alcançou valor de 56°C. Todos os ligantes modificados desta pesquisa atenderam ao parâmetro mínimo recomendado pela ASTM 6114 para o ponto de amolecimento (54°C), conforme mostrado na Figura 81.

Destaca-se que Nunes (2017) obteve valor de ponto de amolecimento de 57°C para o ligante convencional CAP 50/70 modificado, com a adição de 30% de péletes de asfalto-borracha (Indústrias Phoenix), com relação à massa total de ligante. O ponto de amolecimento de 56°C do ligante asfáltico modificado com 30% de PP desta pesquisa foi similar ao encontrado por Nunes (2017).

Amirkhanian (2018) obteve ponto de amolecimento de 59°C para composição de CAP 50/70 com adição de 40% *PelletPave* em projeto realizado na África do Sul.

Figura 81 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento para os ligantes utilizados nesta pesquisa



Fonte: Autoria própria (2023)

Verificou-se que a modificação dos ligantes com 30% de PP e 30% de PPP se situou abaixo do limite de penetração de 25 (1/10 mm) requerido pela ASTM 6114. Já os ligantes modificados com 20% de PP e 20% de PPP mostraram valores de penetração similares ao CAP 50/70, podendo ser indicativo de baixo teor de borracha.

Os valores de viscosidade de todas as amostras modificadas estão abaixo dos limites requeridos pela ASTM 6114. Conforme retromencionado, a viscosidade

depende muito das características da borracha de pneus inservíveis incorporada ao ligante base. As amostras modificadas com 20% de PP e PPP apresentaram valores muito baixos de viscosidade (261,67cP, 247,9cP, respectivamente), próximos ao CAP 50/70.

.Com relação ao ensaio de estabilidade à estocagem, as amostras modificadas com 20% de PP e 20% de PPP apresentaram resultados satisfatórios, contradizendo os dados dos ligantes modificados por 30% de PPP e 30% de PP, os quais exibiram dados de estabilidade a estocagem desfavoráveis.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DOS LIGANTES

A reologia é uma ciência que estuda as deformações e o fluxo dos materiais. As deformações são avaliadas em função da temperatura e do tempo de carregamento. Assim, a reologia pode ser utilizada para entender o desempenho de materiais que exibem comportamento viscoelástico, cujas características variam em função da temperatura.

Segundo Cravo (2016) sob carregamentos rápidos (frequências elevadas) e/ou em baixas temperaturas, o comportamento do material asfáltico é muito próximo ao de sólidos elásticos e, quando são aplicados carregamentos lentos (frequências baixas) e/ou em temperaturas altas, e as deformações permanentes são observadas com o tempo, o comportamento é semelhante ao de fluidos viscosos.

### 4.2.1 Determinação do PG de alta temperatura

O ensaio no DSR foi realizado em amostras virgens e envelhecidas após o RTFOT para os seis ligantes estudados nesta pesquisa. Os resultados estão mostrados nas Tabelas 14 a 25 e resumidos na Figura 82. A temperatura alta do PG foi definida como aquela na qual os valores do  $|G^*|/\sin(\delta)$  são superiores a 1,0kPa e a 2,2kPa, respectivamente, para as amostras antes e após o envelhecimento.

Tabela 14 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 - Amostra Virgem 1			CAP 50/70 - Amostra Virgem 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
58	1,90E-03	88,72	2,77	1,91E-03	88,71	1,91
64	8,50E-04	89,17	0,91	8,49E-04	89,19	0,85
70	4,05E-04	89,43	0,40	4,04E-04	89,45	0,40

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 15 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – Ligante asfáltico CAP 50/70

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 - Amostra Envelhecida 1			CAP 50/70 - Amostra Envelhecida 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
58	4,26E-03	87,14	4,26	4,26E-03	87,09	4,27
64	1,83E-03	88,21	1,82	1,84E-03	88,11	1,84
70	8,25E-04	88,9	0,83	8,35E-04	88,76	0,84

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o CAP 50/70, o grau PG de alta temperatura foi de 58°C.

Tabela 16 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico AB-08

Temperatura do Ensaio (°C)	AB-08 - Amostra Virgem 1			AB-08 - Amostra Virgem 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	3,70E-03	78,91	3,77	4,56E-03	64,48	5,06
76	1,83E-03	82,04	1,85	2,58E-03	57,02	3,08
82	9,71E-04	83,95	0,98	1,70E-03	46,64	2,37

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 17 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – Ligante asfáltico AB-08

Temperatura do Ensaio (°C)	AB-08 - Amostra Envelhecida 1			AB-08 - Amostra Envelhecida 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	8,34E-03	75,22	8,62	8,26E-03	68,78	8,86
76	4,59E-03	71,60	4,83	4,38E-03	72,48	4,60
82	2,44E-03	75,22	2,54	2,36E-03	75,92	2,43

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o AB-08, o grau PG de alta temperatura foi de 82°C.

Tabela 18 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70 + 20% PPP

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 +20% PPP - Amostra Virgem 1			CAP 50/70 +20% PPP - Amostra Virgem 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	1,50E-03	67,8	1,66	1,25E-03	82,84	1,26
76	9,34E-04	61,45	1,06	6,59E-04	82,75	0,66
82	6,25E-04	53,59	0,78	3,69E-04	81,54	0,37

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 19 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – CAP 50/70 + 20% PPP

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 +20% PPP - Amostra Envelhecida 1			CAP 50/70 +20% PPP - Amostra Envelhecida 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	2,61E-03	78,53	2,68	2,73E-03	79,43	2,78
76	1,30E-03	78,69	1,36	1,38E-03	81,20	1,39
82	7,44E-04	76,92	0,76	7,50E-04	82,05	0,76

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o CAP 50/70 +20%PPP, o grau PG de alta temperatura foi de 70°C.

Tabela 20 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70 + 30% PPP

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 +30% PPP - Amostra Virgem 1			CAP 50/70 +30% PPP - Amostra Virgem 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	1,07E-03	86,83	1,07	1,10E-03	86,99	1,10
76	5,34E-04	87,54	0,53	5,53E-04	87,36	0,55
82	2,84E-04	87,99	0,28	2,95E-04	87,70	0,29

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 21 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – CAP 50/70 + 30% PPP

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 +30% PPP - Amostra Envelhecida 1			CAP 50/70 +30% PPP - Amostra Envelhecida 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	3,95E-03	76,17	4,07	3,45E-03	80,41	3,50
76	2,05E-02	76,86	2,11	1,71E-03	82,77	1,72
82	1,14E-03	76,27	1,18	9,05E-04	84,29	0,91

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o CAP 50/70 +30%PPP, o grau PG de alta temperatura foi de 70°C.

Tabela 22 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70 + 20% PP

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 +20% PP - Amostra Virgem 1			CAP 50/70 +20% PP - Amostra Virgem 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
64			4,63			2,51
70	7,13E-04	84,99	0,72	1,10E-03	86,99	0,75
76	3,69E-04	84,11	0,37	5,53E-04	87,36	0,55
82	2,08E-04	83,66	0,21	2,95E-04	87,71	0,29

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 23 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – CAP 50/70 + 20% PP

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 +20% PP - Amostra Envelhecida 1			CAP 50/70 +20% PP - Amostra Envelhecida 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	2,47E-03	82,10	2,49	2,50E-03	80,59	2,55
76	1,22E-03	84,22	1,23	1,28E-03	81,52	1,30
82	6,53E-04	85,38	0,65	7,16E-04	80,90	0,73

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o CAP 50/70 +20%PP, o grau PG de alta temperatura foi de 64°C.

Tabela 24 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras virgens – Ligante asfáltico CAP 50/70 + 30% PP

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 +30% PP - Amostra Virgem 1			CAP 50/70 +30% PP - Amostra Virgem 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	1,43E-03	81,13	1,45	1,34E-03	83,97	1,35
76	7,73E-04	79,00	0,79	6,99E-04	83,32	0,70
82	4,65E-04	75,25	0,48	3,92E-04	81,42	0,40

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 25 -  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio para amostras envelhecidas após RTFOT – CAP 50/70 + 30% PP

Temperatura do Ensaio (°C)	CAP 50/70 +30% PP - Amostra Envelhecida 1			CAP 50/70 +30% PP - Amostra Envelhecida 2		
	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)	Módulo de cisalhamento dinâmico $ G^* $ (MPa)	Ângulo de Fase $\delta$ (°)	$ G^* /\text{sen } \delta$ (kPa)
70	6,21E-03	66,80	6,75	7,31E-03	58,96	8,53
76	3,51E-03	65,82	3,85	4,37E-03	54,36	5,38
82	2,16E-03	61,73	2,45	2,97E-03	47,11	4,06

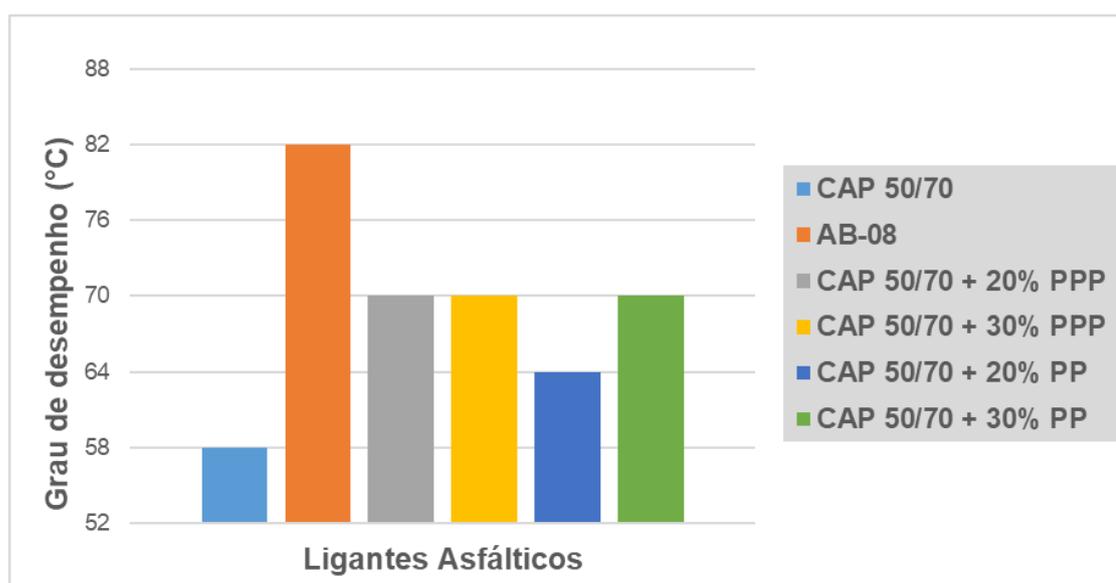
Fonte: Autoria própria (2023)

Para o CAP 50/70 +30%PP, o grau PG de alta temperatura foi de 70°C.

Das Tabelas acima observou-se que os parâmetros referentes à resistência à deformação permanente ( $|G^*|/\text{sen}\delta$ ) são mais elevados para as amostras envelhecidas, corroborando com a literatura específica, a qual ratifica que o processo de envelhecimento tende a enrijecer os materiais asfálticos.

A Figura 82 mostra um resumo dos graus de desempenho (PG) identificados.

Figura 82 - Grau de desempenho dos materiais estudados nesta pesquisa



Fonte: Autoria própria (2023)

O ligante AB-08 apresentou PG 82, muito mais alto do que o CAP 50/70, cujo PG identificado foi o 58. Esta constatação também foi verificada por Specht (2004); Domingos (2011); Martins (2014) e Klinsky e Faria (2017), entre outros.

Para os ligantes CAP 50/70 + 20% PPP e CAP 50/70 + 30% PPP foram detectados valor de grau de desempenho - PG 70. Para o CAP 50/70 + 20% PP observou-se baixa repetibilidade nos ensaios para o parâmetro  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ , apesar do ensaio de estabilidade à estocagem satisfatório. Valores maiores do que 1,0 kPa foram encontrados na temperatura de 64°C (PG 64). O CAP 50/70 + 30% PP apresentou PG 70 e baixa resistência ao envelhecimento.

