

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS PATOS
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO PAULO MARÇAL DE SOUZA

**PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE
ATRITO (CPA) MODIFICADAS PELO RESÍDUO DO ETILENO ACETATO DE
VINILA (EVA) PROVENIENTE DA INDÚSTRIA CALÇADISTA**

PATOS - PB
2024

JOÃO PAULO MARÇAL DE SOUZA

**PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE
ATRITO (CPA) MODIFICADAS PELO RESÍDUO DO ETILENO ACETATO DE
VINILA (EVA) PROVENIENTE DA INDÚSTRIA CALÇADISTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – *campus* Patos, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Diego de Paiva Bezerra.

**PATOS - PB
2024**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CAMPUS PATOS/IFPB

S729p Souza, João Paulo Marçal de.
Propriedades de misturas asfálticas do tipo camada porosa de atrito (cpa) modificadas pelo resíduo do etileno acetato de vinila (eva) proveniente da indústria calçadista / João Paulo Marçal de Souza.- Patos, 2024.
140 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Engenharia Civil)-Instituto Federal da Paraíba, Campus Patos-PB, 2024.

Orientador(a): Prof. M.E. Diego de Paiva Bezerra.

1.Pavimentos de asfalto -- Asfalto modificado 2. Construção civil-Inundações urbanas-Pavimento flexível drenante I. Título II. Bezerra, Diego de Paiva III. Instituto Federal da Paraíba.

CDU-625.85

Ficha catalográfica elaborada por Lucikelly Oliveira CRB 15/574

JOÃO PAULO MARÇAL DE SOUZA

PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA) MODIFICADAS PELO RESÍDUO DO ETILENO ACETATO DE VINILA (EVA) PROVENIENTE DA INDÚSTRIA CALÇADISTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFPB – *campus* Patos, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

APROVADO EM: 01/08/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



DIEGO DE PAIVA BEZERRA
Data: 02/08/2024 21:26:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Diego de Paiva Bezerra - Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Documento assinado digitalmente



DANUBIA LISBOA DA COSTA
Data: 02/08/2024 15:30:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Danubia Lisboa da Costa - Examinadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Documento assinado digitalmente



LUIA EDUARDA LUCENA DE MEDEIROS
Data: 02/08/2024 15:57:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Luisa Eduarda Lucena de Medeiros - Examinadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Dedico este trabalho aos meus pais, Ivoneide e Pedro Paulo, aos quais devo minha eterna gratidão e admiração, e a minha irmã pelo apoio e compreensão todos esses anos.

“Tornamos nosso mundo significativo pela coragem de nossas perguntas e pela profundidade de nossas respostas”.

(Carl Sagan)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu senhor Deus por guiar e iluminar meu caminho com sabedoria e compaixão, concedendo-me saúde e força para enfrentar meus medos e angústias diante dos obstáculos encontrados.

Aos meus pais, Ivoneide e Pedro Paulo, não existem palavras no vocabulário aos quais resumem o meu eterno agradecimento. Muito obrigado por todo ensinamento, apoio e conselho, pois estes me tornaram a pessoa que sou hoje.

A minha irmã Ana Paula por toda ajuda e escuta durante todos esses anos e, em especial, durante a produção deste trabalho final de curso.

As minhas tias e tios e demais familiares que me ajudaram direta e indiretamente. O meu muito obrigado!

Ao meu orientador, o professor Diego, agradeço por todo o ensinamento e dedicação, por acreditar no meu potencial e por fornecer as ferramentas necessárias para meu crescimento acadêmico e profissional. Muito obrigado!

As minhas parceiras de laboratório, Fabiana, Jessica e Mayara, pela paciência e auxílio durante a execução deste estudo, não medindo esforços para me ajudarem, desde a aquisição dos materiais até a obtenção dos resultados das etapas experimentais da pesquisa. Serei eternamente grato a vocês!

A todos os meus amigos e amigas, em especial aos que o curso de bacharelado em Engenharia Civil me proporcionou, Emelly, Kyvya, Vinicius Silva e Vinicius Cruz, pelo apoio moral, pelas conversas no laboratório e fora dele também, pela amizade nas disciplinas durante o curso. Tenho orgulho de ter vocês como amigos. Vocês foram essenciais durante esses anos de graduação. Muito obrigado!

À indústria calçadista Alpargatas de Santa Rita-PB no nome da funcionária Claudia Monteiro pela parceria e doação do resíduo do Etileno Acetato de Vinila utilizado na pesquisa.

À Usina Niemaia Construtora e aos técnicos dos laboratórios de Materiais, Geotecnia, Mecânica dos Solos e Pavimentação do Centro Universitário UNIFIP e da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), nos nomes dos laboratoristas João Paulo, Anderson, Junior e Sebastião. Agradeço-os bastante por todo suporte e auxílio para execução deste trabalho.

Ao técnico do laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – *campus* Patos, Wendel, por toda ajuda, indicações e contribuições para a realização deste estudo.

Aos grupos de pesquisa em Percepção Espacial e Representação Gráfica (PERREP) e Gestão, Tecnologia e Meio Ambiente no âmbito da Engenharia Civil por possibilitar a minha participação nas discussões e reuniões de estudo. Grandes amizades foram feitas, conhecimentos adquiridos, eventos participados, viagens e experiências adquiridas, engrandecendo ainda mais a bagagem do conhecimento e admiração pela pesquisa científica.

Às professoras Angela, Clerya, Luísa, Maíra, Paula e Raissa e aos professores Alexandre e Guilherme por todo auxílio durante a graduação e orientação de projetos que foram essenciais para minha permanência e motivação para com o curso. Sou eternamente grato!

À coordenação do curso de bacharelado em Engenharia Civil do IFPB – *campus* Patos, aos funcionários, aos técnicos administrativos e aos demais professores no nome da professora Hannah Lacerda, por todo apoio, auxílio e compreensão, em especial na realização deste trabalho. Gratidão a todos vocês!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida para concepção e execução deste estudo.

Por fim, mas não menos importante, ao IFPB por todo apoio e contribuição para que esse sonho se tornasse realidade. Meus sinceros agradecimentos!

Muito obrigado!

RESUMO

O crescimento urbano nas últimas décadas aumentou as áreas impermeáveis, causando a formação das ilhas de calor, enchentes e até inundações. Para amenizar esses problemas, diversos países têm incorporado em seus planos ambientais a utilização de técnicas compensatórias para redução dos problemas gerados pelo processo de urbanização, como os pavimentos asfálticos drenantes. Entretanto, tendo em vista que esse material costuma apresentar um baixo desempenho mecânico, pesquisadores têm investigado estratégias para aumentar o desempenho das propriedades funcionais desses concretos asfálticos. Nessa perspectiva, o presente estudo teve como objetivo avaliar as propriedades de misturas asfálticas drenantes do tipo Camada Porosa de Atrito modificadas pelo resíduo do Etileno Acetato de Vinila proveniente da indústria calçadista. Para tanto, o esquema metodológico foi dividido em três etapas, as quais compreenderam o mapeamento bibliométrico, a coleta dos materiais e a realização dos ensaios nas amostras. A partir dos resultados obtidos, pôde-se observar um aumento na viscosidade do ligante asfáltico modificado em comparação com o asfalto puro. Para além, as misturas asfálticas produzidas com o ligante asfáltico modificado pelo resíduo do EVA apresentaram a diminuição do volume de vazios de aproximadamente 21% para 18%, sem comprometer as propriedades de permeabilidade. Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) e desgaste cantabro, as misturas também atenderam aos limites técnicos de revestimentos asfálticos tipo CPA solicitados no Brasil. No ensaio de RT, a mistura CPA03, com ligante asfáltico modificado por 3% do resíduo do EVA, obteve uma RT de 1,28 MPa, com volume de vazios de 18,10%, coeficiente de permeabilidade de 0,18 cm/s e uma diminuição da perda de massa por abrasão de 0,16% em relação a mistura de referência REF, sem modificação do ligante asfáltico, e se mantendo dentro dos valores exigidos pela normativa do departamento de transportes do Brasil. Dessa forma, a reutilização do resíduo de EVA na pavimentação asfáltica drenante não só se mostrou uma alternativa eficaz para a destinação desse material, mas também contribui significativamente para a sustentabilidade, impactando positivamente a economia circular na destinação final do resíduo, e na melhoria das propriedades funcionais e mecânicas das misturas asfálticas modificadas pelo resíduo.

Palavras-chave: Pavimento flexível drenante; Resíduo industrial; Asfalto modificado.

ABSTRACT

Urban growth in recent decades has increased impermeable areas, causing the formation of heat islands, floods and even flash floods. To mitigate these problems, several countries have incorporated the use of compensatory techniques to reduce the problems generated by the urbanization process into their environmental plans, such as drainage asphalt sidewalks. However, given that this material tends to have poor mechanical performance, researchers have investigated strategies to increase the performance of the functional properties of these asphalt concretes. With this in mind, the aim of this study was to evaluate the properties of drainage asphalt mixtures of the Porous Friction Layer type modified with ethylene vinyl acetate waste from the footwear industry. To this end, the methodological scheme was divided into three stages, which included bibliometric mapping, collecting the materials and carrying out the tests on the samples. The results showed an increase in the viscosity of the modified asphalt binder compared to pure asphalt. In addition, the asphalt mixtures produced with the asphalt binder modified by the EVA residue showed a reduction in the volume of voids from approximately 21% to 18%, without compromising the permeability properties. In the tests for tensile strength by diametrical compression (RT) and wear and tear, the mixtures also met the technical limits for CPA-type asphalt coatings requested in Brazil. In the RT test, the CPA03 mix, with asphalt binder modified by 3% of the EVA residue, obtained an RT of 1.28 MPa, with a void volume of 18.10%, a permeability coefficient of 0.18 cm/s and a reduction in mass loss by abrasion of 0.16% in relation to the REF reference mix, without modification of the asphalt binder, and remaining within the values required by the regulations of the Brazilian Department of Transport. Thus, the reuse of EVA waste in drainage asphalt paving not only proved to be an effective alternative for disposing of this material, but also made a significant contribution to sustainability, positively impacting the circular economy in the final disposal of the waste, and improving the functional and mechanical properties of the asphalt mixtures modified by the waste.

Keywords: Flexible drainage flooring; Industrial waste; Modified asphalt.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de Funcionamento do Pavimento Asfáltico Drenante	28
Figura 2 - Ação da Água na Mistura Asfáltica Drenante	40
Figura 3 - Representações da Incorporação por Via Seca e por Via Úmida	44
Figura 4 - Esquema Geral das Etapas Metodológicas do Estudo	54
Figura 5 - Esquema do Programa Experimental	55
Figura 6 - Materiais Utilizados na Pesquisa	57
Figura 7 - Execução do Ensaio de Granulometria	58
Figura 8 - Determinação da Massa Específica do Agregado Miúdo	59
Figura 9 - Execução do Ensaio de Absorção	60
Figura 10 - Procedimentos de Determinação do Índice de Forma	62
Figura 11 - Execução do Ensaio de Abrasão Los Angeles	63
Figura 12 - Execução do Ensaio do Equivalente de Areia	64
Figura 13 - Modificação do Ligante Asfáltico	65
Figura 14 - Sequência do Ensaio de Adesividade	66
Figura 15 - Ensaio de Penetração	67
Figura 16 - Ensaio da Densidade e Massa Específica do Ligante Asfáltico	68
Figura 17 - Ensaio da Viscosidade Saybolt Furol	70
Figura 18 - Ensaio do Ponto de Fulgor	71
Figura 19 - Ensaio do Anel e Bola	72
Figura 20 - Moldagem dos Corpos de Prova	75
Figura 21 - Determinação da Densidade Aparente	77
Figura 22 - Esquema Representativo do Ensaio de Permeabilidade	80
Figura 23 - Execução do Ensaio de Permeabilidade	81
Figura 24 - Ensaio de Determinação da RT	82
Figura 25 - Ensaio Cantabro	83
Figura 26 - Curvas de Distribuição Granulométrica	86
Figura 27 - Mistura Final na Placa Cerâmica	91
Figura 28 - Resultado do Ensaio da Viscosidade	93
Figura 29 - Curvas da Viscosidade	94
Figura 30 - Resultado do Ensaio de Penetração	96
Figura 31 - Resultados do Ponto de Fulgor	99

Figura 32 - Resultados do Ensaio de Ponto de Amolecimento	101
Figura 33 - Resultados do Índice de Susceptibilidade Térmica	103
Figura 34 - Linha de Tendência da Densidade Aparente	105
Figura 35 - Resultado da Densidade Máxima Teórica	106
Figura 36 - Linha de Tendência do Volume de Vazios	108
Figura 37 - Linha de Tendência do Volume de Vazios Comunicantes	110
Figura 38 - Linha de Tendência do Coeficiente de Permeabilidade	112
Figura 39 - Relação Entre a Permeabilidade e os Percentuais de Vazios	113
Figura 40 - Linha de Tendência do Ensaio da RT	115
Figura 41 - Relação Entre a RT e o Volume de Vazios	116
Figura 42 - Linha de Tendência do Desgaste por Abrasão Los Angeles	118
Figura 43 - Relação Entre o Desgaste Cantabro e o Volume de Vazios	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas Compensatórias da Gestão Hídrica	26
Tabela 2 - Classificação Segundo Grau de Permeabilidade	31
Tabela 3 - Volume de Vazios de Misturas Asfálticas Drenantes na Literatura	34
Tabela 4 - Permeabilidade de Misturas Asfálticas Drenantes na Literatura	36
Tabela 5 - Resistências à Tração (RT) e à Abrasão de Misturas Asfálticas Drenantes	37
Tabela 6 - Utilização de Materiais Alternativos na Indústria da Pavimentação	48
Tabela 7 - Utilização do EVA na Indústria da Pavimentação	52
Tabela 8 - Ensaio Realizados na Caracterização Física dos Materiais do Estudo	57
Tabela 9 - Seleção da Amostra para o Ensaio	60
Tabela 10 - Ligante Asfáltico Convencional e Modificado	65
Tabela 11 - Normas dos Ensaio Realizados no Ligante Asfáltico	65
Tabela 12 - Faixa Granulométrica da Moldagem das Misturas Asfálticas Drenantes	73
Tabela 13 - Quantitativos em Gramas dos Traços de Referência	73
Tabela 14 - Composição Granulométrica da CPA do Estudo	74
Tabela 15 - Identificação das Misturas Asfálticas Drenantes Produzidas pelo Estudo	75
Tabela 16 - Ensaio Executados nas Misturas Asfálticas Drenantes	76
Tabela 17 - Distribuição Granulométrica	85
Tabela 18 - Resultado do Ensaio de Massa Específica e Absorção	87
Tabela 19 - Resultado do Índice de Forma dos Agregados Graúdos	88
Tabela 20 - Resultado do Ensaio de Abrasão Los Angeles	89
Tabela 21 - Resultado do Ensaio do Equivalente de Areia	90
Tabela 22 - Resultados do Ensaio da Viscosidade	92
Tabela 23 - Temperaturas de Usinagem	95
Tabela 24 - Resultados do Ensaio de Penetração	95
Tabela 25 - Resultados da Densidade e Massa Específica	98
Tabela 26 - Resultados do Ensaio do Ponto de Fulgor	99
Tabela 27 - Resultados do Ensaio do Ponto de Amolecimento	100
Tabela 28 - Resultados do IST para as Amostras do Estudo	102
Tabela 29 - Resultados da Densidade Aparente e Densidade Máxima Teórica	104
Tabela 30 - Resultados dos Parâmetros Volumétricos	107
Tabela 31 - Resultados do Ensaio de Permeabilidade	111

Tabela 32 - Resultados do Ensaio da RT	114
Tabela 33 - Resultados do Ensaio Cantabro	117

LISTA DE SIGLAS

ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
AE	Asfalto Emulsionado
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
BMP	<i>Best Management Practices</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAP01	Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com 1% do Resíduo do EVA
CAP02	Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com 2% do Resíduo do EVA
CAP03	Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com 3% do Resíduo do EVA
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CEM	Reforço da Coesão
CPA	Camada Porosa de Atrito
CPA01	Mistura Asfáltica Drenante Modificada com 1% do Resíduo do EVA
CPA02	Mistura Asfáltica Drenante Modificada com 2% do Resíduo do EVA
CPA03	Mistura Asfáltica Drenante Modificada com 3% do Resíduo do EVA
CP	Cimento Portland
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Processo Seco
EA	Equivalente de Areia
EPA	Epóxi-Asfalto
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Etileno Acetato de Vinila
HiMA	Asfalto Altamente Modificado
HVMA	Asfalto Modificado de Alta Viscosidade
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
IST	Índice de Suscetibilidade Térmica
MPG	Melhores Práticas de Gestão