Cabe mencionar que o PG 70 identificado nas amostras modificadas com péletes de asfalto-borracha foi menor do que o PG 82 apresentado pelo ligante AB-08, indicando menor resistência a temperaturas acima de 70°C, que são comuns nos revestimentos do Brasil. Porém, ressalta-se que o PG 70 foi bem superior ao PG 58, encontrado para o ligante base (CAP 50/70).

Os resultados acima estão em consonância com o estudo de Amirkhanian *et al.* (2015), o qual informou que o ligante base de PG 64, após adição de 1,25% de PPP (Indústrias Phoenix), considerando o teor total de ligante de 5,2%, expressou PG 76. Amirkhanian e Sockwell (2015) relataram que o ligante base 70/100 *pen graded* Noruega, após adição de 2,5% de péletes (não mencionaram o teor de ligante), resultou num ligante modificado com grau de desempenho - PG 64.

Tendo em vista escassez de dados brasileiros envolvendo ligantes modificados por péletes de asfalto-borracha, ainda não há dados para uma análise comparativa. Por ser um material novo, as pesquisas focaram no desempenho das misturas asfálticas com péletes e não só no desempenho dos ligantes propriamente.

Neste estudo, o PG 70 foi o preponderante nos ligantes com péletes.

#### **4.2.2 MSCR a 70°C após RTFOT**

O ensaio de MSCR foi realizado no equipamento de DSR em amostras virgens e envelhecidas após o RTFOT a 70°C para os 6 (seis) ligantes estudados nesta pesquisa. Os resultados estão mostrados nas Tabelas 26 e 27 e resumidos na Figura 83. A temperatura alta do PG foi definida como aquela na qual os valores do  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  são superiores a 1,0kPa e a 2,2kPa, respectivamente, para as amostras antes e após o envelhecimento.

Tabela 26 - Parâmetros obtidos em duplicata para compliância não recuperável e das porcentagens de recuperação para as tensões de 0,1 kPa, após RTFOT a 70°C

LIGANTES ASFÁLTICOS	MSCR após RTFOT 70°C (Amostra 1)			MSCR após RTFOT 70°C (Amostra 2)		
	Jnrdiff, %	R.01, %	Jnr0.1 (kPa)-1	Jnrdiff, %	R0.1, %	Jnr0.1 (kPa)-1
Tensão 0,1 kPa						
1. CAP 50/70	5,14	0,52	5,14	5,18	0,49	5,19
2. CAPFLEX AB-08	0,279	55,81	0,31	0,231	60,5	0,26
3. CAP 50/70 + 20% <i>PelletPave-Plus</i>	4,909	5,99	4,98	4,774	10,13	4,79
4. CAP 50/70 + 30% <i>PelletPave-Plus</i>	3,798	5,24	3,82	3,4516	12,94	3,41
5. CAP 50/70 + 20% <i>PelletPav</i>	3,789	4,73	4,05	5,0961	3,58	5,1
6. CAP 50/70 + 30% <i>PellePav</i>	0,3117	79,85	0,36	0,022	96,12	0,05

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 27 - Parâmetros obtidos em duplicata para compliância não recuperável e das porcentagens de recuperação para as tensões de 3,2 kPa, após RTFOT a 70°C

LIGANTES ASFÁLTICOS	MSCR após RTFOT 70°C (Amostra 1)			MSCR após RTFOT 70°C (Amostra 2)		
	Jnrdiff, %	R3.2, %	Jnr3.2 (kPa)-1	Jnrdiff, %	R3.2, %	Jnr3.2 (kPa)-1
Tensão 3,2 kPa						
1. CAP 50/70	5,14	0,09	5,41	4,35	0,1	5,41
2. CAPFLEX AB-08	149,86	16,91	0,77	172,34	18,89	0,7
3. CAP 50/70 + 20% <i>PelletPave-Plus</i>	15,23	0,5	5,74	22,26	0,88	5,86
4. CAP 50/70 + 30% <i>PelletPave-Plus</i>	12,4	0,96	4,29	26,95	1,14	4,33
5. CAP 50/70 + 20% <i>PelletPav</i>	6,12	0,96	4,29	15,28	0,45	5,88
6. CAP 50/70 + 30% <i>PellePav</i>	578,18	5,04	2,42	4123,45	7,87	2,23

Fonte: Autoria própria (2023)

Os ligantes modificados com adição de péletes de asfalto-borracha demonstraram, em geral, compliância não recuperável para os dois níveis de tensão, similares ao CAP 50/70, com exceção da amostra de 50/70 + 30% de PP que apresentou valores de compliância não recuperável, sob tensão de 3,2 kPa, menores

do que o convencional. O decréscimo no valor da compliância não recuperável sugere melhor resistência à deformação permanente, conforme constatado no ligante AB-08.

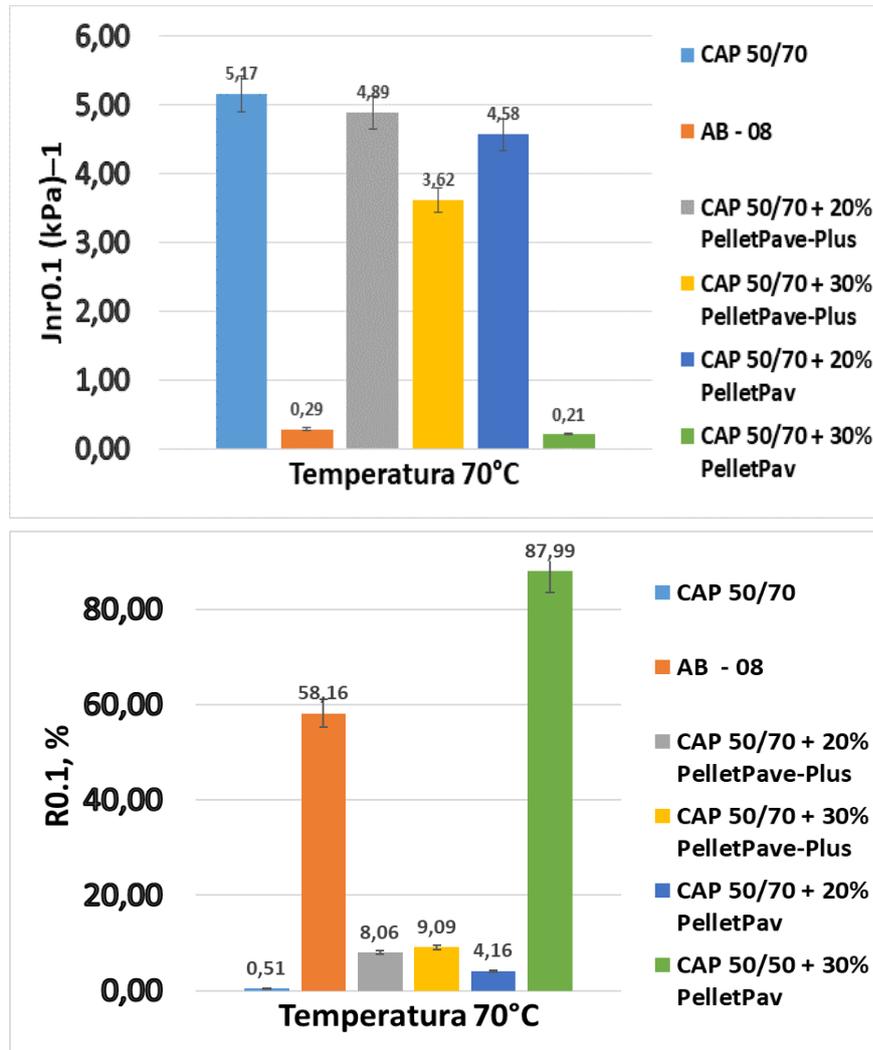
Destaca-se a baixa recuperação elástica dos ligantes modificados por péletes de asfalto-borracha com relação ao ligante AB-08, para os dois níveis de tensão, provavelmente devido ao teor reduzido de borracha e SBS. Apenas o ligante CAP 50/70 + 30% PP exibiu incremento nos resultados de recuperação nos dois níveis de tensão, quando comparado ao ligante AB-08.

Os ligantes modificados com incorporação de péletes de asfalto-borracha não exibiram incremento significativo nos parâmetros de desempenho neste ensaio. O AB-08 mostrou grande melhoria quando comparado ao CAP 50/70, conforme relatado também por Subhy, Lo Presti e Airey (2015), Camargo (2016), Klinsky *et al.* (2020), entre outros.

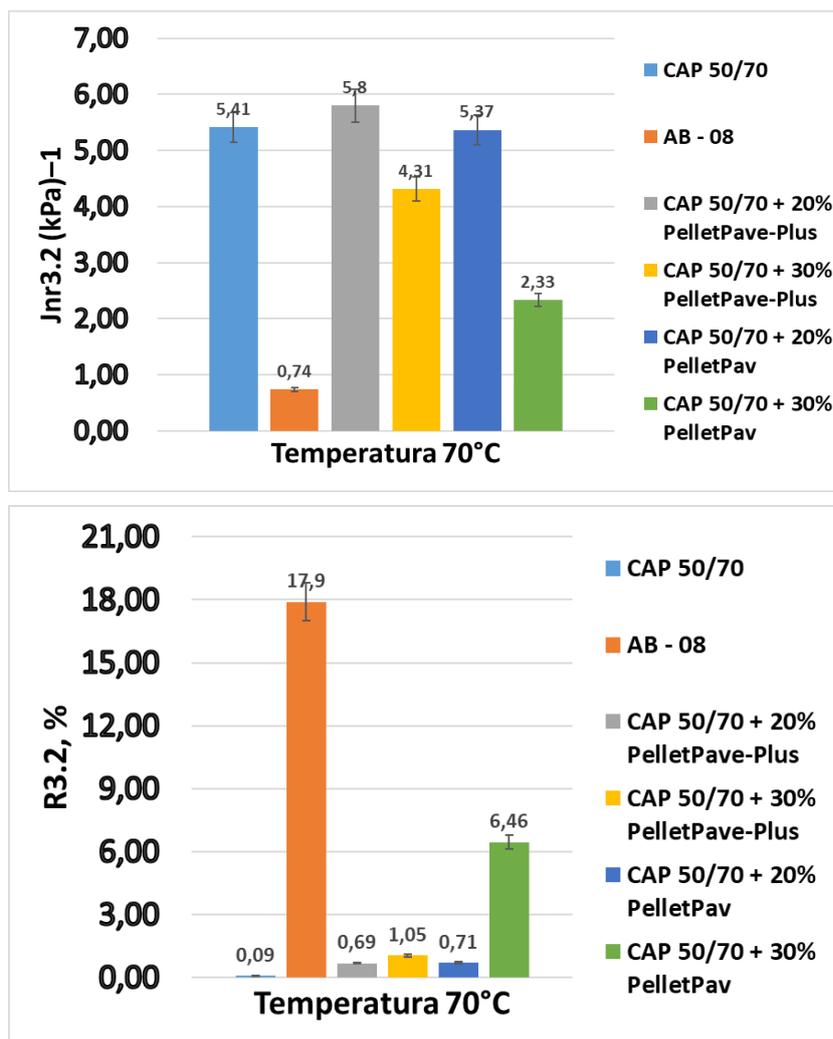
Houve baixa repetibilidade nos parâmetros das amostras de ligantes modificados por péletes de asfalto-borracha. O tamanho dos grãos de borracha, para o espaçamento utilizado nessa pesquisa (1mm), pode ter sido inadequado. Cabe elucidar que a maior parte dos asfaltos-borracha (*terminal blend*) emprega borracha moída de tamanho máximo da peneira 30 (0,6mm).

A Figura 83 mostra as médias dos valores dos parâmetros obtidos para compliância não recuperável e das porcentagens de recuperação para as tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa.

Figura 83 - a) Parâmetros de compliância não recuperável e porcentagens de recuperação para as tensões de 0,1 kPa após RTFOT a 70°C, b) Parâmetros de compliância não recuperável e porcentagens de recuperação para as tensões de 3,2 kPa após RTFOT a 70°C



(a)



(b)

Fonte: Maia *et al.* (2023)

Camargo (2016), Nunes (2017), Fengler (2018), Gaspar (2019), entre outros, utilizaram 2mm de espaçamento entre placas do DSR, na determinação de PG e MSCR a alta temperatura com placa de 25mm, para tentar minimizar o impacto das partículas de borracha nos resultados. Corrigan e Golalipour (2016) perceberam que quanto maior o espaçamento, menor a variabilidade, menor o módulo complexo e maior ângulo de fase. Mostraram que o espaçamento de 1mm pode ser pequeno para acomodar as partículas de borracha, em função do tamanho da partícula, da concentração e do tempo de reação.