MP	Processo Úmido/Seco
MR	Módulo de Resiliência
MSFP	Argamassa do Resíduo de Borracha
PB	Paraíba
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POE	Polioléfinico
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de Vinila
REF	Amostra de Referência Sem Modificação
REVA	Resíduo do Etileno Acetato de Vinila
RJ	Rejuvenescimento
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à Tração Por Compressão Diametral
SB	Estireno-Butadieno
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SEBS	Estireno-Etileno-Butadieno-Estireno
SIS	Estireno-Isopreno-Estireno
TPU	Poliuretano Termoplástico
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
Vv	Volume de Vazios
Vvc	Volume de Vazios Comunicantes
WP	Processo Úmido
WTR	Borracha de Pneus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVOS.....	22
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos.....	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	PAVIMENTAÇÃO: UMA ESTRATÉGIA DE CIDADANIA.....	23
2.1.1	A Impermeabilização do Solo: Consequências Urbanas.....	24
2.2	MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES.....	27
2.2.1	Camada Porosa de Atrito.....	27
2.2.2	Propriedades de Misturas Asfálticas Drenantes.....	32
2.2.2.1	<i>Parâmetros Volumétricos.....</i>	33
2.2.2.2	<i>Condutividade Hidráulica.....</i>	35
2.2.2.3	<i>Propriedades Mecânicas.....</i>	36
2.2.3	Camada Porosa de Atrito: Vantagens e Desvantagens.....	39
2.3	ASFALTO MODIFICADO.....	41
2.3.1	Polímeros como Materiais Modificadores.....	42
2.4	A REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UMA POSSIBILIDADE AMBIENTALMENTE CORRETA.....	45
2.4.1	A Geração de Resíduos na Indústria Calçadista.....	50
2.4.1.1	<i>O Resíduo do EVA na Pavimentação Asfáltica.....</i>	51
3	METODOLOGIA.....	54
3.1	ETAPA 1: MAPEAMENTO BIBLIOMÉTRICO.....	55
3.2	ETAPA 2: COLETA DOS MATERIAIS.....	56
3.2.1	Materiais Utilizados na Pesquisa.....	56
3.2.1.1	<i>Caracterização Física dos Materiais Granulares.....</i>	57
3.2.1.1.1	Análise Granulométrica.....	58
3.2.1.1.2	Massa Específica e Absorção.....	58
3.2.1.1.3	Índice de Forma.....	60
3.2.1.1.4	Abrasão Los Angeles.....	62
3.2.1.1.5	Equivalente de Areia.....	63
3.2.1.2	<i>Caracterização do Ligante Asfáltico.....</i>	64

3.2.1.2.1	Adesividade ao Ligante Asfáltico.....	66
3.2.1.2.2	Penetração.....	67
3.2.1.2.3	Densidade e Massa Específica.....	67
3.2.1.2.4	Viscosidade Saybolt Furol.....	69
3.2.1.2.5	Ponto de Fulgor e Espuma.....	70
3.2.1.2.6	Ponto de Amolecimento e Índice de Susceptibilidade Térmica.....	71
3.3	ETAPA 3: ENSAIOS NAS AMOSTRAS.....	73
3.3.1	Ensaio Marshall.....	75
3.3.1.1	<i>Parâmetros Volumétricos.....</i>	<i>76</i>
3.3.1.1.1	Densidade Aparente.....	76
3.3.1.1.2	Densidade Máxima Teórica.....	77
3.3.1.1.3	Volume de Vazios.....	78
3.3.1.1.4	Volume de Vazios Comunicantes.....	79
3.3.1.2	<i>Condutividade Hidráulica.....</i>	<i>80</i>
3.3.1.3	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral.....</i>	<i>82</i>
3.3.1.4	<i>Ensaio Cantabro.....</i>	<i>83</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS GRANULARES.....	85
4.1.1	Análise Granulométrica.....	85
4.1.2	Massa Específica e Absorção.....	87
4.1.3	Índice de Forma.....	88
4.1.4	Abrasão Los Angeles.....	89
4.1.5	Equivalente de Areia.....	90
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	90
4.2.1	Adesividade ao Ligante Asfáltico.....	90
4.2.2	Viscosidade Saybolt Furol.....	92
4.2.3	Penetração.....	95
4.2.4	Densidade e Massa Específica.....	97
4.2.5	Ponto de Fulgor e Espuma.....	98
4.2.6	Ponto de Amolecimento e Índice de Susceptibilidade Térmica.....	100
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES...	103
4.3.1	Parâmetros Volumétricos.....	104
4.3.2	Condutividade Hidráulica.....	111

4.3.2.1	<i>Relação Entre a Permeabilidade e os Vazios na Mistura Asfáltica.....</i>	113
4.3.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	114
4.3.3.1	<i>Relação Entre a Resistência à Tração e o Volume de Vazios.....</i>	116
4.3.4	Desgaste Cantabro.....	117
4.3.4.1	<i>Relação Entre o Desgaste Cantabro e o Volume de Vazios.....</i>	120
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	124
	REFERÊNCIAS.....	125

1 INTRODUÇÃO

A primeira metade do século XVIII foi marcada por revoluções industriais e tecnológicas, alterando profundamente a sociedade. Por consequência, o processo de urbanização se intensificou, haja vista que os centros urbanos passaram a subsidiar as fontes desenvolvimentistas e econômicas das cidades e dos grandes centros urbanos, o que antes pertencia consideravelmente à cultura agrícola (Reis, 2018). No Brasil, país com dimensões continentais, o processo desenfreado da urbanização, aliado às questões histórico-culturais, impulsionou o surgimento de diversos problemas socioeconômicos (Scotton; Miron; Lersch, 2021).

Nesse contexto, a urbanização transformou os espaços rurais em áreas urbanas, substituindo parte da vegetação por edificações, ruas, calçadas e pavimentos asfálticos, o que possibilitou o aumento do uso e ocupação do solo e, conseqüentemente, das áreas impermeabilizadas (Silva *et al.*, 2022). Entretanto, a maioria das cidades não foram planejadas, nem estruturadas para seguirem o processo de formação das comunidades. Sendo assim, muitos centros urbanos não possuem sistema de drenagem eficiente, que acompanhe as necessidades dos habitantes. Assim, a ausência de planejamento e a deficiência na implementação de infraestruturas eficientes têm agravado os problemas de enchentes e inundações nas áreas urbanas (Silva *et al.*, 2022).

Dessa forma, várias partes do mundo sofrem com enchentes e inundações que causaram tragédias nas últimas décadas. No Brasil, a tragédia climática mais recente foi registrada no primeiro semestre de 2024, no estado do Rio Grande do Sul (RS), onde as chuvas superaram o recorde histórico da região (Silva; Silva; Molin, 2024). De acordo com Henkes (2024), mais de 2,28 milhões de pessoas, de um total de 10,88 milhões de habitantes, foram afetadas.

Para enfrentar ou evitar catástrofes, urbanistas têm estudado novas soluções, como as chamadas cidades-esponjas ou “*water sensitive cities*” - cidades sensíveis à água. Nessa perspectiva, são cidades projetadas para que a água da chuva seja mantida e absorvida a montante, através de sistemas de drenagem urbana sustentáveis localizados a partir de sua infraestrutura verde. Ou seja, ela está preparada para reduzir os danos de alagamentos, inundações e enchentes, por meio de sistemas drenantes como parques alagáveis, telhados verdes, praças-piscina e pavimentos permeáveis (Brilhante, 2020; Fogueiro, 2019).

Dentre as principais estratégias a serem utilizadas pelo sistema de drenagem sustentável, o pavimento asfáltico drenante vem ganhando destaque como uma solução inovadora, conforme destacam Dorneles (2018), Santos *et al.* (2021), Silva *et al.* (2022) e Vieira *et al.*

(2022). De acordo com Menezes *et al.* (2022), países pioneiros, como China e Estados Unidos da América (EUA), preocupados com este cenário, já estão promovendo campanhas nacionais focadas na divulgação de diretrizes técnicas para a construção de pavimentos asfálticos drenantes. Essas estratégias urbanas visam melhorar a resiliência das cidades a enchentes pluviais e enfrentar os desafios da rápida urbanização e das mudanças climáticas (Fogei, 2019).

No Brasil, esse revestimento drenante é conhecido como Camada Porosa de Atrito (CPA), que possibilita a passagem da água facilitando a percolação do fluido no solo promovendo a drenagem urbana, recarga do lençol freático e até a diminuição dos ruídos causados pelo atrito pneu/asfalto. Entretanto, a CPA, por ser uma estrutura drenante, apresenta menor resistência mecânica que uma estrutura maciça, limitando o seu uso a pequenas faixas de rodovias, principalmente em locais passíveis de aquaplanagem devido a drenagem deficiente (Carmo; Soares; Zanette, 2021).

Além disso, outra consequência da urbanização está correlacionada com o aquecimento dos setores industriais, como a indústria de calçados. Esse setor, impulsionado pela crescente demanda urbana, produz grandes quantidades de borracha residual, que é uma forte fonte de poluição ambiental e desperdício de matéria-prima (Dorneles, 2018). Entretanto, a borracha residual, um material durável, resistente e flexível, pode manter seu volume sob carga, tornando-se adequada para reutilização. Contudo, quando descartada incorretamente, essa borracha, resistente a agentes biológicos e às intempéries, apresenta sérios problemas à comunidade em geral, sublinhando a necessidade de práticas sustentáveis no manejo desses resíduos (Ribeiro, 2019).

De acordo com Gama (2013), o polímero com teores de acetato de vinila de 18-28% em massa, possui aplicação na indústria de calçados. No processo de produção há uma sobra de aproximadamente 20% de aparas do EVA, produzindo o montante, estimado no Brasil, de descarte da ordem de 7.932 toneladas anuais, que são direcionados a aterros sanitários e lixões (Reis; Fernandes, 2021). Assim, tanto os aspectos econômicos quanto a poluição ambiental são justificativas para que existam esforços no sentido de se promover a reutilização ou reciclagem destes materiais poliméricos, no sentido de ser um aporte para a indústria da Construção Civil frente à reutilização de materiais que apresentem resultados positivos para os sistemas construtivos.

Nesse ínterim, diversos pesquisadores vêm estudando a utilização do resíduo do EVA para a indústria da pavimentação asfáltica convencional a exemplo de Lima (2008), Gama (2013), Pouranian, Imaninasab e Shishehbor (2020), Davoodi *et al.* (2022) e Hong *et al.* (2023).

A aplicação desses materiais aconteceu tanto na forma úmida quanto por via seca e promoveu a melhoria das propriedades mecânicas dos concretos asfálticos convencionais produzidos a partir da reutilização do resíduo sem comprometer suas propriedades de funcionalidade. Para além, foram verificadas também melhorias no ligante asfáltico modificado pelo resíduo. Logo, o resíduo do EVA pode ser visto como um possível material para aplicação na indústria da pavimentação asfáltica drenante, podendo melhorar também as propriedades mecânicas das misturas asfálticas drenantes sem comprometer suas propriedades funcionais.

É nesta esfera temática que este estudo se enquadra, o qual teve como objetivo avaliar as propriedades funcionais de misturas asfálticas drenantes modificadas pelo resíduo do EVA. Com isso, objetivou-se contribuir com os estudos na área da pavimentação asfáltica drenante, frente às questões ocasionadas pelas mudanças climáticas no planejamento das cidades sustentáveis, com intuito de proporcionar um destino ambientalmente adequado e promover uma alternativa de reutilização dos resíduos poliméricos da indústria calçadista.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades funcionais de misturas asfálticas do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) modificadas pelo resíduo do Etileno Acetato de Vinila (EVA) proveniente da indústria calçadista.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Analisar as propriedades físicas do ligante asfáltico modificado pelo resíduo do EVA;
- ii. Definir uma mistura asfáltica drenante modificada pelo resíduo do EVA, em função do teor do ligante betuminoso;
- iii. Investigar as propriedades volumétricas, permeáveis, mecânica e de adesão das misturas asfálticas drenantes modificadas pelo resíduo do EVA.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresentará o contexto que embasa a pesquisa, visando construir uma base teórica sólida que possa contribuir para a análise dos resultados e as conclusões finais deste estudo.

São abordados nas seções a influência da urbanização no acentuado aumento do uso e ocupação do solo, a necessidade de adoção de medidas compensatórias, as características essenciais de pavimentos asfálticos drenantes, produção de novos materiais sustentáveis e o reaproveitamento de resíduos industriais na construção de pavimentos asfálticos drenantes.

2.1 PAVIMENTAÇÃO: UMA ESTRATÉGIA DE CIDADANIA

O processo de pavimentação de estradas associa-se ao desenvolvimento cultural e de evolução da civilização humana (Bernucci *et al.*, 2022). Nessa perspectiva, a pavimentação se apresenta como uma prática essencial para o desenvolvimento das civilizações, remontando a tempos antigos. Estradas pavimentadas foram construídas pela primeira vez pelos sumérios e posteriormente pelos romanos, que criaram uma vasta rede de vias que facilitavam o transporte e a comunicação em seu império. Essas primeiras pavimentações utilizavam materiais provenientes de rochas, dispostas de maneira a garantir durabilidade e resistência ao tráfego (Moraes, 2016).

Entretanto, apenas com advento da Revolução Industrial, no século XVIII, que houve um dos marcos mais significativos na história da pavimentação. Com a mecanização da produção e a invenção de novas tecnologias, houve uma necessidade crescente de infraestruturas mais robustas para suportar o aumento no transporte de mercadorias e pessoas. Dessa forma, a mudança econômica trazida pela economia industrial, antes primordialmente atrelado à cultura agrícola, e, conseqüentemente, a produção de novos materiais e técnicas de construção transformou significativamente a dinâmica social, promovendo o êxodo rural e contribuindo para o crescimento desenfreado das áreas urbanas (Contreiras, 2015).

O crescimento acelerado da urbanização, especialmente nos séculos XIX e XX, intensificou a demanda por estradas e pavimentação adequadas. O surgimento de veículos automotores no início do século XX exigiu a construção de pavimentações mais resistentes e duráveis. Esse período viu a proliferação de novas técnicas e materiais, visando aumentar a eficiência e a durabilidade das estradas pavimentadas (Balbo, 2007).

No Brasil, a pavimentação ganhou impulso significativo no século XX, impulsionada pela necessidade de integrar as diversas regiões do país e fomentar o desenvolvimento econômico. Projetos de infraestrutura, como a construção de rodovias e avenidas nas grandes cidades, tornaram-se cruciais. Durante esse período, a pavimentação asfáltica emergiu como a principal técnica empregada, graças às suas propriedades vantajosas, como a capacidade de suportar o tráfego pesado, as variações climáticas do país e a própria cultura do petróleo no país (Eiras *et al.*, 2018).

Sob essa perspectiva, o desenvolvimento e a pavimentação de estradas visam integrar territórios e fomentar o desenvolvimento urbano, melhorando a qualidade de vida da população. Um sistema eficiente e de qualidade, além de beneficiar a economia, aumenta a competitividade do mercado interno e externo dos países. Contudo, apesar da importância dos pavimentos, a vasta pavimentação asfáltica pode trazer prejuízos para a sociedade devido à falta de políticas de planejamento urbano e à ineficiente drenagem das águas pluviais (Vilela; Fialho, 2018).

2.1.1 A Impermeabilização do Solo: Consequências Urbanas

A utilização do concreto asfáltico e a impermeabilização das áreas urbanas desempenham um papel crucial na infraestrutura das cidades, oferecendo superfícies resistentes e duráveis para estradas, calçadas e estacionamentos. Esses materiais ajudam a garantir a mobilidade eficiente dos veículos, promovendo o desenvolvimento econômico e social ao facilitar o transporte de pessoas e mercadorias. Além disso, a impermeabilização contribui para a prevenção da erosão do solo, protegendo as áreas urbanas de danos causados pela água. No entanto, o excesso de impermeabilização pode gerar consequências negativas, como o aumento na velocidade e quantidade de escoamento superficial, elevação da temperatura e deterioração da qualidade da água (Escobar, 2019).

Contudo, a maioria dos centros urbanos não foi concebida nem estruturada para seguir o desenvolvimento das comunidades, resultando no crescimento desorganizado da população. Como resultado, muitas cidades carecem de um sistema de drenagem eficaz, capaz de atender às necessidades dos residentes. Consequentemente, a falta de planejamento e implementação de obras de infraestrutura agrava a propagação de doenças, deslizamentos de terra, áreas sujeitas a alagamentos e inundações, podendo inclusive contaminar os corpos hídricos adjacentes (Silva *et al.*, 2022).

Nessa perspectiva, a expansão desordenada da ocupação urbana, sem uma devida integração no planejamento das diversas infraestruturas necessárias para o desenvolvimento

equilibrado da cidade, resultou no surgimento de problemas de drenagem durante eventos hidrológicos de alta intensidade. Em um primeiro momento, as áreas mais afetadas se localizam próximas aos cursos de água, ocupando a calha secundária e localizadas a jusante das áreas ribeirinhas. Com o crescimento territorial, a falta de fiscalização adequada para disciplinar o uso e a ocupação do solo levou ao agravamento dos problemas de alagamentos e até inundações (Garcia *et al.*, 2019).

Os desafios relacionados às águas pluviais nos centros urbanos são agravados por fatores naturais, como a topografia da região, que é predominantemente plana e com baixa inclinação, resultando em gradientes hidráulicos reduzidos. Além disso, intervenções humanas na bacia, como o aterramento de mangues, por meio da pavimentação, e a presença significativa de resíduos sólidos no sistema de drenagem devido à falta de políticas efetivas de conscientização e educação ambiental para a população, resultam em muitos problemas de drenagem (Teixeira, 2021).

À medida que as cidades continuam a se expandir, os desafios relacionados à gestão de águas pluviais se tornam mais prementes. Em resposta a isso, engenheiros e arquitetos urbanistas têm se voltado para soluções inovadoras, como as chamadas cidades-esponja. Estas cidades-esponja são projetadas com o objetivo de integrar espaços verdes e infraestrutura urbana de maneira a absorver e reter água da chuva, reduzindo assim os riscos de enchentes e inundações. Este conceito representa uma mudança significativa na abordagem tradicional da gestão de águas pluviais, priorizando a sustentabilidade e a resiliência urbana (Brilhante, 2020).

Alternativas recentemente estudadas são as medidas compensatórias, também referidas como Melhores Práticas de Gestão (MPG) ou *Best Management Practices* (BMP). Estas técnicas almejam mitigar os impactos da urbanização no ciclo hidrológico. Dentro desse contexto, as cidades-esponja são concebidas de modo que a água da chuva seja retida e absorvida no local onde cai, por meio de sistemas de drenagem urbana sustentável, integrados à infraestrutura verde da cidade (Brilhante, 2020; Coutinho, 2011).

A proposta central é interceptar a água da chuva antes de ela atingir o sistema de drenagem urbana (Fogeiro, 2019). Os principais sistemas compensatórios de gestão hídrica estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Técnicas Compensatórias da Gestão Hídrica

Autor (ano)	Técnica	Descrição
Ramos, Ramos e Lyra (2019)	Parques Lineares	Os parques lineares podem possuir diversas funcionalidades drenantes. Em suma, um parque linear é a junção de vários métodos inovadores como bacias de retenção que contém quadras esportivas, anfiteatros abertos ou playgrounds, lagos pluviais, pavimentos drenantes, dentre diversas outras soluções para drenagem urbana.
Canabrava Neto <i>et al.</i> (2021)	Telhado Verde	O telhado verde é uma cobertura de plantas e um telhado ecológico que tem ganhado cada vez mais espaço nas construções. Composto por vegetação, ele é mais que uma cobertura verde e envolve técnicas de impermeabilização e de plantio que devem ser feitas por um profissional qualificado.
Gonçalves e Teixeira (2021)	Poços de Infiltração	Trata-se de uma técnica de controle de volume na fonte, que contribui para a diminuição da pressão no sistema urbano de drenagem convencional e para recarga do lençol freático.
Rodríguez e Teixeira (2021)	Bacias de Detenção	Os reservatórios de detenção visam armazenar as águas pluviais e despejá-las na rede de forma lenta e gradual, oferecendo uma alternativa às enchentes.
Souza (2022)	Biovaletas	As biovaletas são tipos de valas a céu aberto que auxiliam na diminuição da área de contribuição das microbacias urbanas. Além disso, elas permitem o armazenamento temporário de águas pluviais e favorecem sua infiltração no solo.
Haraguchi <i>et al.</i> (2023)	Bacias de Retenção	As bacias de retenção são estruturas de armazenamento de águas pluviais, com o objetivo de regularizar o escoamento pluvial afluente, amortecendo os caudais de ponta e permitindo compatibilizar o seu valor com limites previamente fixados, ou impostos pela capacidade de vazão do meio receptor ou de um coletor ou emissário existente ou a construir.
Queiroz <i>et al.</i> (2024)	Trincheiras de Infiltração	As trincheiras são elementos versáteis implantados a pequena profundidade ou junto à superfície, com a finalidade de coletar as águas pluviais de afluência perpendicular a seu comprimento, facilitando o armazenamento temporário e/ou infiltração.
Santana (2024)	Pavimentos Permeáveis	O pavimento permeável é uma estrutura que permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento e aumentando a taxa de infiltração, sem causar dano à sua estrutura. São constituídos de superfícies permeáveis que permitem a infiltração de parte do escoamento superficial para dentro de uma camada de reservação situada sob o terreno, formada por pedras de granulometria diferenciada, a qual deve ser adequadamente protegida contra a colmatação.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Diante desse contexto, fica evidente o crescente interesse acadêmico e prático em relação a projeção sustentável de cidades-esponja como soluções para os desafios decorrentes da impermeabilização do solo. Em especial, os pavimentos asfálticos drenantes têm se destacado como a principal técnica adotada por países da Ásia Oriental, EUA e países europeus, os quais têm implementado campanhas nacionais focadas na disseminação de diretrizes técnicas para a construção de pavimentos drenantes, conforme destacado por Menezes *et al.* (2022).

Essas iniciativas urbanas não apenas visam melhorar a infraestrutura das cidades, mas também promovem maior resiliência diante das enchentes pluviais e das mudanças climáticas. Espera-se, portanto, que haja um impulso significativo na produção de pesquisas e estudos relacionados a esse tema, com o objetivo de analisar, aprimorar e monitorar os resultados das estratégias das cidades-esponja, como sugerido por Fogueiro (2019).

2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES

Com a evolução e a crescente adoção do tradicional concreto asfáltico impermeável, surgiram as inovadoras misturas asfálticas drenantes para aplicação em superfícies pavimentadas. Nesse contexto, um pavimento permeável, ou estrutura-reservatório, se destaca como um elemento que permite a livre passagem de fluidos, como a água da chuva, enquanto suporta o tráfego de veículos, animais, pessoas ou objetos. Adicionalmente, pode temporariamente reter água devido à porosidade da mistura asfáltica e facilitar a drenagem por meio da infiltração no solo subjacente, sempre que possível (Alecrim; Branco, 2019).

As misturas asfálticas permeáveis foram concebidas objetivando uma superfície altamente drenante a qual pudesse drenar as águas pluviais sobre a superfície do revestimento, evitando dentre outros fatores a formação de poças e, conseqüentemente, os efeitos de aquaplanagem e hidroplanagem. Tais águas, além de causar o indesejável efeito de *spray* de um transporte para outro, pode ocasionar uma película de água com espessura superior à macrotextura superficial (Gouveia, 2019).

Conforme observado por Garcia *et al.* (2019), os revestimentos asfálticos drenantes destacam-se como as melhores misturas permeáveis para aplicação em pavimentos no país. Sua elevada porcentagem de vazios comunicantes possibilita a infiltração da água por entre seus poros, desencadeando uma eficiente drenagem da superfície de rolamento.

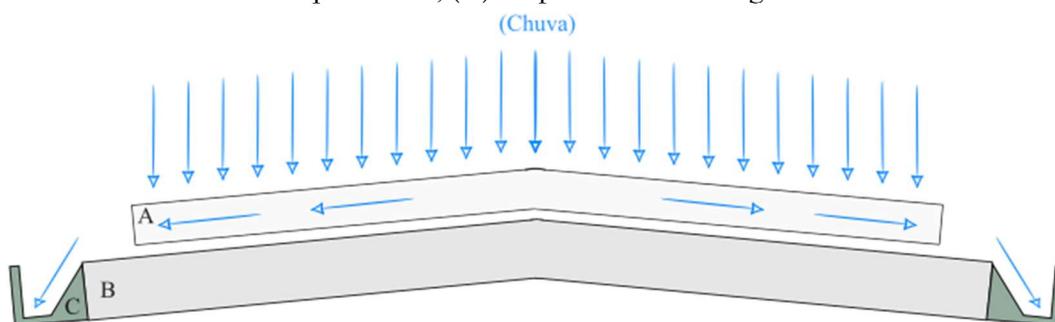
Nesse contexto, a Camada Porosa de Atrito (CPA) emerge como uma solução pioneira, destacando-se como o principal tipo de concreto asfáltico drenante utilizado. Sua capacidade de permitir a infiltração rápida da água e de manter a aderência dos veículos mesmo em condições adversas faz dela não apenas uma escolha técnica sábia, mas também uma estratégia fundamental na construção de estradas resilientes e sustentáveis (Balbo, 2007).

2.2.1 Camada Porosa de Atrito

As Camadas Porosas de Atrito (CPA) geralmente consistem em duas camadas distintas,

a saber: i) uma camada de revestimento asfáltico composta pelo próprio concreto asfáltico drenante; e ii) uma camada estrutural composta por misturas asfálticas densas convencionais, como observado por Oliveira (2003). Sob esse viés, o escoamento infiltra rapidamente no revestimento asfáltico drenante (espessura de 5 a 10 cm), passa por um filtro de agregado de 1,25 cm de diâmetro e, espessura de aproximadamente 2,5 cm e vai para uma câmara ou reservatório de pedras mais profundo com agregados de 3,8 a 7,6 cm de diâmetro. A capa de revestimento permeável somente age como um conduto rápido para o escoamento chegar ao reservatório de pedras (Sponchiado, 2021). A Figura 1 apresenta o princípio de funcionamento dos pavimentos asfálticos drenantes.

Figura 1 – Esquema de Funcionamento do Pavimento Asfáltico Drenante – (A) Camada Drenante; (B) Camada Impermeável; (C) Dispositivo de Drenagem Externo



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2003.

Nessa perspectiva, a CPA é caracterizada como uma mistura asfáltica usinada a quente com a presença de uma quantidade significativa de vazios. Essa característica é alcançada devido à proporção reduzida de filler, agregado fino e ligante asfáltico na composição da mistura (Balbo, 2007). Nesse contexto, ela opera como uma mistura aberta, caracterizada pela disposição de agregados graúdos da mesma granulometria, podendo ou não incluir filler. Esta mistura é comumente composta por brita 0, pó de pedra, filler e ligante asfáltico. Essas misturas com alto teor de vazios requerem a aplicação de camadas de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) para prevenir a infiltração das camadas subjacentes ao revestimento, conforme destacado por Balbo (2007).

Os agregados graúdos em misturas do tipo CPA desempenham um papel predominante na estrutura das misturas asfálticas drenantes, servindo como os principais suportes de carga. Por isso, é crucial que esses agregados tenham alta resistência à fragmentação, boas propriedades de microtextura e um intertravamento adequado para prevenir a quebra dos agregados, seu desprendimento e a colmatação do revestimento drenante (Bernucci *et al.*, 2022).

Para Gouveia (2019), os agregados finos nas misturas asfálticas tipo CPA mesmo em menor quantidade também desempenham um papel importante na coesão e estabilidade da mistura. Eles contribuem para a ligação entre os agregados graúdos, melhorando a resistência à deformação e aumentando a durabilidade da pavimentação, auxiliando na preservação do ligante na superfície dos agregados graúdos e no aumento da resistência à derrapagem da camada de rolamento, assim como controlam o excesso de escorrimento. No entanto, a presença de agregados finos também pode trazer desafios, como a redução da permeabilidade da mistura, o que pode comprometer a capacidade de drenagem. Além disso, um excesso de material fino pode levar à colmatção dos vazios, diminuindo a eficácia da drenagem e potencialmente causando problemas de aquaplanagem e redução da vida útil do pavimento. Por isso, é crucial controlar a quantidade e a qualidade dos agregados finos nas misturas asfálticas drenantes para equilibrar os benefícios de coesão e estabilidade com a necessidade de manutenção da permeabilidade adequada (Garcia *et al.*, 2019).

O teor de asfalto geralmente utilizado em misturas asfálticas do tipo CPA varia dependendo das especificações do projeto e das condições de aplicação, mas tipicamente está na faixa de 4% a 6% em relação ao peso total da mistura. Esse ligante asfáltico desempenha um papel crucial na qualidade da mistura asfáltica, pois é responsável por proporcionar coesão entre os agregados, garantindo resistência à deformação e durabilidade do pavimento. Para promover uma mistura asfáltica de qualidade, o ligante asfáltico deve ter características específicas, como boa adesão aos agregados, resistência à oxidação e à abrasão, além de ser capaz de manter suas propriedades mecânicas em uma ampla faixa de temperaturas. Uma mistura asfáltica bem-sucedida depende da seleção cuidadosa e do controle preciso do teor e das propriedades do ligante asfáltico, garantindo assim um desempenho duradouro e seguro das estradas (Balbo, 2007).

Conforme descrito por Gama (2013), as propriedades físicas dos ligantes asfálticos são frequentemente descritas por meio de parâmetros como índice de penetração, temperatura de amolecimento, sensibilidade térmica, viscosidade e ponto de fulgor. Vale destacar que até 2005 os ligantes asfálticos tinham sua classificação de duas maneiras: a partir da viscosidade há 60°C, gerando três categorias de Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP): CAP-7, CAP-20 e CAP-40, ou pela penetração a 25°C, com as categorias CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200. Entretanto, atualmente no Brasil, a categorização dos ligantes asfálticos se baseia exclusivamente na penetração (com 100g e 5 segundos, a 25°C), resultando em categorias de ligantes asfálticos duros, médios e moles (DNIT, 2006).

Além do ensaio de penetração, a aplicação do asfalto no Brasil regulamentada pela norma DNIT 095/2006 – EM, propõe a análise de consistência e segurança do asfalto por meio de diversos ensaios, incluindo os ensaios de viscosidade, ponto de amolecimento, ponto de fulgor e formação de espuma. Esses ensaios são essenciais para garantir que o asfalto atenda aos padrões de qualidade necessários para o uso em pavimentação, assegurando sua durabilidade e desempenho seguro nas diversas condições climáticas e de tráfego.

Cabe destacar que a suscetibilidade térmica também é um índice importante para consideração de ligantes betuminosos, haja vista que esta altera substancialmente seus estados físicos e de consistência das misturas tornando-os instáveis. Nessa perspectiva, é essencial garantir a estabilidade do pavimento para satisfazer de forma eficiente as exigências de tráfego. Quando a estabilidade não é adequada para suportar o tráfego, podem surgir deformações e afundamentos na superfície do pavimento. Além disso, as variações de temperatura também podem contribuir para o afundamento das trilhas de rodas. Portanto, para garantir a estabilidade do pavimento, é crucial utilizar um ligante asfáltico com uma susceptibilidade térmica próxima de zero (Kalantar; Karim; Mahrez, 2012). Esse índice pode ser determinado conforme procedimentos do departamento de transportes do país (DNIT, 2006).

Para além, o ligante asfáltico, quando misturado a quente com os agregados pétreos, envelhece, aumentando a rigidez da mistura, o que pode ser positivo na distribuição de carga e prevenção de deformações, mas também pode causar trincas e desintegração da camada asfáltica. Esse envelhecimento ocorre em duas fases: i) durante a preparação da mistura, chamado de envelhecimento de curto prazo; e ii) após a construção do pavimento, conhecido como envelhecimento de longo prazo. Durante o envelhecimento de curto prazo, as propriedades da mistura mudam rapidamente, enquanto no de longo prazo, as mudanças ocorrem mais gradualmente ao longo de dois ou três anos. Nesse contexto, a seleção do ligante asfáltico a depender das solicitações climáticas, de tráfego e, especialmente, do tipo de concreto asfáltico são primordiais para garantia da estabilidade, segurança e funcionalidade do material empregado (Bernucci *et al.*, 2022).

Para Dresch (2016), o asfalto utilizado na mistura asfáltica do tipo CPA requer características específicas para garantir seu desempenho. É essencial que esse ligante asfáltico tenha uma baixa sensibilidade a variações térmicas e uma resistência elevada ao envelhecimento. A quantidade desse ligante costuma ser cuidadosamente ajustada devido às particularidades dos agregados, levando em consideração fatores como tipo, forma, composição, viscosidade e especificidades do próprio ligante e da composição granulométrica da mistura asfáltica.

No Brasil, o projeto de pavimentos asfálticos tipo CPA é padronizado pela norma DNER-ES 386/99. A especificação estabelece cinco faixas de dosagem e os requisitos mínimos a serem atendidos por norma, as quais devem apresentar um percentual de vazios (Vv) de 18-25%, um desgaste à abrasão Los Angeles de até 25% e uma resistência à tração por compressão diametral (RT) de no mínimo 5,5 kgf/cm².

Além das especificações solicitadas pelo departamento de transportes do Brasil, características funcionais e de trabalhabilidade em campo das misturas também são fatores importantes no tocante a produtividade da mistura. Uma das principais características é a condutividade hidráulica de misturas asfálticas drenantes. Embora o Brasil não possua uma normativa vigente para padronização e análise de permeabilidade em misturas asfálticas, a literatura especializada indica a classificação proposta por Lambe & Whitman (1974). A classificação divide o grau de permeabilidade do material em cinco classificações, a saber: i) elevada; ii) média; iii) baixa; iv) muito baixa; e v) praticamente impermeável. A classificação é apresentada pela Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação Segundo Grau de Permeabilidade

Grau de Permeabilidade	Valor de K (m/s)
Elevada	Superior a 10^{-3}
Média	10^{-3} - 10^{-5}
Baixa	10^{-5} - 10^{-7}
Muito baixa	10^{-7} - 10^{-9}
Praticamente impermeável	Menor que 10^{-9}

Fonte: Lambe; Whitman, 1974.

Dresch (2016) analisou as propriedades volumétricas, funcionais, mecânicas, e adesivas de cinco misturas asfálticas drenantes tipo CPA utilizadas em obras de rodovias federais do Rio Grande do Sul (RS) BR 158 e BR 285. As misturas foram moldadas na faixa V ES 386 (DNER, 1999), como justificativa de ser a faixa com os melhores desempenhos apresentados pela literatura. Os resultados volumétricos obtidos pelo estudo apontaram que a diminuição do volume de vazios influencia diretamente nas propriedades de condutividade hidráulica e de resistência das misturas asfálticas drenantes. No ensaio de perda de massa, a autora observou que o aumento do teor de ligante melhora a resistência ao desgaste abrasivo. E o ensaio de resiliência das misturas (MR) mostrou que, com mais ligante, há o aumento da deformabilidade e o valor de MR diminui, indicando que o ligante asfáltico reduz a rigidez das misturas.

Alecrim, Maia & Branco (2019) avaliaram misturas asfálticas drenantes enquadradas na Faixa II ES 386 (DNER, 1999), dosadas pelo método Marshall. A mistura analisada alcançou

um teor ótimo de ligante de 4,2%, correspondente a um Vv de 21,5%. Os resultados mostraram que o aumento do teor de ligante melhora a resistência ao desgaste e a deformabilidade das misturas, mas reduz a rigidez. Para além, o ensaio de desgaste por abrasão demonstrou também que, para as misturas recicladas, há uma perda nessa propriedade provavelmente devido a mistura entre o Asfalto Modificado por Polímero (AMP) e o ligante envelhecido. Essas características indicam que misturas com maior teor de ligante são mais duráveis e flexíveis, sendo ideais para aplicações que exigem boa drenagem e resistência ao desgaste.