Bernucci *et al.* (2020) relataram que o aumento do espaçamento não parece inibir o efeito das partículas de asfalto-borracha quando testados espaçamentos de 1mm e 3mm. Alguns ligantes modificados por borracha podem ser ensaiados

corretamente com a geometria de placas paralelas e outros não. Corrigan e Golalipour (2016) comentaram que problemas com a geometria de placas paralelas envolvem: efeito de borda, interações das partículas, granulometria, inchamento e porcentagem.

Vários estudos abordaram a avaliação do impacto do tamanho da partícula de borracha nas propriedades de asfalto-borracha (Subhy, Lo Presti e Airey (2015), Camargo (2016), Nunes (2017), Jones *et al.* (2017), Fengler (2018), Gaspar (2019), Bredenhann *et al.* (2020), entre outros). Ainda não existe uma normalização quanto a este item (75 $\mu$ m até 2.36mm) sem distinção do que é fino ou graúdo. No entanto, Jones *et al.* (2017) concluem que tempo de digestão, ângulo de fase e resistência à fadiga reduzem com o menor tamanho da partícula, enquanto a estabilidade à estocagem, viscosidade, rigidez, resistência a deformação permanente aumentam com o decréscimo do tamanho de partícula.

Conforme relatado por Bukowski (2014), além do tamanho de partícula, o processo para mistura dos péletes em termos de agitação e temperatura pode não ser suficiente para a digestão e inchamento da borracha, acarretando a presença de matéria particulada. Asfaltos-borracha, assim produzidos, podem ocasionar propriedades reológicas de baixo desempenho.

Os péletes de asfalto-borracha utilizados neste trabalho se apresentaram como sendo um produto bastante heterogêneo, com configuração das partículas de tamanhos variados. A granulometria dos grãos de borracha e demais aditivos, talvez, tenham causado impacto nos ensaios com o DSR.

#### **4.2.3 LAS (*Linear Amplitude Sweep*)**

Os critérios para classificação de ligantes a partir do ensaio LAS avaliam a resistência à fadiga. A Tabela 28 apresenta os parâmetros  $m$ ,  $\alpha$ , C1, C2, Df, coeficientes A e B, e FFLPSE, obtidos no ensaio de LAS.

O parâmetro B depende do valor de  $\alpha$ , calculado a partir da inclinação da reta ( $m$ ). Os menores valores de  $m$  obtidos para os ligantes modificados desta pesquisa sugerem que são menos sensíveis à amplitude de deformação do que o convencional.

Tabela 28 - Coeficientes obtidos no ensaio de LAS para os ligantes estudados nesta pesquisa

Ligantes asfálticos	Inclinação da reta	Parâmetro	Coeficientes de regressão		Dano na ruptura	Coeficientes da curva de fadiga		Fator de fadiga - ligante
	<i>m</i>	$\alpha$	C1	C2	Df	A	B	Método PSE
50/70	0,69	1,45	0,064	0,540	78,0	2,12E+05	-2,89	1,39
AB-08	0,50	2,00	0,140	0,360	197,0	4,32E+07	-4,02	1,98
50/70 + 20% PPP	0,61	1,64	0,080	0,50	78,5	4,50E+05	-3,28	1,46
50/70 + 30% PPP	0,58	1,70	0,084	0,49	80,5	6,73E+05	-3,44	1,5
50/70 + 20% PP	0,61	1,65	0,083	0,50	81,0	5,01E+05	-3,31	1,47
50/70 + 30% PP	0,56	1,80	0,087	0,47	96,8	1,53E+06	-3,60	1,59

Fonte: Maia *et al.* (2023)

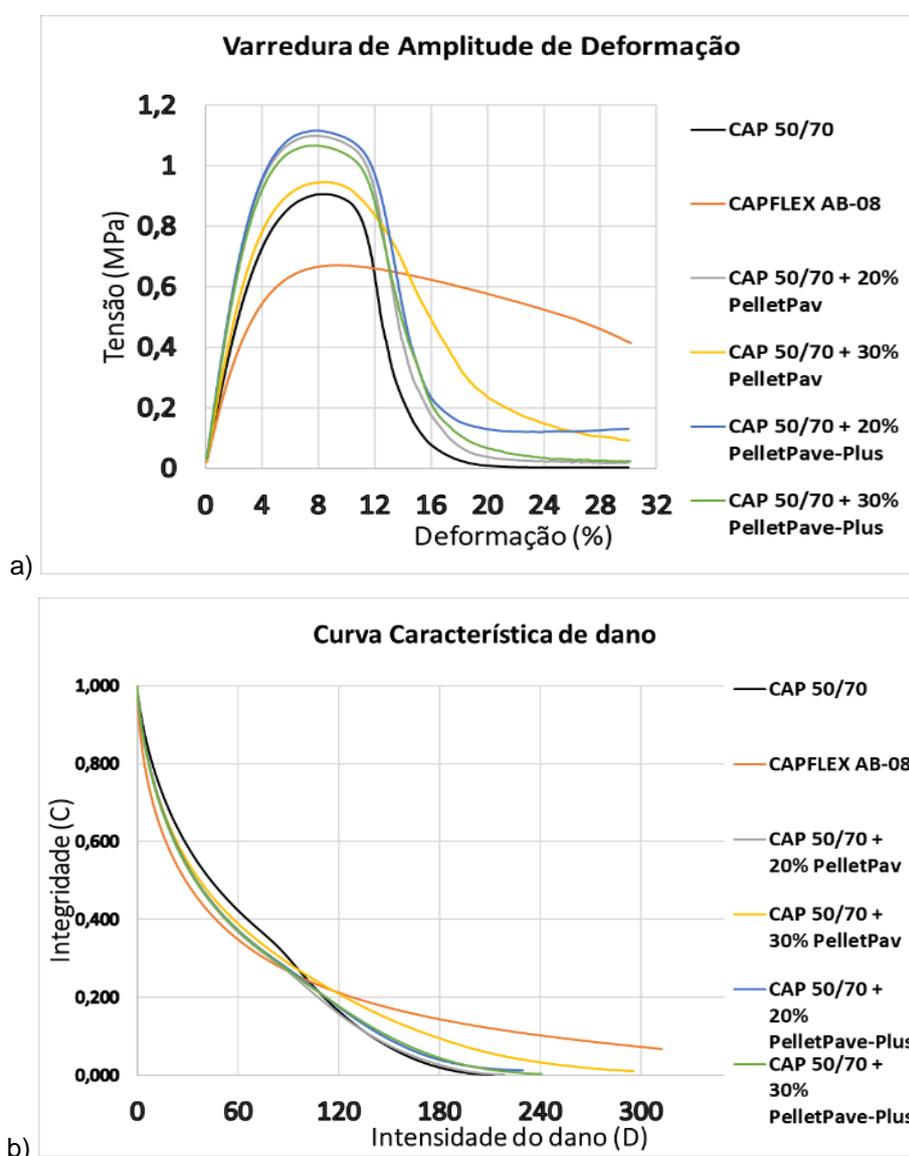
Para os ligantes modificados observa-se um acréscimo no parâmetro A e um decréscimo no B com relação ao 50/70, também observado por Nuñez (2013), Martins (2014), Camargo (2016), Nunes (2017) e Wang *et al.* (2018). O incremento em A significa que o material manteve sua integridade inicial. O AB-08 apresentou o maior valor para o parâmetro A, seguido dos demais ligantes modificados que mostraram um discreto aumento. O decréscimo em B indica maior vida de fadiga para os ligantes modificados. O AB-08 apresentou o maior decréscimo em B, seguido dos modificados por 30% de péletes.

A Figura 84 (a) ilustra as curvas de tensão *versus* deformação cisalhante dos ligantes desta pesquisa. No estágio inicial a tensão de cisalhamento aumenta linearmente com o acréscimo da deformação para todos. Quando entram na região não linear os picos de tensão são alcançados em diferentes níveis de deformação. A tensão de cisalhamento aplicada no 50/70 aumenta quando amplitude da deformação aumenta. Os asfaltos-borracha apresentam pico de tensão em maiores amplitudes de deformação do que o ligante convencional, indicando maior resistência ao dano.

Zhao *et al.* (2023) realizaram o ensaio de LAS na temperatura de 25°C e verificaram que o ligante base (60/80 pen) atingiu primeiro o valor máximo de tensão e depois caiu rapidamente, enquanto os ligantes modificados por péletes de asfalto-borracha mantiveram altos níveis de tensão por um longo período de tempo, após atingir o valor de pico, e depois caíram. Esta tendência também foi identificada nos ligantes deste estudo, conforme consta na Figura 84 (a).

Conforme relatado por Maia *et al.* (2023), os ligantes modificados desta pesquisa, exceção do AB-08, apresentaram maiores picos de tensão do que o 50/70, para amplitudes de deformação similares. Os ligantes com péletes apresentaram uma discreta melhoria na vida de fadiga comparados ao convencional, mas o AB-08 apresentou o melhor comportamento. A curva característica de dano, Figura 84 (b), mostra que a Integridade dos materiais diminuiu com o aumento da Intensidade do dano.

Figura 84 - a) Curva tensão versus deformação, b) Curva característica de dano do ensaio LAS



Ressalta-se que foi identificada alta rigidez dos ligantes modificados com péletes de asfalto-borracha, registrado pelo  $|G^*|_{ini}$  do LAS a 19°C, sendo superior ao ligante CAP 50/70. Provavelmente, devido ao alto teor de cal, cimento, gilsonita e *shingles* presentes nas pelotas. Este fato justifica os resultados desfavoráveis nos ensaios de MSCR e LAS.

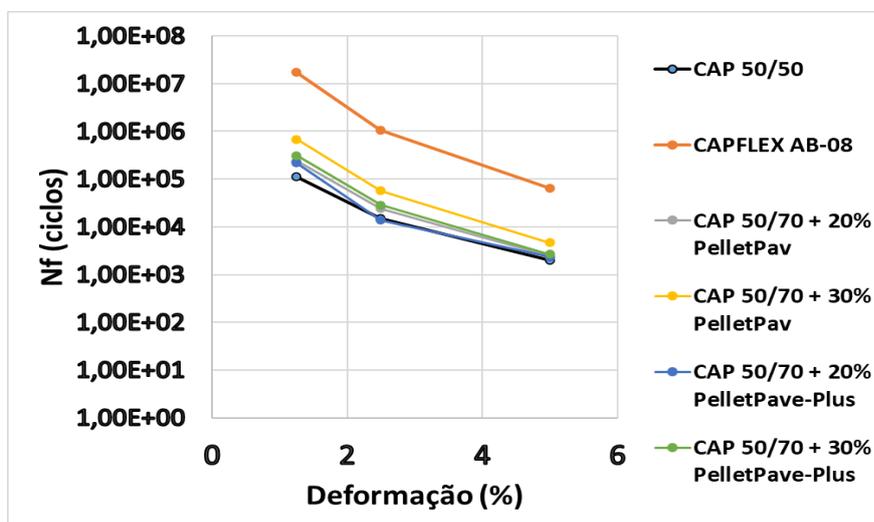
Na Tabela 29 e na Figura 85 apresenta-se o resultado do comportamento à fadiga, em função de três níveis de deformação (1,25%, 2,5% e 5,0%) na faixa da viscoelasticidade linear. O Fator de Fadiga do Ligante (FFL) foi previsto pelo método PSE (CENPES).

Tabela 29 - Parâmetros obtidos no ensaio de LAS para os ligantes estudados nesta pesquisa

Ligantes asfálticos	A	B	$N_f 1,25\%$	$N_f 2,5\%$	$N_f 5\%$	$FFL_{PSE}$
LAC	2,12E+05	-2,89	1,11E+05	1,48E+04	1,99E+03	1,39
LABC	4,32E+07	-4,02	1,75E+07	1,06E+06	6,45E+04	1,98
LAC + 20% PPP	4,50E+05	-3,28	2,18E+05	1,38E+04	2,32E+03	1,46
LAC + 30% PPP	6,73E+05	-3,44	3,12E+05	2,87E+04	2,64E+03	1,5
LAC + 20% PP	5,01E+05	-3,31	2,40E+05	2,42E+04	2,45E+03	1,47
LAC + 30% PP	1,53E+06	-3,6	6,84E+05	5,65E+04	4,67E+03	1,59

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 85 - a) Vida de fadiga ( $N_f$ ) em função da deformação cisalhante para os ligantes estudados nesta pesquisa.