Quanto as propriedades funcionais de pavimentos asfálticos drenantes, Alves *et al.* (2018) verificaram a eficiência de uma mistura asfáltica drenante em reduzir o ruído nas rodovias. Utilizando a metodologia Faixa V ES 386 (DNER, 1999), com um teor de ligante de 4%, Vv de 20,60% e RT de 0,85 MPa, o revestimento CPA apresentou o menor ruído com 78 dB, quando comparado ao CA convencional (83-84 dB). A diferença de 6,0 dB entre os revestimentos representou uma perda de energia acústica superior a 50%, evidenciando o potencial impacto positivo dessas tecnologias na mitigação do ruído em futuros projetos rodoviários.

Nessa perspectiva, a utilização do concreto asfáltico drenante em rodovias contribui significativamente para a diminuição do ruído ambiental devido à sua alta permeabilidade. Este tipo de pavimento permite uma melhor drenagem da água, reduzindo o ruído gerado pela interação pneu-pavimento, especialmente em condições de pista molhada. Além disso, a permeabilidade do asfalto drenante reduz o efeito de velocidades mais altas sobre o aumento do ruído. Assim, a implementação de asfalto drenante não só melhora a segurança viária em condições úmidas, mas também mitiga o impacto acústico nas rodovias, proporcionando um ambiente mais silencioso e confortável para os usuários (Aps; Bernucci, 2016).

Nesse contexto, a definição do esqueleto mineral e dosagem das misturas asfálticas drenantes está diretamente relacionada com as propriedades volumétricas, funcionais, mecânicas e adesivas das CPAs e solicitadas pelo departamento de transportes do país. Logo, a próxima seção abordará detalhadamente as principais propriedades das misturas asfálticas obtidas pelos estudos, os quais embasaram as análises e discussões dos resultados obtidos pelo estudo.

2.2.2 Propriedades de Misturas Asfálticas Drenantes

A determinação das propriedades de misturas asfálticas drenantes é fortemente influenciada pelo esqueleto mineral das misturas, o qual depende diretamente dos parâmetros

volumétricos, funcionais e mecânicos. Esse esqueleto mineral é composto por uma combinação específica de agregados que confere ao concreto asfáltico suas características drenantes, permitindo a rápida evacuação da água. A complexidade desses parâmetros volumétricos, que incluem a granulometria e a capacidade drenante, bem como os parâmetros mecânicos, torna o processo de formulação e análise dessas misturas um desafio técnico significativo. A interação entre esses fatores é essencial para garantir a durabilidade e a eficiência dos pavimentos drenantes, que devem suportar cargas de tráfego enquanto mantêm a permeabilidade necessária para reduzir o acúmulo de água na superfície (Bernucci *et al.*, 2022).

2.2.2.1 Parâmetros Volumétricos

Os teores de projeto de misturas asfálticas drenantes são definidos a partir dos parâmetros volumétricos, que são determinados por meio do volume de ligante asfáltico e dos agregados da mistura, objetivando produzir uma mistura a partir de suas propriedades físicas em projeto. Para simplificar o processo, utiliza-se a conversão de massas em volumes, considerando as massas específicas dos materiais envolvidos. Essa abordagem facilita a quantificação e o ajuste das proporções dos componentes da mistura para alcançar as propriedades desejadas. Além disso, a norma para concretos asfálticos drenantes (CPA) exige a determinação de parâmetros mecânicos, como a resistência e a deformabilidade, bem como a avaliação da adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados. Essas exigências são fundamentais para garantir a performance e a durabilidade da pavimentação, assegurando que ela suporte as cargas de tráfego e mantenha suas propriedades drenantes ao longo do tempo (Bernucci *et al.*, 2022).

Nesse contexto, os procedimentos de dosagem determinam o teor de projeto das misturas asfálticas, que é obtido principalmente para um volume de vazios que varia de 18 a 25% (DNER, 1999). Para determinar esse teor, as misturas são analisadas quanto à densidade aparente, à densidade máxima teórica e ao volume de vazios comunicantes. Esses parâmetros são avaliados para garantir que a mistura atenda economicamente a todos os critérios, sem otimizar apenas uma propriedade específica, assegurando assim boas condições de operação e durabilidade do pavimento (Schneider, 2019).

Esses parâmetros visam limitar o limiar dos valores de volume de vazios para permitir um pequeno aumento da densificação da camada devido à ação do tráfego, além de corresponder a um volume mínimo de vazios que possibilite a expansão térmica dos agregados e do ligante asfáltico. Isso é fundamental para evitar a exsudação do ligante para a superfície.

O volume de vazios é fixado para garantir uma densidade suficiente, de modo que a mistura asfáltica mantenha suas propriedades estruturais e funcionais, assegurando a durabilidade e a performance do pavimento ao longo do tempo (Alecrim, Maia & Branco, 2019).

Dessa forma, o vazio de misturas asfálticas drenantes refere-se ao volume de espaços vazios ou poros presentes dentro da estrutura compactada do concreto asfáltico. Esses vazios são essenciais para permitir a drenagem eficiente da água através dos vazios comunicantes formados pelo esqueleto mineral da mistura, reduzindo o risco de acúmulo de água na superfície e melhorando a segurança e durabilidade do pavimento. Na literatura vigente, o volume de vazios varia de acordo com os objetivos e faixa de moldagem de cada estudo, situando-se tipicamente entre 18% - 25%, o que garante a permeabilidade necessária sem comprometer a integridade estrutural da camada asfáltica drenante (DNER, 1999; Balbo, 2007; Bernucci *et al.*, 2022). A Tabela 3 apresenta alguns resultados obtidos na literatura.

Tabela 3 – Volume de Vazios de Misturas Asfálticas Drenantes na Literatura

Autores (ano)	Volume de vazios (%)
Dumke, 2005	20,50 - 26,50
Dresch, 2016	17,00 - 22,70
Schneider, 2016	13,48 - 22,21
Martinez, 2017	21,00 - 12,00
Jacques, 2018	18,20 - 21,00
Garcia <i>et al.</i> , 2019	22,96 - 24,18
Maia <i>et al.</i> , 2019	18,00 - 25,00
Silva, 2019	18,00 - 35,20
Hammes, 2022	20,30 - 23,70
Silva <i>et al.</i> , 2022	21,00 - 21,70

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O elevado volume de vazios nas misturas asfálticas drenantes é crucial para garantir sua funcionalidade, especialmente no que diz respeito à condutividade hidráulica. A presença de uma quantidade significativa de vazios permite que a água penetre e escoe através da estrutura do pavimento, prevenindo o acúmulo de água na superfície e melhorando a segurança (Dresch, 2016).

A distribuição e a proporção de agregados graúdos e miúdos na mistura desempenham um papel fundamental nesse processo. Os agregados graúdos formam a estrutura esquelética que cria grandes canais de vazios, enquanto os agregados miúdos preenchem os espaços menores, proporcionando a estabilidade necessária sem obstruir a passagem da água. Essa combinação otimiza a condutividade hidráulica da mistura, assegurando que o pavimento mantenha sua capacidade de drenagem eficiente e prolongue sua durabilidade. É importante

ressaltar que não é apenas o alto volume de vazios que facilita a drenagem superficial, mas também a interconexão desses vazios, que permite um fluxo contínuo de água através da camada asfáltica (Ono; Balbo; Cargnin, 2017).

Dessa forma, o volume de vazios comunicantes desempenha um papel crucial na eficácia da permeabilidade das misturas asfálticas drenantes. Esses vazios comunicantes são aqueles que estão interligados, permitindo que a água se desloque livremente através da estrutura do pavimento. Quanto maior o volume de vazios comunicantes, mais eficiente é a drenagem da água, pois ela pode fluir sem obstáculos pela camada asfáltica. Portanto, é fundamental controlar e otimizar esse volume durante o processo de dosagem e compactação da mistura para garantir uma permeabilidade adequada (Martinez, 2017).

2.2.2.2 Condutividade Hidráulica

No Brasil, a normatização da taxa de permeabilidade em concretos asfálticos ainda não é uma realidade estabelecida, o que resulta em uma variação dos valores de permeabilidade dependendo da faixa de moldagem do concreto asfáltico drenante. Nesse contexto, o esqueleto mineral dos agregados graúdos surge como um elemento determinante para a funcionalidade eficaz dessas misturas. Devido à sua predominância na composição, os agregados graúdos desempenham um papel crucial na formação da estrutura esquelética da mistura, criando espaços vazios que permitem a passagem da água (Dresch, 2016).

De acordo com Jing *et al.* (2019), a forma e o tamanho dos agregados exercem um papel crucial nos concretos permeáveis. Agregados com formas mais complexas ou irregulares tendem a criar uma quantidade maior de poros na mistura. Isso acontece porque esses agregados têm maior dificuldade em se compactar eficientemente, resultando em uma distribuição menos uniforme dentro da matriz asfáltica. Essa porosidade efetiva é essencial para garantir a funcionalidade dos CPAs, permitindo a rápida evacuação da água da superfície do pavimento, o que reduz significativamente o risco de acúmulo de água e, conseqüentemente, de aquaplanagem. Portanto, a seleção cuidadosa de agregados com formas e tamanhos adequados é fundamental para otimizar a porosidade efetiva dos CPAs, garantindo sua eficácia como solução para o gerenciamento de águas pluviais e melhorando a segurança e durabilidade dos pavimentos.

Para Balbo (2007), a utilização granulométrica de brita 0 desempenha um papel crucial na funcionalidade hidráulica do esqueleto mineral da CPA. Essa constância é fundamental para garantir resultados otimizados na permeabilidade, especialmente em ensaios de carga variável

e carga constante. Ao empregar britas de menor tamanho, a estrutura do pavimento é mais uniforme, proporcionando uma distribuição mais homogênea dos vazios e uma melhor interconexão entre os agregados. Isso resulta em uma maior eficiência na drenagem da água, contribuindo para a durabilidade e o desempenho adequado do pavimento ao longo do tempo.

A Tabela 4 apresenta alguns resultados obtidos por estudos acerca da taxa de permeabilidade de concretos asfálticos permeáveis.

Tabela 4 – Permeabilidade de Misturas Asfálticas Drenantes na Literatura

Autores (ano)	Coefficiente de permeabilidade (mm/h)
Dumke, 2005	226800,00 – 32400,00
Pellizzari, 2013	72,00 – 180,00
Dresch, 2016	360,00 – 33120,00
Schneider, 2016	2160,00 – 10440,00
Furtado, 2017	7200,00 – 9720,00
Jacques, 2018	144000,00 – 327600,00
Garcia <i>et al.</i> , 2019	20880,00 – 23400,00
Silva, 2019	3960,00 – 12600,00
Tiscoski, 2019	1440,00 – 9720,00
Hammes, 2022	2880,00 – 7200,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

É imperativo ressaltar que embora as propriedades de funcionalidade hidráulica sejam essenciais no caso de misturas asfálticas permeáveis, é necessário encontrar um equilíbrio a partir dos parâmetros de projeto, pois uma quantidade excessiva de vazios pode resultar em uma diminuição da resistência mecânica da mistura, como por exemplo na resistência à tração e na perda de massa por abrasão, as quais são propriedades que podem ser comprometidas com o aumento dos vazios na mistura, resultando em resultados insatisfatórios (Bernucci *et al.*, 2022). Dessa forma, é imprescindível considerar cuidadosamente a relação entre os volumes de vazios e a resistência mecânica da mistura para garantir um desempenho satisfatório do pavimento.

2.2.2.3 Propriedades Mecânicas

A normativa vigente para pavimentos flexíveis no Brasil fixa as condições de uso de concretos asfálticos drenantes com duas propriedades mecânicas básicas a serem atendidas, a saber: i) Resistência à tração por compressão diametral (RT); e ii) perda de massa por abrasão (DNER, 1999). O departamento de transportes determina que a RT mínima é de 0,55 MPa e a

perda de massa por abrasão dos corpos de prova não apresente um percentual maior que 25%, conforme apresentado na seção 2.2.1.

Na Tabela 5 são apresentados alguns dos resultados obtidos por estudos realizados por Dumke (2005), Dresch (2016), Schneider (2016), Martinez (2017), Jacques (2018), Maia *et al.* (2019), Silva (2019), Tiscoski (2019), Hammes (2022) e Silva *et al.* (2022).

Tabela 5 – Resistências à Tração (RT) e à Abrasão de Misturas Asfálticas Drenantes

Autores (ano)	RT (MPa)	Desgaste por abrasão (%)
Dumke, 2005	0,35 - 0,85	13,50 - 75,00
Dresch, 2016	0,59 - 1,67	4,30 - 44,00
Schneider, 2016	0,719 - 1,18	11,27 - 53,00
Martinez, 2017	0,42 - 0,83	2,00 - 70,00
Jacques, 2018	0,39 - 0,63	11,00 - 22,00
Maia <i>et al.</i> , 2019	0,55 - 0,61	18,20 - 25,00
Silva, 2019	0,17 - 0,31	16,26 - 22,36
Tiscoski, 2019	0,56 - 0,81	8,63 - 11,96
Hammes, 2022	0,64 - 0,50	6,70 - 15,20
Silva <i>et al.</i> , 2022	1,09 - 1,14	Não analisou

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O estudo de Martinez (2017) evidenciou a relação entre o volume de vazios e a resistência à tração em misturas asfálticas drenantes tipo CPA. Os resultados mostraram que há uma correlação significativa entre esses dois parâmetros, onde um volume adequado de vazios é crucial para otimizar a resistência à tração do revestimento asfáltico drenante. O estudo evidenciou que volumes de vazios muito baixos podem resultar em uma densidade excessiva, comprometendo a flexibilidade da mistura e aumentando a susceptibilidade a trincas por tração. Por outro lado, volumes de vazios excessivos podem reduzir a coesão interna da mistura, diminuindo sua capacidade de resistir a forças trativas. Portanto, a manutenção de um volume de vazios equilibrado é essencial para garantir a integridade e durabilidade do pavimento asfáltico.

Assim como o estudo de Martinez (2017), o estudo de Roseno (2005) verificou uma diminuição da resistência à tração das misturas asfálticas drenantes com o aumento do volume de vazios. No estudo foram analisados corpos de prova moldados com teores de asfalto de 3,5% e 4,0%, mantendo a mesma temperatura e variando a energia de compactação para observar a variação do índice de vazios. Os resultados mostraram que corpos de prova com menores índices de vazios (12% a 13%) apresentaram uma maior resistência à tração. Em contraste, aqueles com maiores percentuais de vazios (17% a 19%) demonstraram uma diminuição significativa de 33% da resistência à tração das misturas asfálticas drenantes.

Para além, uma outra característica influente para as propriedades mecânicas é o teor de asfalto na mistura. Para Dresch (2016), o teor de asfalto desempenha um papel crucial na resistência à tração em misturas asfálticas drenantes. Um teor adequado de ligante asfáltico é fundamental para garantir a coesão e a adesividade entre os agregados, melhorando a capacidade da mistura de resistir às forças provenientes do tráfego. No entanto, essa relação não é linear; enquanto teores crescentes de asfalto podem inicialmente aumentar a resistência à tração, proporcionando uma maior flexibilidade e durabilidade ao pavimento, um excesso de ligante pode levar a uma saturação da mistura, diminuindo a porosidade e comprometendo a funcionalidade drenante. Além de causar o surgimento de defeitos e um possível escorrimento do ligante, como no caso de exsudações (DNIT, 2003). Portanto, é essencial equilibrar o teor de asfalto para otimizar tanto a resistência à tração quanto a permeabilidade da mistura, assegurando que o pavimento mantenha sua integridade estrutural e sua capacidade de drenagem eficiente (Martinez, 2017).

Nesse contexto, a relação entre o teor de asfalto e a resistência ao desgaste é particularmente relevante quando se considera o desgaste superficial das misturas asfálticas causado pelo atrito pneu-pavimento. Esse atrito é uma das principais causas de deterioração superficial dos pavimentos, exigindo uma mistura que não apenas seja resistente à tração, mas que também mantenha sua integridade sob condições de uso (Quintana; Cotte; Tabares, 2014).

Nos estudos de Dumke (2005), Schneider (2016), Punith *et al.* (2011) e Martinez (2017) foram observados uma diminuição da perda de massa por abrasão com o aumento do teor de asfalto nas misturas. Entretanto, quando avaliado o comportamento em função do volume de vazios, os autores verificaram que para um mesmo volume de vazios a abrasão é menor, assumindo o CAP utilizado nas misturas um valor intermediário.

No estudo realizado por Vargas, Maquilón & Quintana (2016), avaliou-se a resistência ao desgaste por abrasão, sob carga monotônica e cíclica de uma mistura asfáltica drenante. O melhor comportamento da mistura analisada foi alcançado quando foi utilizado um teor de asfalto na faixa de 4% a 4,5%. Observou-se uma diminuição da resistência ao desgaste por abrasão em misturas fabricadas a 160 °C, cuja temperatura de compactação é de 150 °C. Em contrapartida, misturas fabricadas a 170 °C apresentaram uma resistência incremental ao desgaste, especialmente quando a temperatura de compactação foi ajustada para 160 °C. Esses resultados destacam a importância de controlar não apenas o teor de asfalto, mas também as temperaturas de usinagem para otimizar a resistência ao desgaste das misturas asfálticas drenantes.