Fonte: Maia *et al.* (2023)

Foi constatado que, em média, o ligante asfáltico AB-08 e os ligantes modificados com péletes de asfalto-borracha resultaram em valores de vida de fadiga (Nf) mais elevados, quando comparados com o CAP 50/70. Porém, evidencia-se o ligante asfáltico AB-08, com comportamento bastante superior.

#### 4.3 DISPOSITIVO EXTRATOR DE FUMOS – DEC

Para a verificação do potencial de emissão de fumos foram analisadas as duas amostras de péletes de asfalto-borracha deste estudo (cap 50/70+30% PP e CAP 50/70 + 30%PPP e comparadas com o CAP 50/70 e o AB-08. Na Tabela 30 constam os resultados do ensaio de emissões de gases realizados no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM utilizando o Dispositivo Extrator Coletor de Fumos – DEC.

A técnica de avaliação foi realizada por meio da espectrometria de massas acoplada à cromatografia líquida, conforme indicado em Ferraz (2015). Os resultados são apresentados em mg/kg, unidade comumente utilizada para esses tipos de compostos.

Foram identificados 6 HPA's sulfurados (SHPA's) nas amostras estudadas. Esses SHPA's são frequentes em outros ligantes asfálticos (REGAP, REFAP, LUBNOR e AMP) estudados na UFSM e confirmam a presença destes em fumos produzidos por asfaltos em laboratório.

Os HPA's nitrogenados não foram detectados nos ligantes, sendo que duas espécies (Nitronafteno e Nitropireno) aparecem frequentemente em ligantes asfálticos e fumos de asfaltos.

Como esperado, as formas metiladas, dimetiladas e trimetiladas aparecem nos ligantes de forma onipresente.

Uma análise comparativa dos ligantes e seus fumos gerados em laboratório permitiu concluir que o CAP 50/70 30% + PP e o CAP 50/70 + 30% PPP apresentaram níveis de emissão menores do que o ligante AB-08, ao se considerar o somatório dos HPA's encontrados e quantificados nas amostras.

Este pode ser considerado um ponto positivo para esta técnica de aproveitamento dos péletes de borracha.

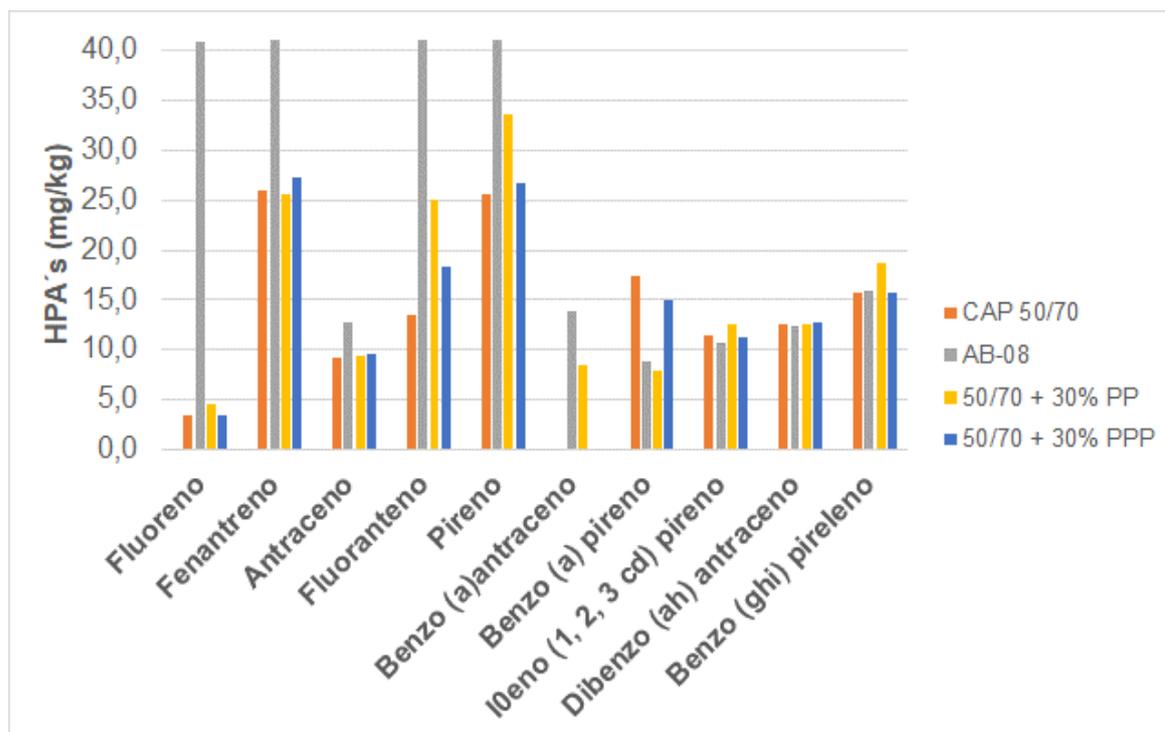
Tabela 30 - Resultados dos ensaios de emissão de gases realizados no DEC

<b>Ligantes asfálticos</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>AB-08</b>	<b>50/70 + 30% PP</b>	<b>50/70 + 30% PPP</b>
<b>SHPA (mg/kg)</b>				
Feniltiofenos	nd	0,0194	nd	nd
Metilbenzotiofenos	0,877	0,995	0,745	0,643
Dimetilbenzotiofenos	0,0213	0,0365	0,0208	0,017
Dibenzotiofeno	nd	nd	nd	0,0163
Acenafto (1, 2-b) tiofeno	0,0134	0,0154	0,015	0,0155
2, 3, 7 Trimetilbenzo (b) tiofeno	0,0604	0,1135	0,0483	0,066
Dimetildibenzotiofeno	nd	nd	nd	nd
<b>NHPA (mg/kg)</b>				
Nitronaftaleno	nd	nd	nd	nd
Nitropireno	nd	nd	nd	nd
<b>∑SHPAs + NHPAs</b>	0,975	1,179	0,829	0,758
<b>HPAs (mg/kg)</b>				
Fluoreno	3,37	40,99	4,46	3,37
Fenantreno	25,96	77,53	25,63	27,33
Antraceno	9,16	12,67	9,32	9,49
Fluoranteno	13,46	44,22	25,12	18,43
Pireno	25,69	48,12	33,58	26,72
Benzo (a)antraceno	0,00	13,8	8,42	0,00
Benzo (a) pireno	17,43	8,9	7,98	15,04
Indeno (1, 2, 3 cd) pireno	11,5	10,64	12,51	11,25
Dibenzo (ah) antraceno	12,49	12,37	12,48	12,82
Benzo (ghi) pireleno	15,77	15,88	18,67	15,75
<b>∑HPAs</b>	134,85	266,04	177,3	140,61
<b>∑HPAs + SHPAs + NHPAs</b>	135,82	267,22	178,13	141,36

Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico da Figura 86 evidencia os níveis de emissão dos HPA's por tipo de ligante asfáltico desta pesquisa.

Figura 86: Níveis de emissão de HPA's dos ligantes estudados nesta pesquisa



Fonte: Autoria própria (2023)

Os níveis de emissão do benzo (a) pireno, enquadrado na categoria 1 da IARC (2013), com potencial cancerígeno, foram mais acentuados para o CAP 50/70. O dibenzo (ah) antraceno (classe 2A da IARC - 2013), também com efeito deletério à saúde humana, apresentou magnitude similar para todos os ligantes ensaiados.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

##### 4.4.1 Dados volumétricos e mecânicos das dosagens

O ligante usado para a confecção das misturas asfálticas correspondeu, em princípio, ao CAP 50/70 + 30% de PPP, modificado no laboratório de ligantes, por meio do misturador (agitador) de ligantes modificados, agitados por aproximadamente uma hora na temperatura de 170°C. A curva granulométrica foi descontínua do tipo *gap graded*. Os teores de ligante totais adotados foram de 7% a 9%, variando 0,5% entre eles, conforme mostram as Figuras 87, 88, 89 e 90.

Figura 87 - Corpos de prova confeccionados considerando 30% de pélete, com relação à massa total do ligante e teor de 9,0% de ligante



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 88 - Corpos de prova confeccionados considerando 30% de pélete, com relação à massa total do ligante e teor de 8,5% de ligante



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 89 - Corpos de prova confeccionados considerando 30% de pélete, com relação à massa total do ligante e teor de 8,0% de ligante



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Figura 90: Corpos de prova confeccionados considerando 30% de pélete, com relação à massa total do ligante e teor de 7,5% de ligante



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Foi constatado que os péletes não obtiveram uma boa homogeneidade com os agregados e o ligante. Não houve trabalhabilidade das misturas dosadas, as quais demonstraram difícil manuseio. Após a compactação dos corpos de prova, percebeu-se que ocorreu a formação de uma película adesiva na superfície deles, conforme pode ser visto na Figura 91.

Figura 91 - Formação de película na superfície de um corpo de prova



Fonte: Laboratório da COPPE/UFRJ (2021)

Adiante, na Tabela 31, mostram-se os parâmetros volumétricos das dosagens realizadas com corpos de prova de 100mm de diâmetro utilizando os ligantes modificados por péletes de asfalto-borracha retromencionados. Foram realizados os Gmms de todos os teores e os Vv% ficaram muito abaixo de 4%, critério de determinação do teor para esse tipo de mistura asfáltica. Inferiu-se que a quantidade de ligante pode ter ocasionado uma superfície externa muito fechada, o que poderia justificar o volume de vazios baixo.

Diante dos resultados encontrados, também foi realizado um teste com teor total de ligante de 5,5% (modificado por CAP 50/70 + 30% PPP). A Tabela 32 mostra os parâmetros volumétricos de dosagem obtidos.

Tabela 31 - Dados volumétricos e mecânicos da dosagem de 30% de PPP + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha)

Nº DO CORPO DE PROVA		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	MEA	Ensaio	MR (MPa)	MR Médio (MPa)	RT (MPa)	RT Médio (MPa)	TEOR (%)	Gmm	Vv (%)
Lab	Proj											
24349	13	6,24	10,00	2,523	MR/RT	9906	9597	2,39	2,30	7,0	2,545	Não identificado
24350	14	6,34	10,01	2,508		8711		2,26			2,545	1,4
24351	15	6,37	10,01	2,505		10175		2,25			2,545	1,6
24337	1	6,18	10,01	2,531		9325	9500	2,08	2,13	7,5	2,535	Não identificado
24338	2	6,21	10,01	2,529		10842		2,11			2,535	Não identificado
24339	3	6,18	10,02	2,539		8334		2,20			2,535	Não identificado
24340	4	6,24	10,01	2,520		9266	9038	2,04	2,10	8,0	2,518	Não identificado
24341	5	6,25	10,01	2,517		8024		2,07			2,518	Não identificado
24342	6	6,24	10,01	2,518		9825		2,18			2,518	Não identificado
24343	7	6,30	10,01	2,497		5641	5925	2,10	1,72	8,5	2,497	Não identificado
24344	8	6,27	10,02	2,478		6208		1,91			2,497	Não identificado
24345	9	6,30	10,03	2,488		5926		1,16			2,497	Não identificado
24346	10	6,10	10,02	2,523		5587	5854	1,42	1,73	9,0	2,475	Não identificado
24347	11	6,13	10,01	2,521		5942		1,86			2,475	Não identificado
24348	12	6,15	10,02	2,513		6034		1,91			2,475	Não identificado

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 32 - Dados volumétricos da dosagem de 30% de PPP + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha)

Nº DO CORPO DE PROVA		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	MEA	Ensaio	TEOR (%)	Gmm	Vv (%)
Lab	Proj							
24367	1	6,77	10,14	2,305	DOSAGEM	5,5	2,610	11,7
24368	2	6,70	10,10	2,344			2,610	10,2
24369	3	6,69	10,08	2,363			2,610	9,5

Fonte: Autoria própria (2023)

Os volumes de vazios (Vv%) apresentaram valores muito elevados (aproximadamente 10%) e os agregados graúdos não ficaram totalmente cobertos pelo ligante, mesmo deixando um tempo a mais na usinagem. Isso também foi observado no teor de 7%.

Diante do exposto, foram moldados dois corpos de prova com diâmetro de 150 mm, usualmente utilizado na metodologia *Superpave*, visando obter uma massa mais

homogênea. Dessa forma, foi possível avaliar o Vv (%) dos corpos de prova com 150mm (teor de 8%) e, em seguida, extrair corpos de prova menores (6,2 cm de altura x 10 cm de diâmetro) do centro deles. Os resultados podem ser vistos na Tabela 33.

Tabela 33 - Dados volumétricos da dosagem de 30% de *PelletPave-Plus* + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha) com cp's de 150mm de diâmetro e amostras extraídas dos centros destes cp's

Nº DO CORPO DE PROVA		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	MEA	Ensaio	Teor (%)	Gmm	Vv (%)
Lab	Proj							
24365	1	10,96	15,03	2,439	TESTE	8,0	2,518	3,1
24366	2	10,89	15,03	2,448			2,518	2,8
24365	1	6,22	10,03	2,506			2,518	0,5
24366	2	6,21	10,05	2,517			2,518	0,0

Fonte: Autoria própria (2023)

No caso dos corpos de prova com 150mm os volumes de vazios (Vv%) ficaram mais próximos do volume de vazios alvo (4%). Porém, os corpos de prova extraídos apresentaram uma redução significativa em relação ao Vv% previsto.

Diante dos resultados encontrados, optou-se, para a formulação das misturas de asfalto-borracha, por pesar o pélete previamente e adicioná-lo na forma seca ao agregado durante o estágio de aquecimento da mistura seguido da quantidade requerida de ligante asfáltico, conforme estudo de Al-Baghli (2022). Cabe mencionar que o pélete adicionado via seca também não se dispersou de forma adequada e uniforme por toda a massa, mesmo após aplicar alta temperatura contínua na mistura.

A Tabela 34 mostra os resultados dos dados volumétricos e mecânicos das dosagens de 25% *PelletPave-Plus* (com relação à massa total de ligante) aquecido junto com o agregado e no teor total de 7,05%.

Tabela 34 - Dados volumétricos e mecânicos da dosagem de *PelletPave-Plus* aquecido junto com o agregado

Nº DO CORPO DE PROVA		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	MEA	MR (MPa)	MR médio (MPa)	RT (MPa)	RT médio (MPa)	Teor (%)	Gmm	Vv alvo (%)	Vv (%)
Lab	Proj											
25030	1	6,35	10,01	2,46	6670	6455	1,5	1,04	7,05	2,584	4,0	4,6
25031	2	6,46	10,01	2,44	6306		0,9			2,584	4,0	5,3
25032	3	6,37	10,01	2,45	6390		0,7			2,584	4,0	4,8

Fonte: Autoria própria (2023)

As amostras apresentaram volume de vazios adequados para o teor total de 7,05% e 2,5% de PPP (com relação à massa total do ligante). Foram identificados baixos valores de resistência à tração, sugerindo um material de comportamento frágil. Talvez a quantidade de cimento presente na composição dos péletes de asfalto-borracha possa ter contribuído para estes resultados.

Os valores do módulo de resiliência com média de 6455MPa são superiores aos identificados pela literatura específica de asfalto-borracha. De qualquer forma, isoladamente, o MR não fornece conclusões significativas.

#### 4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo avaliou as características físicas e reológicas de um CAP 50/70 modificado com adição de péletes de asfalto-borracha (PP e PPP) nas proporções de 20% e 30%, com relação à massa total de ligante asfáltico. Foi realizada também uma análise comparativa dos ligantes e seus fumos gerados em laboratório. Posteriormente, houve a execução de tentativas de dosagem para misturas asfálticas modificadas com péletes de asfalto-borracha (via úmida e seca).

Os valores de viscosidade rotacional a 177°C de todas as amostras de ligantes modificados com péletes de asfalto-borracha apresentaram-se inferiores aos limites requeridos pela ASTM 6114. Os ligantes modificados com 20% de péletes (PP e PPP) mostraram valores de viscosidade muito próximos ao CAP 50/70. Os resultados de penetração também foram similares ao ligante convencional, indicando um baixo teor de borracha e/ou SBS na composição desses péletes.

As amostras de ligantes modificados com adição de 20% de PP e 20% de PPP apresentaram resultados satisfatórios, contradizendo os dados dos ligantes modificados por 30% de PPP e 30% de PP, os quais exibiram dados de estabilidade a estocagem desfavoráveis.

O AB-08 apresentou PG 82. Para os ligantes modificados com incorporação de 20% de PPP e PP, os resultados indicaram PG 70 e PG 64, respectivamente. Os ligantes modificados com adição de com 30% de PPP e PP mostraram PG 70.

As amostras de CAP 50/70 com 20% de péletes (PP e PPP) apresentaram estabilidade à estocagem satisfatória e as com 30% de péletes (PP e PPP) não

demonstraram comportamento favorável à estocagem, porém no DSR indicaram PG 70.

Com relação aos parâmetros de recuperação e compliância não recuperável no ensaio de MSCR, não foi verificada grande melhoria para os ligantes modificados por péletes de asfalto-borracha quando comparados ao ligante CAP 50/70. O ligante asfalto-borracha AB-08 apresentou o maior valor de recuperação sob tensão e o menor valor de compliância não recuperável, dentre todos os ligantes estudados.

No ensaio de LAS dos ligantes modificados observou-se um acréscimo no parâmetro A e um decréscimo no parâmetro B, com relação ao CAP 50/70. Isto indica maior vida de fadiga para os ligantes modificados. No entanto, cabe destacar que o aumento foi discreto para as amostras modificadas com péletes de asfalto-borracha, quando comparado aos resultados do ligante AB-08. Identificou-se alta rigidez dos ligantes modificados com péletes de asfalto-borracha, registrado pelo  $|G^*|_{ini}$  do LAS a 19°C, sendo superior ao ligante CAP 50/70. Provavelmente, devido ao alto teor de cal, cimento, gilsonita e *shingles* presentes na composição das pelotas.

A análise comparativa dos ligantes e seus fumos gerados em laboratório mostrou que os ligantes CAP 50/70 + 30% PP e CAP 50/70 + 30% PPP exibiram níveis de emissão menores, se considerarmos o somatório dos HPA's encontrados e quantificados nas amostras, em comparação ao AB-08.

Foram realizadas tentativas de dosagem de misturas asfálticas via úmida (incorporando os péletes ao ligante asfáltico convencional) e via seca (aquecendo os péletes junto com os agregados) variando o teor de ligante (entre 7% e 9%) e mantendo a mesma curva granulométrica do tipo *Gap-Graded*.

As dosagens realizadas nos corpos de prova de 100mm de diâmetro utilizando ligante modificado por péletes de asfalto-borracha (via úmida) apresentaram volume de vazios - Vv% muito abaixo de 4%. Para os corpos de prova moldados com 150mm de diâmetro os Vv% ficaram mais próximos do volume de vazios alvo. Porém, os corpos de prova extraídos do centro deles apresentaram uma redução significativa em relação ao Vv% previsto.

Por fim, a dosagem de 25% *PelletPave-Plus* (com relação à massa total de ligante e corpos de prova de 100mm) aquecido junto com o agregado e no teor total de 7,05% foi a que apresentou Vv próximo a 4%.

## 5 CONCLUSÕES

A seguir, destacam-se as principais conclusões obtidas nesta pesquisa, enfatizando os aspectos vinculados aos objetivos específicos, a saber: 1º) Comparar os resultados dos ensaios de caracterização física e reológica (ASTM 6114/19, ASTM 8239/21, DNIT 439/2022) realizados nas amostras de CAP 50/70 + 20% PP, CAP 50/70 + 30% PP, CAP 50/70 + 20% PPP e CAP 50/70 + 30% PPP com o ligante AB-08 – apresentam-se conclusões referentes aos parâmetros obtidos; 2º) Aplicar metodologia (Ferraz, 2015) para a detecção de gases de efeito estufa (GEE) – listam-se às inferências sobre as correlações entre os níveis de substâncias deletérias produzidas pelos ligantes asfálticos estudados neste trabalho; 3º) Realizar dosagens para estabelecer os parâmetros volumétricos de misturas asfálticas confeccionadas com péletes de asfalto-borracha (via úmida e seca) e curva granulométrica descontínua do tipo *gap graded* – mostram-se os resultados verificados, conforme descrito adiante.

### **Quanto ao processo de modificação do ligante base (CAP 50/70) com adição de péletes de asfalto-borracha:**

- Nesta pesquisa não ficou nítido o mecanismo que ocorre durante a modificação do ligante base (CAP 50/70) por meio da incorporação de péletes de asfalto-borracha (PP e PPP) nas proporções pré-definidas (20% e 30%, com relação à massa total do ligante).
- Percebeu-se que não houve uma boa dispersão dos péletes no ligante asfáltico CAP 50/70 e os resultados mostraram que os péletes de asfalto-borracha (PP e PPP) consistem em produtos bastante heterogêneos, com configuração das partículas de tamanhos variados.

### **Quanto aos ensaios de caracterização física (ASTM 6114/19):**

- Os valores de viscosidade rotacional a 177°C de todas as amostras de ligantes modificados com péletes de asfalto-borracha apresentaram-se inferiores aos limites requeridos pela ASTM 6114.

- Os ligantes modificados com 20% de péletes (PP e PPP) mostraram valores de viscosidade próximos ao CAP 50/70.
- Os resultados do ensaio de penetração também foram similares ao ligante convencional (CAP 50/70), indicando um baixo teor de borracha e/ou SBS na composição desses péletes.
- Com relação ao ensaio de estabilidade à estocagem, as amostras de ligantes modificados com adição de 20% de PP e 20% de PPP apresentaram resultados satisfatórios, contradizendo os dados dos ligantes modificados por 30% de PPP e 30% de PP, os quais exibiram dados de estabilidade a estocagem desfavoráveis.

**Quanto aos ensaios de caracterização reológica utilizando o equipamento de DSR (ASTM 7175/15, ASTM 8239/21, DNIT 439/2022):**

- Para os ligantes modificados com incorporação de 20% de PPP e PP, os resultados de grau de desempenho indicaram PG 70 e PG 64, respectivamente. Os ligantes modificados com adição de com 30% de PPP e PP mostraram PG 70. O AB-08 apresentou o maior grau de desempenho, sendo PG 82.
- As amostras de CAP 50/70 + 20% PP e CAP 50/70 + 20% PPP demonstraram estabilidade à estocagem satisfatória e as amostras de CAP 50/70 + 30% PP e CAP 50/70 + 30% PPP não exibiram comportamento favorável à estocagem, porém no DSR indicaram PG 70.
- No ensaio de MSCR foi identificada baixa recuperação elástica dos ligantes modificados por péletes de asfalto-borracha com relação ao ligante AB-08, para os dois níveis de tensão, provavelmente devido ao teor reduzido de borracha e SBS. Apenas o ligante CAP 50/70 + 30% PP exibiu incremento nos resultados de recuperação nos dois níveis de tensão, quando comparado ao ligante AB-08. O ligante asfalto-borracha AB-08 apresentou o maior valor de recuperação sob tensão e o menor valor de compliância não recuperável, dentre todos os ligantes estudados.
- No ensaio de LAS verificou-se elevada rigidez dos ligantes modificados com péletes de asfalto-borracha, registrado pelo  $|G^*|_{ini}$  do LAS a 19°C, sendo superior ao ligante CAP 50/70. Provavelmente, devido ao alto teor de cal, cimento, gilsonita e *shingles* presentes na composição das pelotas.