Em síntese, percebe-se que as misturas asfálticas drenantes tendem a apresentar propriedades volumétricas e mecânicas semelhantes, tendo em vista a padronização técnica e os objetivos dos estudos. Essas misturas são projetadas para equilibrar adequadamente o teor de asfalto, o volume de vazios e a temperatura de fabricação e compactação, a fim de otimizar as características mecânicas do material em campo, além de assegurar suas características funcionais.

2.2.3 Camada Porosa de Atrito: Vantagens e Desvantagens

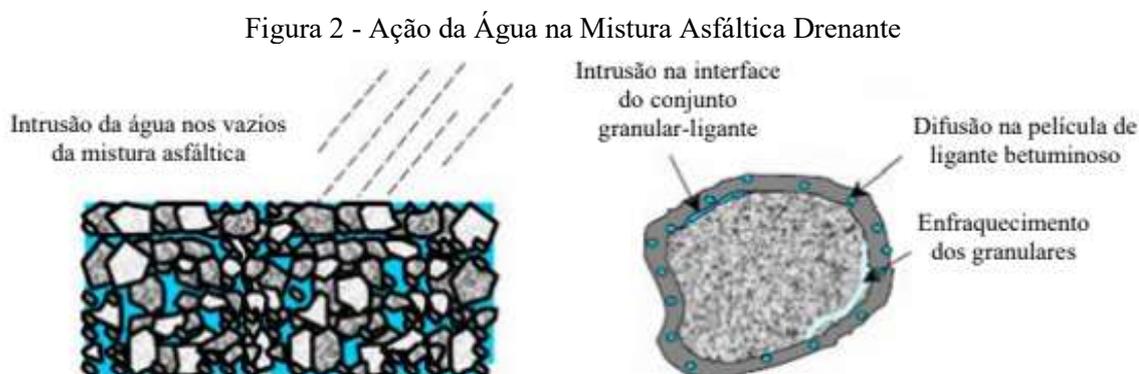
Em condições adequadas, a CPA pode substituir as medidas tradicionais do gerenciamento das águas pluviais, por meio das vantagens do concreto asfáltico permeável, conforme destacado por Gouveia (2019), sendo as principais estratégias:

- Tratamentos da água;
- Reabastecimentos das reservas de água subterrânea presentes nos aquíferos subjacentes;
- Diminuição da necessidade de elementos da drenagem para o manejo das águas pluviais, incluindo tubulações, bueiros de captação, e estruturas de contenção e retenção;
- Eficiência da aderência entre o pneu do veículo e a superfície do pavimento, mesmo em condições de eventos de chuvas;
- Diminuição dos níveis de ruído gerados pelo contato pneu-revestimento;
- Aumento da durabilidade das camadas do pavimento devido ao planejamento eficaz das camadas estruturantes do pavimento.

Por outro lado, o processo de degradação de uma mistura asfáltica drenante, reside no fato de possuírem muitos vazios, resultando em uma quantidade muito menor de ligação entre o ligante asfáltico e agregados se comparados à mistura impermeável. Este fator causa a ruptura de forma mais acentuada do ligante e o agregado, podendo acometer a desagregação da mistura (*stripping*), facilitando a percolação no revestimento asfáltico drenante (Hammes, 2022).

A entrada de água nos espaços vazios das composições asfálticas altera o equilíbrio das forças de resistências mecânicas das misturas asfálticas drenantes. Isso ocorre ao afetar a camada de ligante betuminoso que reveste a superfície granular, resultando na deterioração da resistência coesiva da mistura asfáltica devido à penetração da água na interface entre o granular e o ligante. Além disso, a água pode se difundir através da película de ligante betuminoso em forma de emulsão reversa, originando gotículas dentro dessa película e conseqüentemente

enfraquecendo a coesão do ligante. Esse processo também contribui para a diminuição da resistência coesiva do granular (Teixeira, 2021). O esquema da Figura 2 apresenta as formas de ação da água nas misturas do tipo CPA.



Fonte: Teixeira, 2021.

Entretanto, não só os aspectos físico-mecânicos podem sofrer variações e perdas, mas também as próprias características de permeabilidade da mistura asfáltica drenante. Conforme mencionado por Oliveira (2003), um dos desafios que impactam a permeabilidade é o fenômeno de colmatação dos poros da mistura, que se caracteriza pela diminuição da área transversal dos espaços vazios em um meio poroso, comprometendo assim o fluxo percolante. É relevante ressaltar que esse processo é mais pronunciado nos primeiros dois anos de uso do pavimento; contudo, após esse período, a permeabilidade tende a permanecer praticamente constante (Ono; Balbo; Cargnin, 2017).

Os materiais responsáveis pela obstrução dos poros consistem em uma variedade de fontes, incluindo resíduos resultantes do desgaste e da oxidação do ligante, materiais transportados por veículos e partículas de poeira e resíduos provenientes de atividades domésticas e industriais. Esse processo ocorre de forma mais gradual em vias com alto volume de tráfego, uma vez que o movimento dos veículos gera uma sucção que tende a remover a obstrução dos vazios. A obstrução dos poros, por sua vez, influencia diretamente os procedimentos de manutenção do revestimento permeável, conferindo-lhes características específicas (Campos, 1998; Garcia *et al.*, 2019).

Nesse cenário, a adoção de pavimentos asfálticos drenantes implica em um investimento mais substancial, dada a necessidade de agregados de alta qualidade e, especialmente, a utilização de ligantes asfálticos modificados. Para mitigar esses custos, uma abordagem viável é a reutilização de materiais poliméricos compatíveis e resíduos industriais que possam conferir propriedades mecânicas e de aderência aprimoradas às misturas asfálticas drenantes. Estudos

realizados por Chai *et al.* (2020), Hu *et al.* (2020), Quan, Xu e Sun (2022), Jing *et al.* (2023) e Yaofei *et al.* (2024) mostram que essa abordagem não só oferece uma solução economicamente viável, mas também contribui para uma alternativa ambientalmente consciente para a indústria da pavimentação asfáltica.

2.3 ASFALTO MODIFICADO

O asfalto é um dos materiais de construção mais ancestrais e multifacetados, com anotações de utilização remontando desde 6.000 a.C. Em épocas passadas, sua impermeabilidade e capacidade de adesão foram exploradas por vários povos para diversas finalidades, incluindo como substância aglutinadora, isolante e de cobertura. Contudo, o pioneirismo na aplicação do asfalto em pavimentação foi documentado em Lyon, França, em 1829, quando um composto alcatroado foi empregado para aprimorar as condições de trafegabilidade (Instituto de Asfalto, 1989). No presente, o asfalto é extensivamente utilizado na construção de vias, especialmente como elemento de ligação em superfícies de pavimentos flexíveis (Bernucci *et al.*, 2022).

Conforme estabelecido pela ABNT NBR 7208 (1990), o asfalto é descrito como uma substância complexa de origem orgânica, podendo ser natural ou de origem pirogênica. É composto por uma mistura de hidrocarbonetos, que podem variar em consistência de sólida, líquida a gasosa, muitas vezes acompanhada por seus derivados não metálicos. Essa mistura é completamente solúvel em dissulfeto de carbono e apresenta as seguintes características fundamentais:

- Aglomerante, como a cal ou cimento, porém não precisa de água para fazer pega;
- Possui força adesiva e repele a água;
- É termossensível, ou seja, possui sensibilidade elevada ao calor;
- Funde e solidifica facilmente sem haver perda das propriedades;
- Não possuem um ponto de fusão definido (a temperatura em que sua estrutura cristalina se desfaz), amolecendo em uma ampla gama de temperaturas;
- É quimicamente inerte, não reagindo com cargas ou agregados minerais que são adicionados para efeito de enchimento;
- Apresenta ductilidade muito influenciada pela exposição ao calor e luz solar.

Nessa perspectiva, o asfalto possui características que o tornam um material excelente para uso na indústria da pavimentação, tais como sua flexibilidade, durabilidade e capacidade de adaptação a diferentes condições climáticas. No entanto, o aumento constante do tráfego nas rodovias exerce influência diretamente nas mudanças das propriedades do revestimento asfáltico, levando ao desgaste acelerado, formação de trincas e deformações. Para mitigar esses problemas e aumentar a vida útil dos revestimentos dos pavimentos asfálticos, uma das estratégias empregadas é a utilização do asfalto modificado, que envolve a adição de polímeros ou outros aditivos para melhorar suas propriedades mecânicas e de resistência ao tráfego intenso (Bernucci *et al.*, 2022).

2.3.1 Polímeros como Materiais Modificadores

Originária do grego, a palavra "polímero" deriva de "*poli*" (muitos) e "*mero*" (unidade de repetição), denotando uma macromolécula composta por várias unidades de repetição, chamadas de "*meros*", que estão conectadas por ligações covalentes. O monômero, uma molécula contendo uma única unidade de repetição, é a matéria-prima para a produção de um polímero (Canevarolo Júnior, 2006).

Nessa perspectiva, os polímeros representam substâncias macromoleculares, podendo ser encontrados na natureza, como na composição da madeira, óleo lubrificante e cortiça, ou serem fabricados artificialmente através da concatenação ordenada de moléculas de pequeno porte, conhecidas como monômeros (Lima, 2008).

Considerando a vasta diversidade de polímeros disponíveis para atender às necessidades de diversas áreas de aplicação, surgiu a demanda por sua classificação. Assim, eles podem ser categorizados, de acordo com Negrão (2006) em:

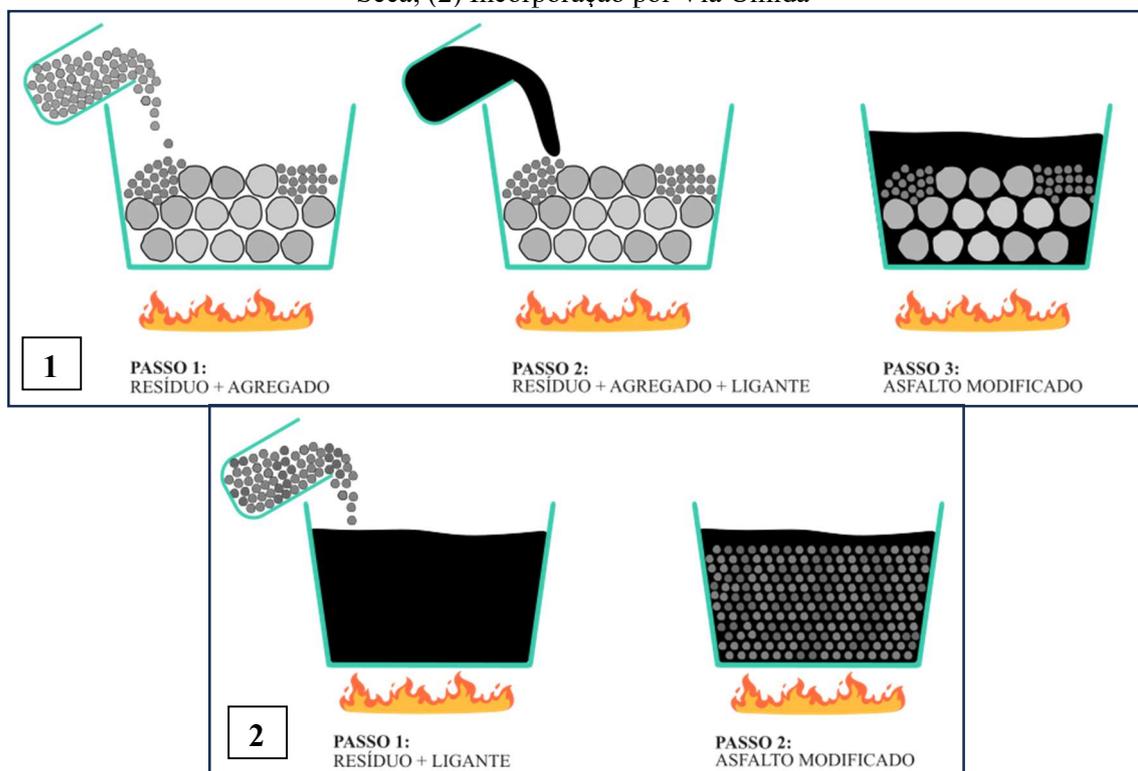
- Quanto à origem: Podem ser classificados em polímeros naturais (ocorrem naturalmente e podem ser encontrados em plantas e animais) ou polímeros sintéticos (são os polímeros artificiais advindos da produção laboratorial);
- Quanto ao método de preparação: Podem ser classificados em polímeros de adição (não há perda de massa na forma de compostos de baixa massa molar, isto é, não há formação de subprodutos) ou polímeros de condensação (originam-se através da reação de dois grupos funcionais reativos, havendo a eliminação de moléculas de baixa massa molar como água, amônia, ácido clorídrico);

- Quanto à cadeia: Podem ser classificados em polímeros de cadeia carbônica (também são conhecidos por polímeros de cadeia homogênea, como exemplos pode-se citar as poliolefinas, polímeros estirênicos, polímeros fluorados e polivinil ésteres) ou polímeros de cadeia heterogênea (pode-se citar os poliésteres, poliamidas, aminoplásticos e poliéteres);
- Quanto à estrutura: Podem ser classificados em lineares (as macromoléculas são encadeamentos lineares normais ou ramificados de átomos, formando fios que se mantêm isolados uns dos outros) ou tridimensionais (estes possuem macromoléculas que formam ligações em todas as direções do espaço, formando um trançado tridimensional e bastante rígido);
- Quanto ao comportamento mecânico: Podem ser classificados em elastômeros (esses polímeros têm a capacidade de sofrer deformações de pelo menos duas vezes o seu comprimento original à temperatura ambiente, recuperando seu comprimento inicial assim que o esforço é removido), plásticos (trata-se de um material macromolecular que, embora solidifique em seu estado final, pode passar por uma fase de fluidez e moldagem durante o processo, seja por influência de calor, pressão ou uma combinação de ambos) ou fibras (esses polímeros termoplásticos possuem cadeias moleculares e cristais alinhados de forma direcional. Esse alinhamento é deliberadamente induzido durante o processo de fiação, resultando em uma melhoria significativa na resistência mecânica desses materiais, o que viabiliza sua aplicação na forma de fios).

De acordo com Gama (2013), desde 1843, polímeros sintéticos e naturais têm sido empregados em ligantes asfálticos. Na Europa e América do Norte, nos anos 1950, já estavam em andamento iniciativas que incluíam látex de borracha. O uso prático de ligantes asfálticos alterados começou em 1901 com o estabelecimento da “*Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute*” na França.

A incorporação de agentes modificadores no asfalto pode ocorrer por meio de dois métodos principais: i) via seca; e ii) via úmida. No método via seca, o material modificador é incorporado como agregado na mistura asfáltica drenante, sendo misturado diretamente com os outros componentes sólidos antes da adição do ligante asfáltico. Já no método via úmida, os agentes modificadores são incorporados diretamente no ligante asfáltico antes da mistura com os agregados, garantindo uma dispersão mais uniforme dos aditivos e melhorando as propriedades do asfalto modificado, conforme apresentado no esquema da Figura 3 (Pereira, 2020).

Figura 3 – Representações da Incorporação por Via Seca e por Via Úmida – (1) Incorporação por Via Seca; (2) Incorporação por Via Úmida



Fonte: Adaptado de Hassan *et al.*, 2014.

Nesse contexto, a utilização de polímeros objetiva modificar os ligantes asfálticos, adequando-os às necessidades específicas do projeto, seja tornando-os mais flexíveis ou aprimorando sua capacidade de lidar com mudanças de temperatura, conforme afirma Bernucci *et al.* (2008):

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. No entanto, para condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário o uso de modificadores das propriedades dos asfaltos. Entre esses, citam-se asfaltos naturais, gilsonita ou asfaltita, mas especialmente polímeros de vários tipos que melhoram o desempenho do ligante (Bernucci *et al.*, 2008, p. 59).

As altas temperaturas exercem uma influência marcante no revestimento betuminoso, especialmente no comportamento reológico do CAP. Isso se deve principalmente à redução de sua viscosidade, o que torna as misturas asfálticas mais propensas à deformação permanente. Embora diversos fatores possam afetar a deformação permanente das vias, é possível mitigar

tais ocorrências ao aumentar a rigidez do ligante asfáltico. Isso pode ser alcançado por meio da introdução de modificadores que alteram suas propriedades, como os polímeros, permitindo uma maior resistência estrutural e durabilidade aos pavimentos (Lima, 2008).

Segundo Kalantar, Karim & Mahrez (2012), os polímeros desempenham um papel crucial na otimização do desempenho dos pavimentos asfálticos, proporcionando benefícios em uma ampla faixa de temperaturas. Eles contribuem para reforçar a resistência da mistura contra deformações permanentes, fadiga e fissuras causadas por variações térmicas. Ao reduzirem o fluxo viscoso e o módulo de cisalhamento em condições de calor, os polímeros também estendem significativamente a vida útil dos pavimentos.

Entretanto, cabe destacar que a incorporação de polímeros ao CAP requer cuidado, pois nem todos os polímeros são compatíveis com ele, e nem todo CAP modificado mantém sua estabilidade durante o armazenamento. É essencial garantir a compatibilidade entre o polímero e o CAP durante os processos de modificação, pois a heterogeneidade pode comprometer seu desempenho. Entre os polímeros frequentemente recomendados para a modificação do CAP, destacam-se os copolímeros em bloco de estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS) e acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) (Gama, 2013).

Dessa forma, o uso de polímeros na modificação do ligante asfáltico se apresenta como uma importante estratégia na indústria da pavimentação asfáltica, melhorando significativamente a resistência e durabilidade das rodovias frente às condições climáticas extremas e ao intenso tráfego de veículos. Além dos polímeros, outra estratégia promissora que vem sendo pesquisada é a possibilidade de reutilização de resíduos industriais. Este método não só oferece uma solução sustentável para o descarte desses resíduos, mas também contribui para o aprimoramento das propriedades das misturas asfálticas.

2.4 A REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UMA POSSIBILIDADE AMBIENTALMENTE CORRETA

À medida que o mundo procura soluções para mitigar os impactos ambientais e promover práticas mais sustentáveis, vários setores têm direcionado sua atenção para a reutilização de resíduos. Uma abordagem significativa que está ganhando destaque na indústria da Construção Civil, especialmente na área de pavimentação, é a reutilização de resíduos. Esse cenário não só responde às crescentes preocupações ambientais, mas também oferece uma oportunidade única para redefinir os padrões da infraestrutura rodoviária (Barros, 2015).

No contexto brasileiro, a regulação da gestão de resíduos sólidos é estabelecida pela Lei nº 12.305 (Brasil, 2010). Essa legislação, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), é uma peça fundamental que define diretrizes e princípios para a gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos em todo o país. Representando um marco regulatório para a gestão ambientalmente correta do manuseio de resíduos sólidos, a legislação delinea de maneira precisa as diretrizes para o manejo de resíduos, incentivando práticas que visam à redução na geração, à reutilização, à reciclagem e à correta destinação final desses materiais. Ademais, a PNRS atribui responsabilidades aos diversos intervenientes ao longo da cadeia produtiva, desde os geradores até os encarregados pela coleta, tratamento e disposição adequada dos resíduos. Com foco na ideia de responsabilidade compartilhada, essa legislação estimula a cooperação entre os setores público, privado e a sociedade civil, almejando alcançar uma gestão dos resíduos sólidos que seja sustentável, contribuindo assim para a preservação do meio ambiente e a promoção da saúde pública (Brasil, 2010).

A PNRS faz a distinção entre resíduo (lixo que pode ser reaproveitado ou reciclado) e rejeito (o que não é passível de reaproveitamento), se referindo a todo tipo de material proveniente das indústrias: doméstica, industrial, da construção civil, eletroeletrônica, entre outros; com o objetivo de redução, reutilização e não-geração de resíduos sólidos, bem como a destinação final adequada dos rejeitos (Brasil, 2010).

Entretanto, embora as atividades industriais apresentem essencial importância frente a fatores socioeconômicos, diversos problemas ecológicos podem suceder as atividades industriais. Nessa perspectiva, a indústria é uma das principais fontes de resíduos e rejeitos, incluindo sobras de carvão mineral, rejeitos da indústria metalúrgica, resíduos químicos, bem como gases e fumaça emitidos pelas chaminés das fábricas. Esses rejeitos industriais contribuem significativamente para graves agressões ambientais, uma vez que contêm produtos químicos perigosos, como cianureto, pesticidas e solventes, além de metais como mercúrio, cádmio e chumbo, bem como solventes químicos, que ameaçam os ciclos naturais nos quais são descartados (Bacarini, 2019; Ribeiro, 2019).

No âmbito da gestão de resíduos, é importante reconhecer que as indústrias não apenas têm responsabilidade sobre a geração de resíduos, mas também sobre seus produtos ao longo de todo o ciclo de vida, abrangendo desde a produção até o descarte final, o qual deve ser conduzido de maneira ambientalmente correta (Altoé; Sales; Martins, 2019).

No contexto industrial, a eliminação dos resíduos é realizada por meio de diversos processos. Alguns produtos, especialmente os sólidos, são armazenados em depósitos para evitar o contato direto e a contaminação do ambiente. No entanto, determinados resíduos

perigosos são despejados no meio ambiente, mesmo sendo prejudiciais. Infelizmente, não se sabe como lidar com eles de forma segura, e espera-se que o ambiente absorva essas substâncias tóxicas. Contudo, essa abordagem não é uma solução segura para o problema. Muitos metais e produtos químicos presentes nesses resíduos não são naturais nem biodegradáveis, contribuindo com a ameaça dos ciclos naturais, a poluição ambiental e a contaminação dos solos (Anjos, 2019).

Esses resíduos, quando mal gerenciados, podem ser dispostos irregularmente em lixões, que como declarado por Castilhos Júnior (2003), representa a maneira mais primitiva de destinação de resíduos sólidos, sem contar outras maneiras irregulares de descarte como terrenos baldios e fundos de vale, sendo estas práticas irregulares um dos principais fatores da poluição do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas devido a degradação da matéria orgânica e a liberação de chorume, causando também poluição visual e a possibilidade da haver transmissão de doenças a população por animais, insetos, bactérias e fungos (Carvalho, 2022).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE) (2012), a destinação dos resíduos industriais é distribuída da seguinte forma: 75% são encaminhados para aterro sanitário, 18% passam por coprocessamento, 3% são submetidos à incineração e 3% recebem tratamento biológico. Dentre esses resíduos, 25% são classificados como perigosos, e 21% do total de resíduos gerados criam passivos ambientais, englobando resíduos armazenados há mais de um ano e resíduos provenientes de áreas contaminadas.

Com o objetivo de promover uma abordagem sustentável para o gerenciamento de resíduos, a economia circular tem sido implementada para reduzir, reutilizar, recuperar e reciclar materiais e energia. Essa abordagem busca impulsionar o desenvolvimento de produtos inovadores, viáveis e ecologicamente eficientes. Dentro dessa perspectiva, o sistema de logística é visto como uma ferramenta sustentável de gestão, operação e reintegração de bens e materiais às suas origens após a venda e o consumo. Isso é realizado através da reutilização controlada do bem e de seus componentes, ou por meio da reciclagem dos materiais utilizados, gerando matérias-primas secundárias que são reintegradas ao processo produtivo, adicionando valor ao ciclo de uso dos materiais (Bacarini, 2019).

De acordo com Souza, Soriano & Patino (2018), o crescimento contínuo e generalizado do uso de pavimentação, juntamente com a necessidade urgente de reduzir o consumo de recursos naturais e diminuir os custos de produção, tem estimulado a condução de estudos e pesquisas focados na incorporação de diversos tipos de resíduos na formulação de concretos alternativos destinados à produção de blocos utilizados em pavimentação. Dentre os resíduos

comumente incorporados na pavimentação, destacam-se resíduos de construção e demolição, pneus reciclados, resíduos industriais e até mesmo plásticos reciclados. Esses materiais não apenas proporcionam uma alternativa economicamente viável, mas também contribuem para a diminuição do volume de resíduos depositados em aterros sanitários (Balbo, 2007; Nunes, 2018).

Diante do exposto, alguns estudos ganham notoriedade sobre o tema e se destacam pela riqueza em detalhes e possibilidade de auxiliar outros estudos acerca do tema. A Tabela 6 apresenta os principais resultados obtidos pela reutilização de resíduos na indústria da pavimentação drenante.

Tabela 6 – Utilização de Materiais Alternativos na Indústria da Pavimentação

Autores (ano)	Considerações
Chai <i>et al.</i> (2020)	Os autores observaram que a escória de aço estudada possui resistência à abrasão, e, quando submetidas temperaturas inferiores à 400°C, pode ser usada como agregado na mistura. Para além, a junção da borracha em pó com o basalto melhorou o desempenho da mistura em comparação com a atuação isolada dos materiais.
Hu <i>et al.</i> (2020)	Os autores observaram que a presença de água reduz a propriedade de adesão do asfalto modificado de alta viscosidade (HVMA), e a adição de polímeros gera um aumento na resistência de adesão, consequentemente a diminuição na capacidade de auto cicatrização do HVMA. Esta capacidade de auto cicatrização melhora com o aumento da temperatura, todavia apresenta uma tendência decrescente se o tempo de cicatrização é longo em imersão em água com alta temperatura.
Quan, Xu e Sun (2022)	Os autores observaram que a adição de borracha fragmentada contribui para melhorar o desempenho de amortecimento e a resistência do CPA, mas tem um impacto adverso em sua capacidade de carregamento. Além disso, o teor ideal recomendado de borracha fragmentada no CPA é de 4%, e o tamanho ideal de partícula do agregado de borracha é de 2,36 a 4,75 mm.
Zhang <i>et al.</i> (2022)	Os autores observaram que sob a influência de diversos fatores ambientais, o asfalto modificado de alta viscosidade (HVMA) não apresenta reação química, mas sofre alterações físicas. O aumento da temperatura apenas levou ao avanço do envelhecimento, e nenhuma reação química ocorreu para produzir novas substâncias.
Clara <i>et al.</i> (2023)	Os autores observaram que a matriz de asfalto altamente modificado (HiMA) constou um comportamento reológico e mecânico superior a logo prazo quando comparado com as matrizes de 60/85, possuindo cadeia polimérica mais elaborada, maior resistência ao afundamento e menor suscetibilidade térmica e cinética.
Gao <i>et al.</i> (2023)	Os autores concluíram que o asfalto modificado com alta viscosidade feito com 4% de SBS e 8% de TPS apresenta melhor desempenho, podendo gerar melhorias na resistência a danos à umidade nas misturas asfálticas drenante.
Hammes e Thives (2023)	Os autores observaram que a mistura asfáltica drenante produzida com asfalto altamente modificado (HiMA) obteve excelente desempenho à fadiga, o que permite a aplicação em diversas condições de tráfego. Alta capacidade de infiltração também foi identificada, e poluentes existentes que contribui diretamente para minimizar a contaminação ambiental.

Autores (ano)	Considerações
Huang <i>et al.</i> (2023)	Os autores observaram que o asfalto modificado por borracha apresenta melhores propriedades viscoelásticas em baixas temperaturas do que o asfalto modificado por Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) e alta viscosidade. A presença de água reduz a propriedade de adesão do asfalto modificado por alta viscosidade. A análise relacional em escala de cinza indica que os índices relacionados à temperatura de classificação contínua a baixa temperatura (TC) são preferíveis na avaliação do desempenho em baixas temperaturas do asfalto modificado por polímero (AMP). Além disso, a variação do TC foi considerado menos útil na avaliação das propriedades viscoelásticas do AMP, mas pode determinar se o desempenho em baixas temperaturas do AMP é dominado pela rigidez do material à fluência (S) ou a própria taxa de fluência do material (m).
Jing <i>et al.</i> (2023)	Os autores observaram que períodos mais longos de pré-condicionamento prejudicam a produção das misturas alvo, enquanto o aumento do Epóxi-Asfalto (EPA) resulta em melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na resistência à desagregação. A presença de cal hidratada nos fillers minerais também mostra ter um efeito positivo na trabalhabilidade das misturas soltas e na tenacidade das misturas à base de EA.
Xu <i>et al.</i> (2023)	Os autores observaram que o uso do agente rejuvenescedor à base de óleo mineral do asfalto modificado de alta viscosidade envelhecido melhorou efetivamente o desempenho do ligante asfáltico e, com o aumento do teor do agente rejuvenescedor, o fator de desgaste do ligante asfáltico com agregados tende a diminuir.
Zhu <i>et al.</i> (2023)	Os autores observaram que durante o processo de envelhecimento, o efeito de endurecimento induzido pela oxidação do asfalto puro e o efeito de amolecimento induzido pela degradação do modificador alteram significativamente as propriedades reológicas do asfalto de alta viscosidade. Além disso, em altas temperaturas, o asfalto de alta viscosidade demonstra melhor desempenho antienvelhecimento do que o asfalto convencional modificado com Estireno-Butadieno-Estireno (SBS).
Jiang <i>et al.</i> (2024)	Os autores observaram que ao introduzir poliuretano substancialmente houve uma melhora no desempenho térmico e na estabilidade criogênica do ligante asfáltico, os experimentos de tração e viscosidade apontaram que a reação de cura do asfalto modificado por poliuretano é prolongada e irreversível. O asfalto incorporado com poliuretano apresenta vantagens sobre a mistura asfáltica modificada de alta viscosidade como estabilidade superior em altas temperaturas, excelente resistência à fissuração em baixas temperaturas e sensibilidade reduzida a deformações. Entretanto, a resistência à fadiga e à carga dinâmica são ligeiramente inferiores.
Xu <i>et al.</i> (2024)	Os autores observaram que o rejuvenescimento (RJ), o reforço da coesão (CEM), reação de polimerização e o asfalto emulsionado (AE) apresentam diferentes mecanismos e efeitos de aprimoramento. O rejuvenescimento melhora as propriedades de fadiga, a resistência à deformação e a resistência a trincas em baixa temperatura do asfalto envelhecido com a adição de componentes elastoméricos; enquanto a estratégia de reação de polimerização e o asfalto emulsionado melhora o comportamento viscoelástico do asfalto envelhecido.
Yaofei <i>et al.</i> (2024)	A durabilidade da resistência à derrapagem da mistura de asfalto com base na profundidade da textura é melhorada em condições úmidas. No entanto, a durabilidade da resistência à derrapagem da mistura asfáltica para o número do pêndulo britânico piora devido à intrusão de água e diminui rapidamente em condições de sobrecarga. A influência da sobrecarga e do asfalto modificado com Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) na durabilidade da resistência à derrapagem da mistura asfáltica é maior do que a da umidade ambiente e do asfalto modificado de alta viscosidade (HVMA).

Autores (ano)	Considerações
Zhang <i>et al.</i> (2024)	Os autores observaram que a resistência à deformação em alta temperatura e a resistência à fissuração em baixa temperatura do asfalto modificado preparado por processo seco (DP) e processo úmido/seco (MP) são mais fracas do que a do processo úmido (WP). Além disso, em comparação com o processo WP, a estabilidade dinâmica da mistura asfáltica preparada pelos processos DP e MP diminuiu 17,3 – 18,2%.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Nessa abordagem, a utilização de resíduos na pavimentação transforma fundamentalmente o papel desempenhado pela indústria da construção civil no âmbito da construção de um futuro mais sustentável. Ao adotar essa prática, não apenas é possível enfrentar os desafios atuais relacionados à gestão ambiental, como também promover uma mudança significativa no modo como a engenharia concebe e executa projetos de infraestrutura, incorporando princípios fundamentais de sustentabilidade em cada etapa do processo construtivo. Dessa forma, além de responder às demandas urgentes de minimizar o impacto ambiental, essa abordagem também estabelece um novo padrão para a indústria da pavimentação, impulsionando a transição para práticas ecológicas e responsáveis (Costa Filho, 2017).

2.4.1 A Geração de Resíduos na Indústria Calçadista

A indústria de calçados é um setor industrial de grande relevância, como indicado nos dados fornecidos pela Abicalçados (2017), com uma produção significativa de 935 milhões de pares apenas no Brasil. Entre os principais resíduos sólidos gerados por essa indústria, destacam-se os tecidos e borrachas, que são encaminhados para centrais de armazenamento permanente devido à dificuldade de reintroduzi-los nos processos produtivos.

Este setor produtivo utiliza diversos materiais, com o objetivo de oferecer aos consumidores produtos que estejam adequados às suas demandas, porém para tanto, muitas vezes são contemplados o design e o baixo custo dos materiais e processos. Desta forma, há geração de uma variedade de resíduos com características que dificultam a reciclagem dos produtos deste setor. Esses resíduos fazem com que o setor industrial responda por uma grande parcela de poluição do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas. E isso pode ser creditado à falta de atuação dos órgãos de controle ambiental, políticas públicas e falta de consciência por parte dos empresários (Alencar *et al.*, 2010).

Na indústria de calçados, uma variedade de materiais é utilizada no processo de fabricação, incluindo Poliuretano (PU), Elastômero Poliolefinico (POE), Poliuretano Termoplástico (TPU), borracha, Policloreto de Vinila (PVC) e Etileno Acetato de Vinila (EVA). Esses materiais desempenham um papel fundamental ao proporcionar o amortecimento e o conforto necessários para o uso dos calçados produzidos (Gama, 2013).

Os materiais oriundos das indústrias calçadistas também são fortes fontes de poluição ambiental e desperdício de matéria-prima. A borracha residual produzida pela indústria calçadista é um material durável, resistente, flexível e pode manter seu volume sob carga, tornando-a um material adequado a ser reutilizado (Dorneles, 2018). Sob essa perspectiva, esses materiais apresentam resistência relativamente alta a agentes biológicos e às intempéries, os quais causam sérios problemas à comunidade em geral quando descartados incorretamente (Ribeiro, 2019).

De acordo com estudos realizados por Arao (2016), Lima, Teixeira e Aires (2022), Soares (2022) e Vieira *et al.* (2022), é conhecido que alguns resíduos provenientes do processo de produção de calçados apresentam boas características de serem utilizados na construção civil como agregados ou na incorporação de materiais, como por exemplo na Pavimentação. Esses resíduos podem ser empregados em substituição aos agregados naturais, sendo incorporados em compósitos cimentícios leves ou até como modificação do ligante asfáltico.

2.4.1.1 O Resíduo do EVA na Pavimentação Asfáltica

O *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) é um copolímero formado pelo encadeamento de sequências aleatórias de unidades repetitivas da polimerização, via radicais livres, do etileno e acetato de vinila em reatores de alta pressão, é sua alta homogeneidade na concentração de acetato de vinila que assegura estabilidade no processamento, o que garante qualidade ao produto final (Macedo, 2020).