- No ensaio de LAS houve um acréscimo na vida de fadiga dos ligantes modificados com péletes, de asfalto-borracha, no entanto, cabe destacar que o aumento foi discreto, quando comparado aos resultados do ligante AB-08.
- O ligante asfáltico AB-08 se comportou muito bem quanto à deformação permanente e à fadiga, sendo melhor que os péletes de asfalto-borracha utilizados nesta pesquisa. No entanto, os ensaios realizados nos ligantes modificados com péletes não foram conclusivos.
- A granulometria dos grãos de borracha e demais aditivos podem ter causado impacto nos ensaios com o DSR. A limitação em 250µm para o maior tamanho de partícula de borracha se baseia no fato do ensaio requerer que o tamanho da partícula máxima seja menor que  $\frac{1}{4}$  do espaçamento (FHWA, 2014; Mturi *et al.*, 2014).
- É importante averiguar se o tamanho das partículas de borracha e aditivos dos péletes causaram interferência nos ensaios no DSR, visto que os ligantes modificados foram comparados ao asfalto-borracha do tipo *terminal blending* estocável (AB-08), onde o tamanho de partícula é menor. Há discussões quanto ao uso no DSR para asfalto-borracha por haver partículas maiores que o espaço destinado ao ligante na geometria placa/placa. Muitos autores usaram a geometria de cilindros concêntricos para melhor avaliar asfaltos com péletes.

#### **Quanto ao ensaio para detecção de gases de efeito estufa (GEE):**

- Os péletes de asfalto-borracha desta pesquisa produziram níveis menores de emissões de gases, quando comparados ao somatório dos HPA's emitidos pelo AB-08. Porém, as substâncias com maiores potenciais cancerígenos ao ser humano (benzo (a) pireno/ dibenzo (ah) antraceno) mostraram magnitudes similares. Esta constatação pode ser considerada um ponto positivo para esta técnica de aproveitamento dos péletes de borracha.
- O asfalto-borracha, por requerer maiores temperaturas para sua usinagem e compactação, tende a gerar níveis elevados de fumos de asfalto. As emissões de gases do efeito estufa (GEE) são, em geral, um parâmetro utilizado para avaliar a sustentabilidade ambiental.

### Quanto à dosagem das misturas asfálticas:

- As dosagens realizadas nos corpos de prova de 100mm de diâmetro utilizando ligante modificado por péletes de asfalto-borracha (via úmida) apresentaram volume de vazios - Vv% muito abaixo de 4%. Para os corpos de prova moldados com 150mm de diâmetro os Vv% ficaram mais próximos do volume de vazios alvo. Porém, os corpos de prova extraídos do centro deles apresentaram uma redução significativa em relação ao Vv% previsto.
- A dosagem de 25% *PelletPave-Plus* (com relação à massa total de ligante e corpos de prova de 100mm) aquecido junto com o agregado e no teor total de 7,05% foi a que apresentou Vv próximo a 4%.
- As misturas asfálticas confeccionadas com péletes de asfalto-borracha demonstraram difícil manuseio e trabalhabilidade, tanto pela via seca como pela via úmida. Destaca-se que em todas as tentativas do uso de 30% de péletes nas misturas asfálticas os resultados não foram adequados para o seu uso em laboratório e campo.

No Brasil, o transporte rodoviário é preponderante, sendo um dos grandes contribuidores para a geração de gases deletérios à atmosfera. A ideia de não consumir energia no armazenamento dos péletes é interessante, mas há a necessidade de otimização do desempenho deles.

Há muitas variáveis a serem compatibilizadas que podem ser ajustadas de forma a se optar pela melhor proporção entre péletes e os vários ligantes asfálticos convencionais. A proposta de incorporação de péletes de asfalto-borracha ao ligante base pode ser realizada de forma mais adequada, em vários arranjos, o que tende a viabilizar o uso do asfalto-borracha nas obras.

O Brasil deve produzir seus próprios péletes em território nacional, para ter o benefício do transporte a frio, conferindo descarte adequado aos seus resíduos. A importação não se justifica, principalmente no que concerne à qualidade e ao custo do produto. Além do mais, espera-se que o pleno conhecimento dos componentes constituintes dos péletes contribua para a compreensão do mecanismo de incorporação do ligante base com os péletes, assim como, o seu desempenho.

O uso de asfalto-borracha é uma alternativa viável para compor estruturas de pavimento asfáltico que demandem modificações do ligante convencional. A aplicação

da borracha na forma de pélete pode simplificar muitos aspectos construtivos e de fabricação do ligante modificado, porém esta metodologia precisa ser analisada inicialmente em laboratório e, em seguida, no campo, em escala maior.

#### 5.1 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

- Averiguar se o tamanho das partículas de borracha e aditivos dos péletes causaram interferência nos ensaios no DSR utilizando a geometria de cilindros concêntricos. Não há efeitos de borda; o formato permite o preenchimento exato do volume da amostra, evitando o escorrimento para fora da base da geometria quando submetida a temperaturas mais elevadas e com menores valores de desvio padrão;
- Realizar ensaios especiais para verificar os polímeros da borracha, teor e presença de outros polímeros e fíler (microscopia de força atômica – AFM, termogravimetria – TG, Calorimetria exploratória diferencial – DSC, Fluorescência de raios X, Ressonância nuclear magnética, entre outros);
- Entender o processo de dosagem das misturas asfálticas modificadas com péletes;
- Observar o desempenho de misturas produzidas com péletes em estruturas de pavimento para concluir quais se aplicariam melhor em várias situações de projeto;
- Desenvolver uma configuração de pélete de asfalto-borracha para fabricação nacional, com pleno conhecimento de seus componentes.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO M 323: *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. Washington, DC. (2013).
- AASHTO M 320: *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. Washington, DC. (2017).
- AASHTO M 332-21: *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. Washington, DC. (2021).
- AASHTO T 315: *Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D. C. (2012).
- AASHTO T 391: *Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*. Washington, DC. (2020).
- AASHTO TP 101-12: *Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*. Washington, DC. (2018).
- AASHTO TP 107: *Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Concrete from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*. Washington, DC. (2014).
- ABNT NBR 7217- Agregados - Determinação da composição granulométrica.
- ABNT NBR 15235. Materiais Betuminosos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2009.
- AIREY, G.D., “*Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens*”, PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 1997.
- AJAYI, S. O. et al. *Optimising material procurement for construction waste minimization: An exploration of success factors*. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 11, p. 38–46, 2017.
- AL-BAGHLI, H. *Characterization and Design of a Crumb Rubber Modified Asphalt Mix*. Formulation Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:14, No:2, 2020.
- AL-BAGHLI, H. (2022) “*Optimizing PelletPAVE™ Rubberized Asphalt Mix Design Using Gyrotory Compaction and Volumetrics*” - World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Urban and Civil Engineering Vol:16, No:3, 2022.
- AL-BAGHLI, H.; AWADH, Z.S.; ZOOROB, S.E.(2022) “*Rubberized asphalt pilot road trial in Kuwait*” – International conference on rehabilitation and maintenance in civil engineer ICRME2021 Proceedings of the 5th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering.
- ALFAYEZ, S.; SULEIMAN, A. R. E NEHDI, M. L. *Recycling tire rubber in asphalt pavements: state of the art*. Sustainability. MDPI (2020).
- AMIRKHANIAN, S. N. 2015. *Progress Research Report. China experience: laboratory and field, results*.
- AMIRKHANIAN, S. N, F. XIAO, F, SOCKWELL, K. *Performance properties of polymer modified pelletized asphalt mixtures*, Proc. of the 2015 Int. Airfield and Highway Pavements Conference, ASCE, pp. 120-130 (2015).

AMIRKHANIAN, S.N. *The use of pelletized asphalt rubber as an alternative to the process blending system*. Asphalt Rubber, 2018, Arizona/USA.

ANDRIETTA, A.J., 2002. Pneus e Meio ambiente: Um grande problema requer uma grande solução. [www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipeus.htm/](http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipeus.htm/) Acesso em: junho de 2020.

ARTERIS. Relatório Fotográfico de execução das Operações de Manutenção na Rodovia BR-381/SP - Concessionária Arteris, 2015.

ASTM. American Society for Testing and Materials. ASTM D8239/2021: “*Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using the Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*”.

ASTM. American Society for Testing and Materials. ASTM D7369/2011: “*Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension test*”.

ASTM. American Society for Testing and Materials. ASTM D8-02: “*Road and Paving Materials*”.

ASTM. American Society for Testing and Materials. ASTM D6114/2019: “*Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder. American Society for Testing Materials*”.

ASTM. American Society for Testing and Materials. ASTM D6373/2016: “*Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*”.

ASTM. American Society for Testing and Materials. ASTM D7175/2015b: “*Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*”.

ASTM. American Society for Testing and Materials. ASTM 7405/2020: “*Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*”.

ASTM. American Society for Testing and Materials. ASTM D1754/2009: “*Standard Test Method For Effects of Heat and Air On Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)*”.

BAILEY, W.R. (2010). *Rubberized Asphalt Pellets* - Patent US-2010/0056669-A1.

BARNES, H., HUTTON, J., WALTERS, K., “*An Introduction to Rheology*”, Elsevier Publishers, Amsterdam, 1989.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B., Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, PETROBRAS/ABEDA, 2022.

BERNUCCI, L. B., PINHEIRO, G. S.; RODRIGUES, J. A.; SAVASINI, K. V.; PEREIRA, G. S. Avaliação do efeito do gap da geometria de placas paralelas no comportamento reológico de um ligante modificado por borracha. ANPET (2020).

BERTOLLO, S. A. M. Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 252p, (2002).

BESSA, I. S. *Laboratory and field study of fatigue cracking prediction in asphalt pavements*. Ph.D. Dissertation. Escola politécnica da Universidade de São Paulo/SP, Brasil, 2017.

BREDENHANN, S. J.; BROOKS, O.; ROWE, G. M.; et al. *Bitumen Rubber binder in the South African Performance -Grade Specification*. (2020).

BRESSI, S., FIORENTINI, N., HUANG, J., E LOSA, M. *Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of the Art and Statistics*. Department of Civil and Industrial Engineering, University of Pisa, Italy (2019).

BUTTLAR, W. e PUNYASLOKRATH. (2021). *State of knowledge report on rubber modified asphalt*. Final Report 2021. USTMA e THE RAY.

BUKOWSKI, J. (2014). *The Use of Recycled Tire Rubber to Modify Asphalt Binder and Mixtures* (FHWA-HIF-14-015). Washington, DC: FHWA.

CALTRANS, 2003A. *Asphalt Rubber Usage Guide*. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.

CAMARGO, F. F. *Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt*. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, SP, 161p, (2016).

CARGNIN, R. S. Avaliação das emissões de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e seus derivados a partir de matrizes asfálticas. Tese de Doutorado. Departamento de Química. Universidade Federal de Santa Maria-UFSM. Santa Maria/RS, 2022.

CBB Asfaltos. Relatório - Estudo do tamanho de partícula do asfalto-borracha – Tyreflex AB08. (2023).

CCR. Relatório “Pellets” – Pesquisa de Asfalto Peletizado, Centro de Pesquisas Rodoviárias (C.P.R.) da CCR Nova Dutra, 2013.

CCR. Relatório Fotográfico de execução das Operações de Manutenção na Rodovia BR-116/SP - Concessionária CCR Nova Dutra, 2013.

CERATTI J. A. P, BERNUCCI, L. B, SOARES, J. B. Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação. Associação brasileira das empresas distribuidoras de asfalto – ABEDA. 1ª edição, Rio de Janeiro/RJ, 2015.

CHACUR, M.; NASCIMENTO, L. A. H. Considerações quanto ao uso dos parâmetros *Superpave* de ligantes para previsão do desempenho de misturas asfálticas em termos de deformação permanente e fadiga. 40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação, 2010.

CHEN, H.; Y. ZHANG and H.U. BAHIA (2021) *Estimating asphalt binder fatigue at multiple temperatures using a simplified pseudo-strain energy analysis approach in the LAS Test*, Construction & Building Materials, v. 266, p. 120911. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120911.

CORDEIRO, W. R. Comportamento de Concretos Asfálticos Projetados com Cimento Asfáltico Modificado por borracha de pneu. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

CORRIGAN, M.; GOLALIPOUR, A (2016). *Ground Tire Rubber: Field projects, experiences and lessons learned*. Asphalt binder ETG meeting. Federal Highway Administration, United States Department of Transportation.

CRAVO, M. C. C., Efeitos do Envelhecimento Térmico e Fotoquímico em Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz de Agregados Finos. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

DANTAS NETO, S. A. Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. 2004.

DANTAS, L. N., Estudo do Envelhecimento de Ligantes Asfálticos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

DAPPER, H. (2020). Avaliação laboratorial de misturas asfálticas a quente e mornas com utilização de asfalto borracha. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 137 p.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1999) ME 384 – Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (1994) ME 148 – Material betuminoso: Determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland).  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 095/2006 Cimento asfáltico de petróleo – Especificação de material, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – EM 111/2009 Pavimentação flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida do tipo “*terminal blending*” — Especificação de Material. Rio de Janeiro, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ES 112/2009 Concreto asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida do tipo “*terminal blending*” – Especificação de serviço, Rio de Janeiro, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 131/2010 Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 135/2018 Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 136/2018 Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à Tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 423/2020 Pavimentação – Ligante Asfáltico – Fluência e Recuperação de Ligantes Asfálticos determinados sob tensão múltipla (MSCR) – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 439/2022 Pavimentação – Ligante Asfáltico – Avaliação da tolerância ao dano de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS) – Método de ensaio.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 131/2010 Materiais asfálticos – Determinação do ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 155/2010 Material asfáltico – Determinação da penetração.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES DNIT – ME 412/2019 Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento.

DOMINGOS, M. D. I. Caracterização do comportamento fluência recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (2011).

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. *The importance of the creep and recovery times on the rheological behavior and the susceptibility of modified asphalt binders to rutting*. 2017. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

ECORODOVIAS (2021). Relatório integrado. Disponível em:  
<<https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/7c109ecb-88c9-441f-91cb-66a8db417120/db3ecd97-dc7b-bc89-c55e-c1889945e6d5?origin=2>> (acesso em 08/28/2021).

FENGLER, R. Z. Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de Trinidad Lake Asphalt. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2018.

FERNANDES *et al.* *Evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in asphalt binder using matrix solid-phase dispersion and gas chromatography.* Journal of Chromatography Science, v. 47, p. 789-793, 2009.

FERRAZ, L. M. R. (2015). Desenvolvimento de dispositivo para extração e coleta de fumos de asfalto e aplicação na determinação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos . Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

FHWA-HIF-22-011. (2021). *Recycled Tire Rubber – Hybrid GTR Binders and Dry Added GTR – How to use them in Asphalt Pavement Mixtures.*

FONTES, L. P. Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Ligante Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos. Universidade do Minho, Portugal. Tese. 2009.

FONTES, L.P.T., TRICHÊS, G, PEREIRA, P., PAIS, J. C. Comportamento à fadiga e à deformação permanente de misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha brasileiro. 19º Encontro de Asfalto 2008.

FRITZEN, M. A. Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro/ COPPE, 2016.

GASPAR, M. S. Mecanismos de interação e ativação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna. Dissertação de Mestrado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo – USP (2019).

GRECA ASFALTOS (2021) ECOFLEX 20 anos de asfalto-borracha no Brasil 2001-2021. Disponível em: <<https://fatoseasfaltos.com.br/>> (acesso em 08/28/2021).

HINTZ, C. *Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue.* Ph.D Thesis. University of Wisconsin - Madison, Madison. (2012).

HOWARD, I. L.; GAYLON, L; BAUNGARDNER; JORDAN, W.S.; HENSLEY, J. M.; HOPKINS, C. (2021). *Comparing Ground Tire Rubber, Styrene-Butadiene-Styrene and GTR – SBS hybrids as asphalt binder modifiers.* J. Mater. Civ. Eng. 33 (5) 04021091. ASCE. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943 – 5533. 0003709.

HUNG, S. S.; FARSHIDI, F.; JONES, D; HARVEY, J. T. (2015). *Comparison of Concentric Cylinder and Parallel Plate Geometries for Asphalt Binder Testing with a Dynamic Shear Rheometer.* Journal of the Transportation Research Board. <https://doi.org/10.3141/2505-14>

IARC (2013) *Bitumens and Bitumen Emissions, and Some N- and S-Heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons.* World Health Organization, Lyon, France, IARC Monograph 103. Disponível em: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol103/index.php> (acesso em 15/11/2023).

JOHNSON, C. M. (2010). *Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance using an Accelerated Test Method.* Ph.D Thesis. University of Wisconsin – Madison.

JONES, D; RIZVI, H.; LIANG, Y. Et alli. 2017. *Development of performance – based specification for asphalt rubber binder; Interim Report on Phase 1 and Phase 2 Testing – Research Report: UCPRC – RR – 2017 – 01.*

KALOUSH, K. (2014). *Asphalt rubber: Performance tests and pavement design issues.* Construction and Building Materials, 67, p 258-264.

KIM, R.Y. (2014). *Asphalt Pavements.* Boca Raton: CRC Press. DOI: 10.1201/b17219.

KING, G. (2015). *Asphalt Pellets: An Alternative Delivery System of Asphalt Products.*

- KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. D.; FARIA, V. C. (2020). *Evaluation of permanent deformation of asphalt rubber using multiple stress creep recovery tests and flow number tests*. Revista Transportes - ANPET. <https://doi:10.14295/transportes.v28i2.2110>.
- KLINSKY, L. M. G. e FARIA, V. C. (2017). Asfalto-borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas. Relatório número: CCR-ND-AB-RF-DEZ/2017. Centro de pesquisas rodoviárias da Concessionária Nova Dutra.
- LEE, J.S.; LEE, S.Y.; BAE, Y.S.; LE, T.H.M. “*Development of Pavement Material Using Crumb Rubber Modifier and Graphite Nanoplatelet for Pellet Asphalt Production*”. Polymers 2023, 15, 727. <https://doi.org/10.3390/polym15030727>
- LEITE, L. F. M. Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- LEITE, L. F. M e MOTTA, L. M. G. Evolução das especificações europeias de ligantes asfálticos baseadas em desempenho 33° ANPET, 2019.
- LEITE, L. F. M. Reologia de cimentos asfálticos. Dissertação, (COPPE/ UFRJ), (1990).
- LEITE, L. F. M., NASCIMENTO, L. A. H., CHACUR, M., MARTINS, A. T., ROCHA, S. M. N., FIGUEIREDO, U. S. Emprego de asfaltos duros em rodovias de alto volume de tráfego. 7° CBR&C, Foz do Iguaçu, 2011.
- LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R; BASTOS, A. Comparação das características dos cimentos asfálticos brasileiros com as constantes do Banco de dados MRL do Programa SHRP para ligantes asfálticos. In: 11ª RPU - REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2002, Porto Alegre.
- LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R; MARTIGNONI, B. *Studies of asphalt rubber using various sources of ground tire rubber*. In: Asphalt rubber 2000, Portugal. Proceedings on Asphalt Rubber Conference, 2000.
- LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R; TONIAL, I. A. Produção de asfaltos segundo especificações SUPERPAVE. In: Assunción Paraguay. 9º Congresso Ibero Latino-Americano de Asfalto. 1997.
- LEITE, L.F.M., SILVA, P.A., EDEL, G., MOTTA, L.G., NASCIMENTO, L.A.H. *Asphalt Rubber in Brazil: Pavement Performance and Laboratory Study*. Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasília, 2003, pp. 229-245.
- LEITE, L.F.M.; MARTINS, A. T.; ASSUMPCAO, D. F.; GUERRA, G. B.; CHACUR, M. Emprego da reologia na avaliação de ligantes asfálticos brasileiros. In: 17ª RPU, Reunião de Pavimentação Urbana, ABPv. 2011.
- LEITE *et al.* Pavimentos asfálticos de baixo carbono. In: 25º Encontro de Asfalto – IBP. 2023.
- LIMA, C. S., Caracterização de Ligantes Asfálticos Modificados com Borracha de Pneu e Aditivos. Dissertação. UFC. 2008.
- LIN, P.; HUANG, W.; TANG, N.; XIAO, F.; LI, Y. (2018) *Understanding the low temperature properties of Terminal Blend Hybrid asphalt through chemical and thermal analysis methods*. Construcción and Building Materials. 169, p. 543-552.
- LO PRESTI, D. (2013). *Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials, 49, 863–881. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>.
- LO PRESTI, D.; MEDINA, J. G.; DALMAZZO, D.; *et al.* (2020). *Utilization of rubberized asphalt in Europe*. Cap. 13. Civil Engineering Application.

MACEDO, T. F. Caracterização Microestrutural de Propriedades Viscoelásticas de ligantes asfálticos usando a Microscopia de Força Atômica. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. 2018.

MAIA, I. G.; MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M.; COUTINHO, R. Q. (2023). *Rheological behavior of asphalt binders modified with fourth generation rubber asphalts (pellets)*. Revista Transportes - ANPET. DOI: <http://10.58922/transportes.v31i2.2692>. ISSN 2237-1346 (online).

MALKIN, A., “*Rheology Fundamentals*”, ChemTec Publishing, Canada, 1994.

MARTINS, A. T. Contribuição para a Validação do Ensaio de Resistência ao Dano por Fadiga para Ligantes Asfálticos. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, 2014.

MARTINS, A. T., LEITE L. M., CRAVO M. C., NASCIMENTO L. A. Fluência e relaxação sob múltipla tensão: novo teste para avaliar resistência à deformação permanente. 16a RPU – Reunião de Pavimentação Urbana. 2009.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MORILHA, Jr. A. & Greca, M.R., 2003. Ligante Borracha Ecoflex. Greca Asfaltos. Curitiba, Paraná, Brasil.

MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M., CONSTANTINO, R. S., Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas. Tradução comentada. FHWA-SA-95-003. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MTURI, G. A. J., ZOOROB, S. E, O’CONNELL & DE BEER, M. (2014). *A study of crumb rubber modified bitumen used in South Africa*. Road Materials and Pavement Design. Vol. 15. Issue 4. p 774-790. 2014.

NANJEGOWDA, V. H.; BILIGIRI, K. P. (2020) *Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: a review of applied research and advancement in technology* – Resources, Conservation, and recycling vol 155, April 2020, 104655 <https://doi.org/10.1016/j.riconrec.2019.104655>.

NASCIMENTO, L. A. H. Estudo do efeito da estocagem nas propriedades do asfalto borracha e a influência do método de ensaio na determinação da viscosidade a altas temperaturas. In: ANPET, 2005. ANPET, 2005.

NASCIMENTO, L. A. H. Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com o Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, RJ, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H., *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Ph.D. Tesis. North Caroline State University, Raleigh, 2015.

NASCIMENTO, P.C., GOBO, L.A., BOHRER, D., CARVALHO, L.M., CRAVO, M.C., LEITE, L.F.M.; *Determination of oxygen and nitrogen derivatives of polycyclic aromatic hydrocarbons in fractions of asphalt mixtures using liquid chromatography coupled to mass spectrometry with atmospheric pressure chemical ionization*. J. Sep. Sci. 38, 4055–4062, 2015a. DOI: 10.1002/jssc.201500893

NASCIMENTO, P.C., GOBO, L.A., BOHRER, D., CARVALHO, L.M., CRAVO, M.C., LEITE, L.F.M. *Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in fractions in asphalt mixtures using liquid chromatography coupled to mass spectrometry with atmospheric pressure chemical ionization*. J. Sep. Sci. 38, 2238–2244, 2015b. DOI: 10.1002/jssc.201401231

NDOT (2016). Research Report N° 513-13-803. *Evaluation of new innovations in rubber- modified Asphalt binders and Rubberized Asphalt Mixes for Nevada* – DOT.