Na indústria calçadista, durante o processo de corte de chapas expandidas de EVA, cerca de 18% do material é gerado como resíduo, sem soluções adequadas para reutilização ou reciclagem. Esse cenário evidencia um desafio crescente, pois os resíduos do EVA, por não serem biodegradáveis e por possuírem características elastoméricas e termoplásticas, não podem ser facilmente reciclados ou reprocessados. Como resultado, o acúmulo desses resíduos em aterros sanitários torna-se uma preocupação ambiental significativa, exacerbada pela possibilidade de poluição visual, propagação de insetos e até mesmo risco de combustão (Santos *et al.*, 2021).

Nessa perspectiva, a utilização dos resíduos de EVA na pavimentação asfáltica representa uma estratégia eficaz para lidar com o excedente gerado pela indústria calçadista, conforme destacado por Gama (2013). Dada a quantidade significativa de aparas de EVA produzidas anualmente no Brasil, estimada em 7.932 toneladas, é imperativo buscar alternativas sustentáveis para o seu descarte. Ao incorporar esses resíduos na pavimentação asfáltica, não apenas se evita o acúmulo em aterros sanitários e lixões, mas também se aproveita um material com propriedades que podem melhorar as características do pavimento e tornar a reutilização uma prática ambientalmente correta.

Segundo Bacarini (2019), o EVA possui diversas características notáveis, como flexibilidade, tenacidade, elasticidade comparável à da borracha, resistência a quebras sob tensões, ótima transparência, facilidade de moldagem, baixo custo e propriedades termoplásticas. No entanto, apesar dessas vantagens, a má disposição dos resíduos de EVA gerados pela indústria calçadista tem levado a preocupações ambientais crescentes. Diante desse cenário, nos últimos anos, têm-se buscado alternativas para uma destinação final mais adequada desses resíduos. Na área de pavimentação, especificamente, os estudos têm se concentrado em incorporar esses resíduos em misturas asfálticas tradicionais, conforme descrito por Ribeiro *et al.* (2020).

Diante do exposto, alguns estudos sobre o uso de EVA na indústria da pavimentação se destacam pela riqueza de detalhes e pela capacidade de auxiliar pesquisas futuras sobre o tema. Esses estudos foram identificados a partir da revisão bibliométrica realizada neste trabalho. A Tabela 7 mostra os principais resultados obtidos com a reutilização do EVA na indústria da pavimentação.

Tabela 7 – Utilização do EVA na Indústria da Pavimentação

Autores (ano)	Considerações
Ahmed <i>et al.</i> (2019)	As misturas não modificadas apresentaram um envelhecimento considerável e as misturas modificadas com SBS foram menos afetadas pelo envelhecimento, se comparadas com o ligante asfáltico modificado pelo EVA. Além disso, a mistura de base modificada com SBS produziu uma resistência à fadiga significativamente melhor do que a mistura de base convencional.
Pouranian; Imaninasab; Shishehbor (2020)	Os autores observaram que as amostras com o EVA apresentaram uma menor deformação recuperável em comparação com as amostras com SBS. Quanto à deformação permanente, pôde-se observar que todas as amostras com o EVA e o SBS apresentaram boas resistências com a variação de temperatura.
Davoodi <i>et al.</i> (2022)	Os autores observaram que a resistência à flexão a baixa temperatura e a deformação melhoraram até 38 e 43%, respectivamente, para a mistura asfáltica modificada com a argamassa do resíduo de borracha (MSFP) em comparação com o concreto asfáltico convencional sem modificação (CSFP). Para além disso, a vida à fadiga e a resistência ao desgaste do MSFP foram muito superiores às do CSFP.

Autores (ano)	Considerações
Yan <i>et al.</i> (2022)	Os autores observaram que as misturas asfálticas modificadas compostas por EVA apresentaram melhorias consideráveis em várias propriedades, incluindo estabilidade Marshall, resistência à deformação, estabilidade à água, desempenho de fadiga e resistência à deformação em baixas temperaturas, quando comparadas com o asfalto base e com misturas modificadas com SBS.
Hong <i>et al.</i> (2023)	Os autores observaram que os resíduos de borracha de pneus (WTR) e EVA podem melhorar significativamente a resistência à deformação permanente, a capacidade de antienvelhecimento da mistura asfáltica e a capacidade de resistência a trincas e a estabilidade. Por fim, a aplicação de asfalto modificado por ambos os materiais podem reduzir significativamente os custos de construção e produzir uma alternativa de descarte ambientalmente correta.

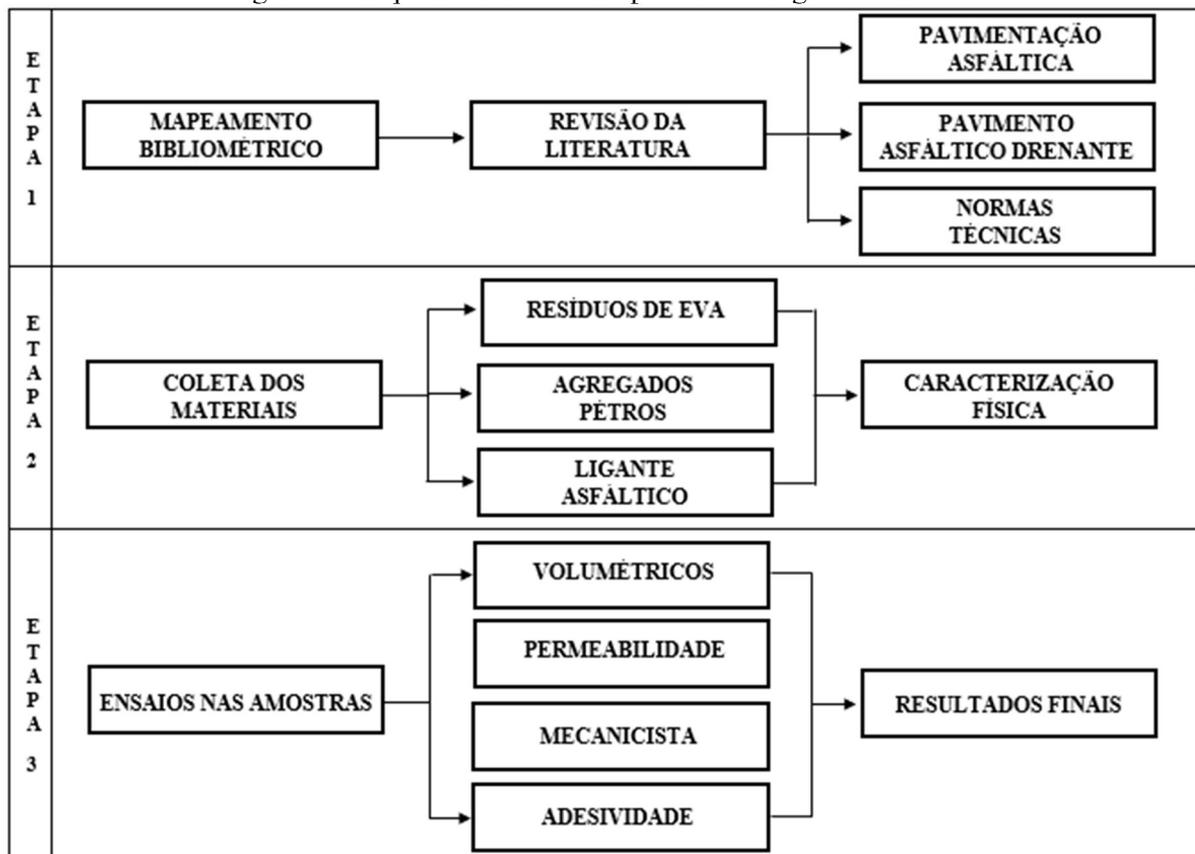
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Embora os estudos sobre resíduos incorporados na pavimentação asfáltica sejam relativamente recentes, eles representam uma abordagem crucial que pode potencialmente revolucionar a indústria da pavimentação asfáltica tradicional. Essa abordagem inovadora não apenas oferece uma solução ambientalmente sustentável para a gestão de resíduos, mas também promove a eficiência no gerenciamento de águas pluviais, contribuindo para a redução do escoamento superficial e minimizando problemas de inundação urbana. Além disso, ao incorporar rejeitos industriais que seriam descartados, demonstra-se um compromisso renovado com a economia circular, no sentido de promoção da reutilização, reciclagem e revalorização desses resíduos, transformando-os em insumos para novos produtos e promovendo práticas mais responsáveis dentro da indústria de pavimentação asfáltica.

3 METODOLOGIA

Para a realização do presente estudo foi executado um esquema metodológico que objetivava avaliar a influência da incorporação de resíduos do EVA provenientes da indústria calçadista em propriedades de misturas asfálticas drenantes do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA). Para tanto, os procedimentos metodológicos do estudo foram divididos em três etapas conforme apresentado na Figura 4.

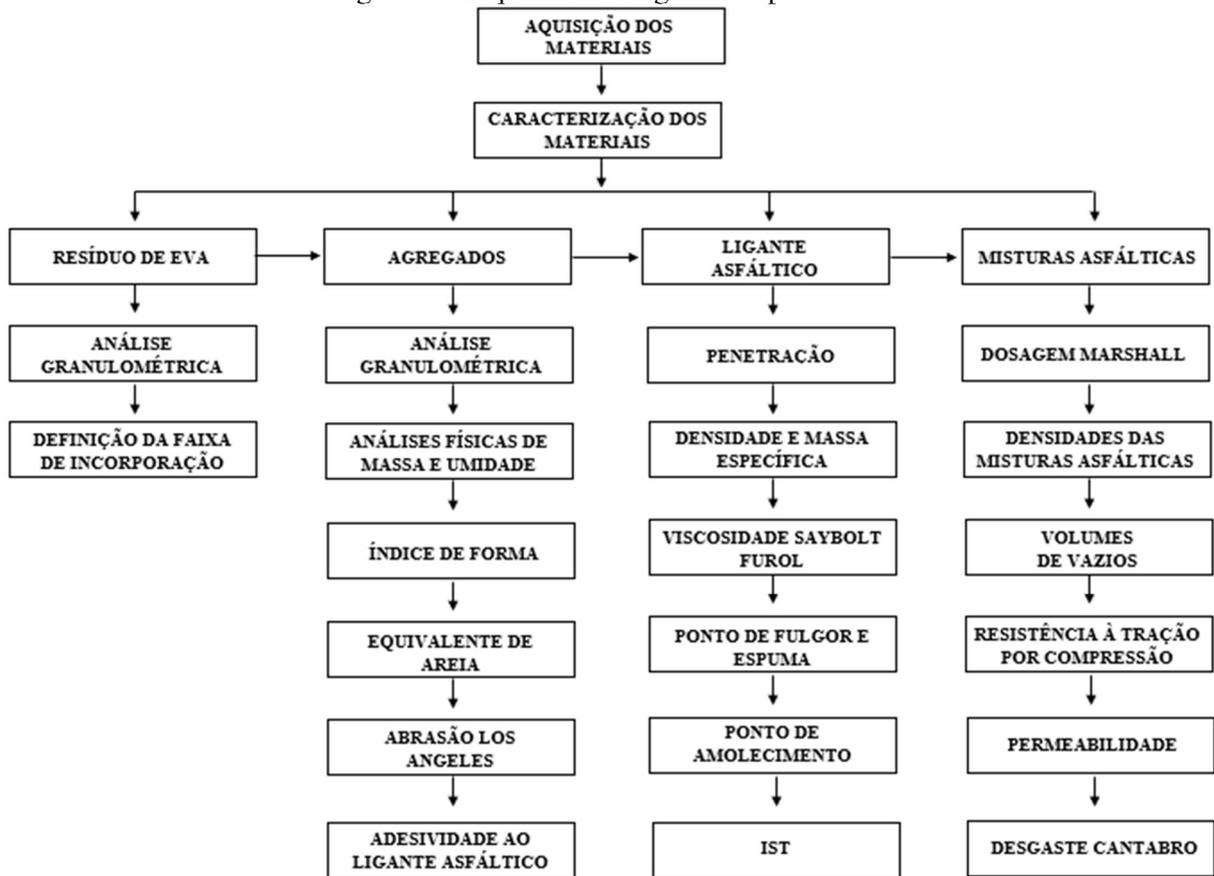
Figura 4 – Esquema Geral das Etapas Metodológicas do Estudo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Nesse contexto, os procedimentos metodológicos adotados pelo estudo compreenderam: i) Mapeamento bibliométrico; ii) Coleta dos materiais; e iii) Ensaios nas amostras. Vale destacar que a primeira etapa do esquema metodológico compreende o estudo bibliográfico da pesquisa e as outras duas etapas compreendem o programa experimental da pesquisa. Para tanto, o programa experimental executado pelo esquema metodológico compreendeu quatro etapas, a saber: i) caracterização dos resíduos de EVA; ii) caracterização dos agregados; iii) caracterização do ligante asfáltico; e iv) caracterização das misturas asfálticas. A Figura 5 apresenta o esquema do programa experimental do estudo.

Figura 5 – Esquema do Programa Experimental



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Nos itens abaixo são descritos os procedimentos metodológicos adotados na execução das etapas de mapeamento bibliométrico, coleta dos materiais e ensaios nas amostras.

3.1 ETAPA 1: MAPEAMENTO BIBLIOMÉTRICO

A primeira etapa compreendeu a pesquisa bibliográfica e revisão da literatura. Esta etapa abrangeu a consulta em livros, artigos científicos, monografias, dissertações e teses acerca da temática da pavimentação asfáltica, estudos de incorporação e adição de resíduos em misturas asfálticas tradicionais e misturas asfálticas drenantes, bem como normas técnicas vigentes para execução dos processos técnicos da área de Pavimentação.

Para tanto, foi realizado um mapeamento bibliométrico, visando definir as temáticas dos estudos, autores a serem utilizados e estratégias metodológicas adotadas pelas pesquisas na área. Esta etapa incluiu a pesquisa na base de dados Scopus, abrangendo um período de 24 anos, de 2000 a 2024. A busca avançada na Scopus envolveu o uso de descritores e operadores booleanos para refinar os resultados. Foi utilizada a seguinte estratégia de busca: “*modified*

asphalt” and “modified asphalt concrete” or “cement replacement” or recycle or sustainab or “open graded asphalt”.

Inicialmente, foram encontrados 479 documentos. Após levantamentos, aplicaram-se filtros na busca avançada da base de dados Scopus, como apenas artigos publicados no idioma em inglês e materiais publicizados na área de engenharia civil e engenharia de materiais. Com isso, obteve-se uma amostra de 272 documentos.

Os dados foram tratados, por meio do software *VOSviewer*. A análise dos dados foi realizada através de técnicas relacionais e avaliativas, por meio do uso de indicadores qualitativos e de medidas de produtividade dos estudos.

Ao término desta etapa, montou-se o catálogo do acervo de materiais bibliográficos com objetivo de auxiliar as análises e discussões do estudo.

3.2 ETAPA 2: COLETA DOS MATERIAIS

Nessa etapa, serão descritos os materiais utilizados no estudo e a caracterização física realizada nos materiais da pesquisa.

3.2.1 Materiais Utilizados na Pesquisa

Os materiais utilizados nesse estudo foram: resíduo do EVA (REVA), agregado graúdo, agregado miúdo, ligante asfáltico e material de enchimento.

A coleta do REVA foi disponibilizada por uma indústria calçadista do município de Santa Rita, na Paraíba (PB). O resíduo produzido pela indústria calçadista é composto por uma parte grossa e outra parte fina. Para o estudo tratou-se granulometricamente os resíduos, por meio do ensaio de peneiramento (DNIT-ME 412/2019), sendo utilizada a fração mais fina do resíduo. Os agregados utilizados foram o pó de pedra e a brita 0 ambos obtidos por meio do comércio de Patos, Paraíba. Na Figura 6 estão apresentados os materiais utilizados na pesquisa.

Figura 6 – Materiais Utilizados na Pesquisa – (1) REVA; (2) Brita 0; (3) Pó de Pedra



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Já como material de enchimento, utilizou-se o Cimento Portland composto com filler (CP II-F), especificado pela ABNT NBR 16697 (2018). Optou-se pela utilização desse material de enchimento haja vista que ele aumenta trabalhabilidade e promove uma secagem rápida de misturas asfálticas com poucos finos (Oliveira, 2021).

O ligante asfáltico utilizado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) convencional, o CAP 50/70, disponibilizado pela CBAA Asfaltos LTDA, em parceria com a usina da construtora Niemaia, em Patos, Paraíba.

3.2.1.1 Caracterização Física dos Materiais Granulares

A caracterização física dos materiais granulares utilizados na pesquisa foram baseadas procedimentos técnicos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Ensaios Realizados na Caracterização Física dos Materiais do Estudo

Análise	Procedimentos	Norma
Física	Análise granulométrica – Resíduo de EVA e agregados	DNIT-ME 412/2019
	Massa Específica – Agregados	DNER-ME 194/98; DNIT 413/2021 – ME; ABNT NBR 16605/2017
	Absorção – Agregado graúdo	DNIT 413/2021 - ME
	Índice de forma – Agregado graúdo	DNIT 425/2020 - ME
	Abrasão Los Angeles – Agregado graúdo	DNER-ME 035/1998
	Equivalente de Areia – Agregado miúdo	DNER-ME 054/97

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os itens abaixo descrevem os procedimentos técnicos para caracterização física dos agregados a partir das normativas da Tabela 8 adotados pelo estudo.