- NUNES, L. C. Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com asfalto borracha de 4ª geração. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília - UNB. 2017.
- NUNES, L. C. Fadiga e deformação permanente em ligante e mistura asfáltica modificados com borracha pré-tratada (RAR). Tese de Doutorado. Universidade de Brasília - UNB. 2023.
- NUNES, C. G. L. Estudo do comportamento de misturas asfálticas modificadas por borracha de pneus inservíveis. Dissertação de Mestrado. UFPB – Universidade Federal da Paraíba. 2019.
- NUÑEZ, J. Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2013.
- OBAIDI, H; GOMEZ-MEIJIDE, B; GARCIA, A. *Induction-Heatable Asphalt Pellets as a New Material in Road Maintenance*. Journal of Materials in Civil Engineering. Volume 30, Issue 11. 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002485](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002485)
- ODA, S. Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação. 2000. 251 f. Tese. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- OSSA, J. C. M. *Modificación Polimérica de Asfaltos*, Dissertação de Mestrado, Medellín, 2012.
- PAMPLONA, T. F. Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, (2013).
- PANG, L.; LIU, KUANGYI; WU, S.; LEI, M.; CHEN, Z. (2014). *Effect of LDHs on the aging resistance of Crumb rubber modified asphalt*. Construction and Building Materials 67 (2014) p 239 -243.
- PANIZ, E. P.; SPECHT, L. P., PEREIRA, D. S.; FERRAZ, L. M. R., NASCIMENTO, P. C., ARAGAO, F. T. S. (2018): *PAHs emissions by 12 Brazilian bitumens: procedure and results*, Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2018.1447502.
- PAIS, J. C, THIVES, L. P., PEREIRA, P. A. A., TRICHÊS, G. .Construindo melhores estradas com borracha asfáltica. Jornal Romeno de Infraestrutura de Transportes. Volume 4: Edição 2, 2015.
- PEREIRA, A. I. R., (2014). Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de ligante com o reômetro de corte dinâmico. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- PUGA, K. L. N. N. (2015). *Comprehensive study on the sustainable technology of asphalt rubber for hot mix asphalt binders and mixes* [Dissertation (PhD). Iowa State University]. <https://doi.org/10.31274/etd-180810-4535>.
- POSSEBON, E. P.; SPECHT, L. P.; PEREIRA, D. S.; FERRAZ, L. M. R.; NASCIMENTO, P. C.; ARAGAZ O, F. T. S. *PAHs emissions by 12 Brazilian bitumens: procedure and results*. Road Materials and Pavement Design, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2018.1447502.
- SAFAEI, F. & CASTORENA, C. (2016). *Temperature effects of linear amplitude sweep testing and analysis*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2574, 92–100. doi:10.3141/2574-10.
- SAFAEI, F. & CASTORENA, C. *Material nonlinearity in asphalt binder fatigue tests and analysis*. Elsevier, 2017.
- SHATNAWI, S. *Comparisons of Rubberized Asphalt Binders Asphalt Rubber and Terminal Blend*. Shatec Engineering Consultants, LLC. Eldorado Hills, California, 2011.
- SHELL. *The Shell bitumen handbook*. 5. ed. Cambridge, 2015.

SHULMAN, V.L. *Tire Recycling After 2000: Status and options*. European Tire Recycling Association, Paris, France, 2000.

SIERRA, C. A., MORENO N. F., RUBIO-Gómez, M.C. *Analysis of the Real Performance of Crumb-Rubber-Modified Asphalt Mixtures*. *Materials*. 2022, 15, 8366. <https://doi.org/10.3390/ma1523836>.

SKOOG, D. A. *et al.*, Fundamentos de Química analítica, Tradução da 9ª edição norte-americana, Cengage Learning, São Paulo, 2015.

SOCKWELL K. R. *Rubber Asphalt and New Technologies*. 8th Brazilian Congress for Highway and Concessions, Santos, SP, Brazil | August 12 – 14, 2013.

SOCKWELL, K. R. (2013). Patente americana nº 8.404.164 pelo Escritório de Patentes e Marcas dos EUA (USPTO) por seu processo inovador relacionado ao peletização do asfalto modificado de borracha (ligante) usado na indústria de pavimentação.

SONG, J.; Xie, J.; WU, S.; YANG, C.; CHEN, H.; SHI, Y. (2022) "Study on properties and improving mechanism of OGFC-13 asphalt mixtures modified by novel rubber pellets" - Construction and Building materials vol 325, 126799 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126799>.

SOUSA, J. B., WAY, G. B. & ZAREH, A. (2006). *Asphalt-Rubber Gap Graded Mix Design Concepts*. Asphalt Rubber 2006 – Proceedings, California, USA: 523-543.

SPECHT, L. P. *et al* (2019). Análise de parâmetros reológicos de rigidez de ligantes asfálticos por meio do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). X Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul. GEORS 2019.

SPECHT, L. P.; KHATCHATOURIAN, O.; BRITO, L. A. T., CERATTI, J. A. P. (2007). *Modeling of asphalt rubber rotational viscosity by statistical analysis and Neural Networks*. *Materials Research*, vol. 10, No. 1, 69-74

SPECHT, L. P. Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

STRATURA ASFALTOS. Asfaltos Modificados com Borracha: o que impacta a sua viscosidade. Boletim técnico Nº 32. Ano 4. 2022.

SUBHY, A.; D. LO PRESTI e G. Airey (2015). *An investigation on using pre-treated tyre rubber as a replacement of synthetic polymers for bitumen modification*, Road Materials and Pavement Design, v. 16, n. 1, p. 245-64. DOI: 10.1080/14680629.2015.1030826.

TAKALLOU, H. B. & TAKALLOU M. B. (2003). *Effects of mixing time and temperature on the visco-elastic properties of asphalt rubber binder*. Asphalt Rubber 2003 – Proceedings, Brasília, Brasil, 2003, p. 589-602.

TONIAL, I. A.; LEITE, L. F. M.. Classificação dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP. In: 5º Congresso brasileiro de petróleo, 1994, Rio de Janeiro.

VENUDHARAN, V, BILIGIRI, K. P., SOUSA, J. B., WAY, G. B. (2016): *Asphalt-rubber gap-graded mixture design practices: a state-of-the-art research review and future perspective*, Road Materials and Pavement Design.

WANG, S.; CHENG, D; XIAO, F. (2017) *Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt*. Construction and Building Materials, 131, p 101 -113.

WANG *et al* (2020). *Asphalt-rubber interaction and performance evaluation of rubberized asphalt binders containing non-foaming warm-mix additives*. Road Materials and Pavement Design. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561380>.

- WANG, S.; HUANG, W.; LIU, X.; LIN, P. *Evaluation of the Aging Properties of Terminal Blend Hybrid Asphalt Based on Chemical and Rheological Methods*. Sustainability 2022, 14, 7865. <https://doi.org/10.3390/su14137865>.
- WAY, G. B., K. KALOUSH, BILIGIRI, K., Consulpav Int. and Arizona State University. *Asphalt-Rubber Standard Practice Guide*. Rubber Pavement Association, Second Edition, (2012).
- WAY, G. B., KALOUSH, K., SOUSA, J., & BILIGIRI, K. P. (2012b). *Performance characteristics of Arizona asphalt rubber and conventional mixes using beam fatigue and simple shear tests*. In Proceedings of the asphalt rubber, Munich, Germany.
- WAY, G.B. (2003). *OFGC Meets CRM: where the rubber meets the rubber: 15 Years of Durable Success*. Asphalt Rubber 2003 - Proceedings, Brasilia, Brazil, p. 49-63.
- WILSON, W. B. *et al. Retention behavior of isomeric polycyclic aromatic sulfur heterocycles in reversed-phase liquid chromatography*. Journal of Chromatography A, v. 1461, p. 107–119, 2016.
- XU, O.; XIAO, F.; HAN, S.; AMISKHANIAN, S. N.; WANG, Z. *High temperature rheological properties of crumb rubber modified asphalt binders with various modifiers*. Construction and Building Materials (2016), 49-58.
- YARO, N. S. A, SUTANTO, M. H.; BALOO, L.; HABIB, N. Z.; USMAN, A.; YOUSAFZAI, A. K.; AHMAD A., BIRNIWA, A. H.; JAGABA, A. H.; NOOR, A. *A Comprehensive Overview of the Utilization of Recycled Waste Materials and Technologies in Asphalt Pavements: Towards Environmental and Sustainable Low-Carbon Roads*. processes. 2023; 11(7):2095. <https://doi.org/10.3390/pr11072095>.
- YU, H.; DENG, G.; WANG, D.; ZHANG, Z.; OESER, M. *Warm asphalt rubber: A sustainable way for waste tire rubber recycling*. J. Cent. South Univ. (2020) 27:3477-3498. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4467-y>
- YU, J., YU, X., GAO, Z., GUO, F., WANG, D. YU, H. (2018) *Fatigue resistance characterization of warm asphalt rubber by multiple approaches*. Applied Sciences, 8, 1495, DOI: 10.3390/app80911495.
- YU, X.; LI, D; LENG, Z.; YAO, H.; WANG, S. (2023) *Weathering characteristics of asphalt modified by hybrid of micro-nano tire rubber and SBS*. Construction and Building Materials. 389.
- ZANETTI, M. C.; SANTAGATA, E.; FIORI, S.; RUFFINO, B.; DALMAZZO, D.; LANOTTE, M. (2016) *Evaluation of potential gaseous emission of asphalt rubber bituminous mixtures*. Proposal of a new laboratory test procedure. Construction and Building Materials, 113. 870-879.
- Zhang, J; Huang, W; Zang, Y; YAN, C; Lv, Q. E Guan, W. *Evaluation of the terminal blend crumb rubber/SBS composite modified asphalt*. Construction and Building Materials 278 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122377>.
- ZHAO, Z; SHAOPEG, W.; Xie; J.; YANG, C.; XINKUI, Y.; CHEN, S. QUANTAO, L. *Recycle of waste tire rubber powder in a novel asphalt rubber pellets for asphalt performance enhancement*. Construction and Building materials 339 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132572>.
- ZHOU, Fujie & MOGAWER, WALAA & LI, HONGSHENG & ANDRIESCU, ADRIAN & COPELAND, Audrey. (2013). *Evaluation of Fatigue Tests for Characterizing Asphalt Binders*. Journal of Materials in Civil Engineering. 25. 610-617. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000625.
- ZOOROB, S., AL-BAHAR, S., AL-OTAIBI, S. (2018). *Design and optimization of a rubber-bitumen blend in preparation for a rubberized-asphalt road trial in the state of Kuwait*. MATEC Web of Conferences. 195. 04001. 10.1051/mateconf/201819504001.

## APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DO PÓ DE BORRACHA

- Granulometria do pó de borracha – Stratura asfaltos (2023)

STRATURA ASFALTOS		GOT/CSE														
FICHA DE ENSAIO																
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA																
Cliente:	STRATURA / CSE		Data:	21/07/2023												
Pedreira:		Obra:	Técnico executor:	Romildo/Larissa												
Material:	Pó de Pneu	Projeto:	Solitação:	Amostra:	Repetição <input type="checkbox"/>											
GRANULOMETRIA																
AMOSTRA <input type="text" value="1ª"/>		Peso Inicial (A) <input type="text" value="400.2"/>		g												
PENEIRAS		PESO ACUMULADO (g) (B)	PORCENTAGEM		Seco <input checked="" type="checkbox"/> Lavado <input type="checkbox"/>  <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">MÉDIA PASSANTE (E)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100.0</td></tr> <tr><td>100.0</td></tr> <tr><td>100.0</td></tr> <tr><td>94.0</td></tr> <tr><td>60.5</td></tr> <tr><td>45.9</td></tr> <tr><td>24.8</td></tr> <tr><td>19.0</td></tr> <tr><td>6.9</td></tr> </tbody> </table>	MÉDIA PASSANTE (E)		100.0	100.0	100.0	94.0	60.5	45.9	24.8	19.0	6.9
MÉDIA PASSANTE (E)																
100.0																
100.0																
100.0																
94.0																
60.5																
45.9																
24.8																
19.0																
6.9																
#	mm	RETIDA (C)	PASSANDO (D)													
8	2.38	0.0	100.0													
10	2.00	0.0	100.0													
16	1.19	0.0	100.0													
30	0.59	23.7	94.1													
40	0.42	157.9	60.5													
50	0.30	215.4	45.2													
80	0.18	302.2	24.5													
100	0.15	321.4	19.7													
200	0.08	371.9	7.1													
AMOSTRA <input type="text" value="2ª"/>		Peso Inicial (A) <input type="text" value="412.5"/>		g												
PENEIRAS		PESO ACUMULADO (g) (B)	PORCENTAGEM													
#	mm	RETIDA (C)	PASSANDO (D)													
8	2.38	0.0	100.0													
10	2.00	0.0	100.0													
16	1.19	0.0	100.0													
30	0.59	25.4	93.8													
40	0.42	163.2	60.4													
50	0.30	224	45.7													
80	0.18	309.1	25.1													
100	0.15	336.7	18.4													
200	0.08	385.1	6.6													
Fórmulas: ( C ) = ( B / A ) X 100, ( D ) = 100 - ( C ) e ( E ) = média ((D) 1ª e (D) 2ª)																