3.2.1.1.1 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizado segundo a norma DNIT-ME 412/2019.

Vale destacar que os resíduos de EVA foram levados à estufa em temperatura constante de 110°C por apenas duas horas para retirada da umidade, até constância de massa, conforme orientado pelos estudos de Lima (2008), Gama (2013), Rios, Barbosa Sobrinho & Moraes (2014) e Martinez (2017).

A Figura 7 abaixo apresenta os procedimentos adotados pelo estudo para determinação da distribuição granulométrica dos resíduos de EVA da pesquisa.

Figura 7 – Execução do Ensaio de Granulometria - (1) Quarteamento da Amostra; (2) Seleção do Conjunto de Peneiras; e (3) Peneiramento do Material



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Vale destacar que o mesmo procedimento foi repetido para os demais agregados da pesquisa (agregado miúdo, agregado graúdo e material de enchimento).

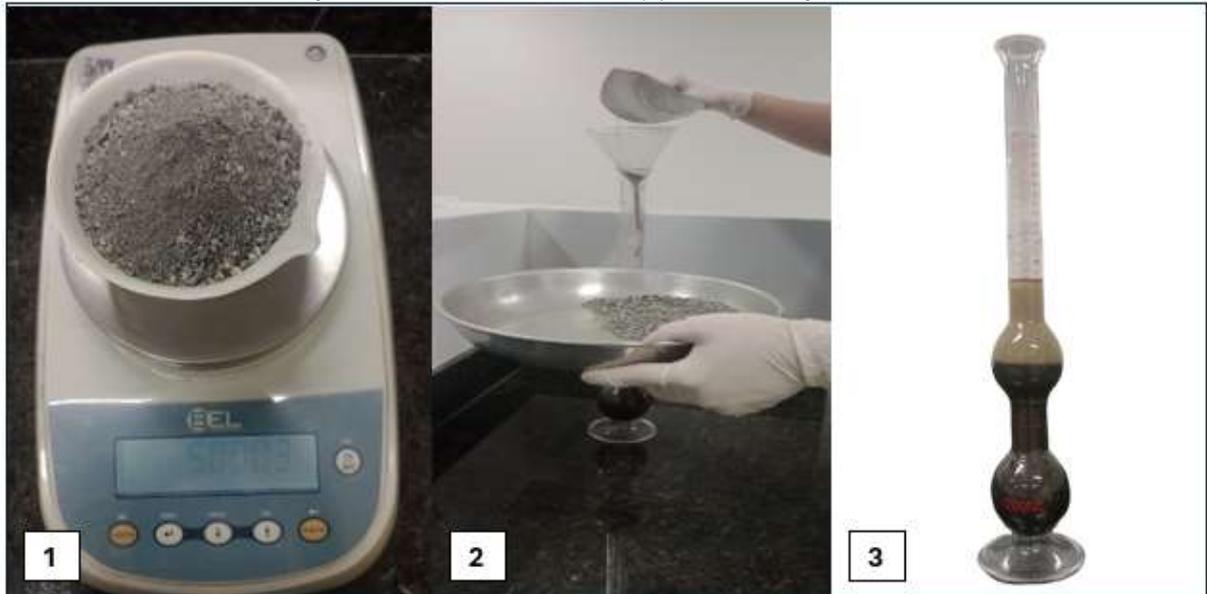
3.2.1.1.2 Massa Específica e Absorção

Os ensaios de massa específica foram realizados conforme DNER-ME 194/98, DNIT 413/2021 – ME e ABNT NBR 16605/2017. A determinação das massas específicas foram

realizadas no agregado miúdo (pó de pedra), no agregado graúdo (brita 0) e no material de enchimento (CP II-F).

A Figura 8 apresenta um dos procedimentos adotados para determinação da massa específica do agregado miúdo da pesquisa.

Figura 8 – Determinação da Massa Específica do Agregado Miúdo – (1) Seleção da Amostra; (2) Inserção da Amostra no Frasco; (3) Determinação da Massa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os demais procedimentos foram realizados também com os outros materiais da pesquisa conforme a normativa apresentada.

Já o ensaio de absorção, padronizado pela norma DNIT 413/2021 – ME, consiste em determinar aumento na massa de agregado devido à entrada de água nos poros das partículas durante um período de tempo preestabelecido, sem incluir a água aderida à superfície externa das partículas, expresso como uma porcentagem da massa seca. Os procedimentos normativos adotados pelo estudo estão apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Execução do Ensaio de Absorção - (1) Amostra Seca; (2) Amostra Submersa; (3) Amostra Úmida



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com os resultados das massas seca e úmida da amostra ensaiada, obteve-se o resultado do percentual de absorção dos agregados graúdos utilizados no estudo conforme descrito pela norma DNIT 413/2021 – ME.

3.2.1.1.3 Índice de Forma

O índice de forma representa a qualidade do agregado em relação a forma dos grãos. Para realização do ensaio, o presente estudo adotou os procedimentos da norma 425/2020 – ME do DNIT. Na Tabela 9 é apresentada a amostra representativa selecionada por meio dos procedimentos normativos.

Tabela 9 – Seleção da Amostra para o Ensaio

Peneiras	Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida em cada peneira	Verificação	Quantidade de amostra a ser usada (unid.)
3/4"	19	0	0	Amostra menor que 5%	0
1/2"	12,5	21,8	0,436	Amostra menor que 5%	0
3/8"	9,5	1044,33	20,8866	Amostra a ser usada	200
1/4"	6,3	1922,06	38,4412	Amostras passantes na peneira de 9,5 mm	0

Peneiras	Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida em cada peneira	Verificação	Quantidade de amostra a ser usada (unid.)
#4	4,75	1068,11	21,3622	Amostras passantes na peneira de 9,5 mm	0
#10	2	603,35	12,067	Amostras passantes na peneira de 9,5 mm	0
#40	0,425	198,64	3,9728	Amostras passantes na peneira de 9,5 mm	0
#80	0,18	105,34	2,1068	Amostras passantes na peneira de 9,5 mm	0
#200	0,075	16,52	0,3304	Amostras passantes na peneira de 9,5 mm	0
FUNDO	-	6,25	0,125	Amostras passantes na peneira de 9,5 mm	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após seleção da amostra foram determinadas os parâmetros de comprimento e espessura das amostras selecionadas conforme procedimentos da norma 425/2020 – ME do DNIT. A Figura 10 apresenta os procedimentos técnicos executados pelo estudo.

Figura 10 – Procedimentos de Determinação do Índice de Forma – (1) Quarteamento da Amostra; (2) Peneiramento Mecânico; (3) Seleção da Faixa; (4) Características dos Agregados Miúdos



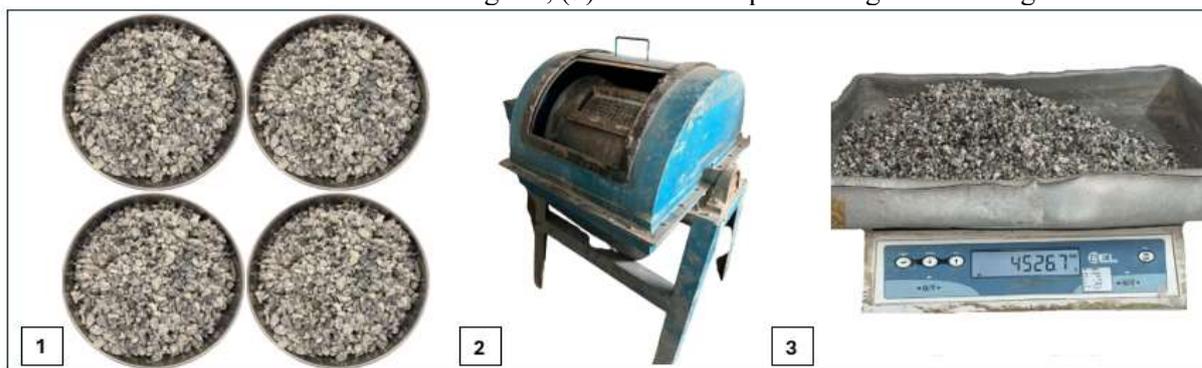
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com isso, foi determinado o índice de forma dos agregados graúdos utilizados neste estudo.

3.2.1.1.4 Abrasão Los Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles, seguindo a norma DNER-ME 035/1998, consiste em determinar o desgaste sofrido pelo agregado graúdo quando é submetido a uma carga abrasiva no tambor Los Angeles por um número específico de revoluções. Tendo em vista que o agregado utilizado por este estudo é a Brita 0, a faixa de classificação do ensaio foi a faixa de Graduação C, com uma massa total de 5,00kg (2,5kg do material retido na peneira de 6,3mm e 2,5kg do material retido na peneira de 4,8mm). A Figura 11 apresenta os procedimentos normativos adotados pelo estudo.

Figura 11 – Execução do Ensaio de Abrasão Los Angeles – (1) Seleção da Amostra; (2) Inserção das Amostras no Tambor Los Angeles; (3) Resultado Após o Desgaste Los Angeles



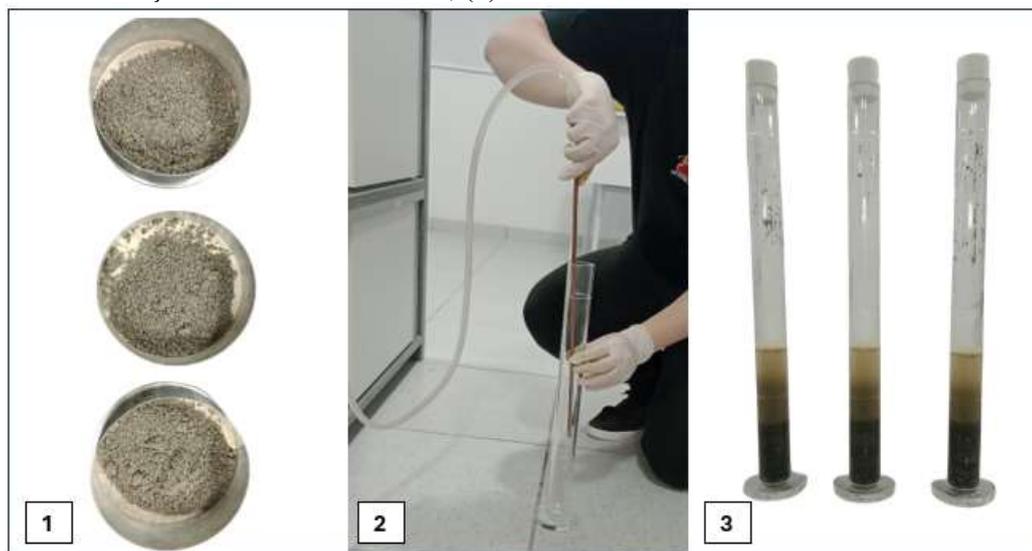
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com isso, foi determinado o percentual do desgaste provocado pelo conjunto do tambor Los Angeles e os agregados graúdos utilizados neste estudo.

3.2.1.1.5 Equivalente de Areia

O equivalente de areia, normatizado pelo DNER-ME 054/97, refere-se à proporção de entre a altura do topo da camada de areia e a altura do topo da camada de argila suspensa em uma quantidade específica de agregado fino. No caso de obras de infraestrutura viária a determinação desse parâmetro é importante tendo em vista que o ensaio permite avaliar a composição e proporção adequada de materiais finos no agregado miúdo a ser utilizado em campo, garantindo que a quantidade correta de areia esteja presente. Isso é essencial para a produção de um concreto asfáltico de alta qualidade, com propriedades mecânicas e de desempenho ideais. Em especial em concretos asfálticos drenantes, cujo a quantidade de finos argilosos tende a ser pequenas para não haver a diminuição da permeabilidade da mistura (Martins, 2012). Os procedimentos executados pelo estudo são apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Execução do Ensaio do Equivalente de Areia – (1) Amostras Úmidas; (2) Inserção da Solução do Ensaio na Proveta; (3) Amostras em Descanso de 20 Minutos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após o procedimento técnico da normativa do DNER, determinou-se o percentual do equivalente de areia presente no agregado miúdo utilizado pelo estudo.

3.2.1.2 Caracterização do Ligante Asfáltico

Inicialmente, foram definidas as porcentagens de incorporação do resíduo no ligante asfáltico. As porcentagens utilizadas para incorporação foram definidas conforme a literatura vigente. De acordo com Balbo (2007), a incorporação de resíduos acima de 4% torna a mistura de difícil trabalhabilidade, podendo aumentar a viscosidade do ligante asfáltico consideravelmente, tornando-as inadequadas para utilização (Bringel *et al.*, 2008; Gama, 2013). Nessa perspectiva, tendo em vista que a incorporação dos resíduos foi realizada por via úmida, a modificação do ligante asfáltico compreendeu uma faixa de incorporação de variação de 1% até 3%, com uma mistura convencional para fins comparativos.

A partir da análise granulométrica, definiu-se a faixa de utilização da granulometria a ser incorporada no estudo. A fração selecionada foi o passante da peneira #10 tendo em vista a concentração dos finos nessa faixa.

O REVA foi adicionado ao ligante asfáltico em diferentes proporções em peso numa temperatura de 150 °C durante aproximadamente 1 hora, conforme indicado pela empresa petroquímica Braskem (2010) e Rios, Barbosa Sobrinho & Morais (2014). A temperatura de mistura não deve ultrapassar os 185°C, a fim de preservar as propriedades do EVA e não oxidar o ligante asfáltico (Gama, 2013).

A Tabela 10 apresenta as proporções em pesos totais dos materiais constituintes, incluindo a amostra de referência (CAP 50/70).

Tabela 10 – Ligante Asfáltico Convencional e Modificado

Ligante Asfáltico	Mistura	Dosagem gravimétrica	
		% REVA	% CAP 50/70
CAP 50/70	REF	0	100
	CAP01	1	99
	CAP02	2	98
	CAP03	3	97

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O esquema da Figura 13 apresenta os procedimentos adotados para modificação do ligante asfáltico utilizado no estudo.

Figura 13 – Modificação do Ligante Asfáltico – (1) Peso em Massa do Ligante Asfáltico para Definição do Quantitativo de Incorporação; (2) Inserção do Resíduo no Ligante Asfáltico; (3) Modificação do Ligante Asfáltico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tendo executado a modificação do ligante asfáltico, realizou-se os ensaios de análise física, adesividade, consistência e segurança de manuseio e armazenamento para o ligante asfáltico convencional e modificado conforme normativas apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Normas dos Ensaios Realizados no Ligante Asfáltico

Análise	Procedimentos	Norma
Adesividade	Adesividade ao ligante asfáltico	DNER-ME 078/1994
Consistência	Penetração	DNIT 155/2010 - ME
Física	Densidade	DNER-ME 193/96
	Massa Específica	
Consistência	Viscosidade Saybolt Furol	ABNT NBR 14950/03
Segurança	Ponto de fulgor	DNER-ME 148/94; ABNT NBR 11341/14
	Espuma	DNIT 095/2006 - EM

Análise	Procedimentos	Norma
Consistência	Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010 - ME
	Índice de susceptibilidade térmica	DNIT 095/2006 - EM

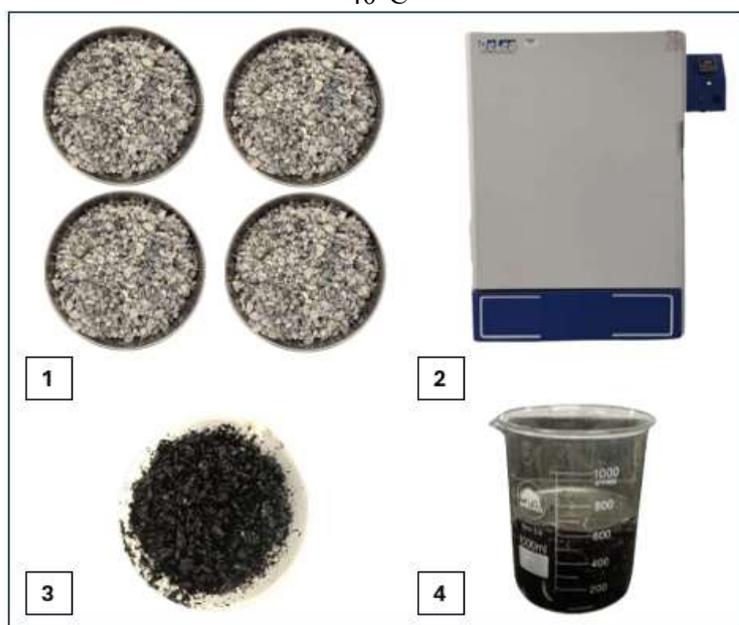
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os itens abaixo descrevem os procedimentos normativos executados para determinação das características físicas, de segurança e volumétricas do CAP convencional e modificado obtidas pelo estudo.

3.2.1.2.1 Adesividade ao Ligante Asfáltico

O ensaio de adesividade agregado-ligante, normatizado pela DNER-ME 078/94, verifica, qualitativamente, a adesividade do ligante ao agregado graúdo, inferindo assim, sobre a resistência à fratura adesiva de misturas asfálticas. Para este ensaio, foram utilizados o ligante convencional, o ligante modificado e o agregado graúdo da pesquisa. A Figura 14 apresenta os procedimentos adotados pelo estudo.

Figura 14 – Sequência do Ensaio de Adesividade - (1) Agregado Graúdo; (2) Agregado 2h na Estufa a 120°C; (3) Mistura CAP + Agregado Graúdo; (4) Mistura Após 72h em Água Destilada na Estufa à 40°C



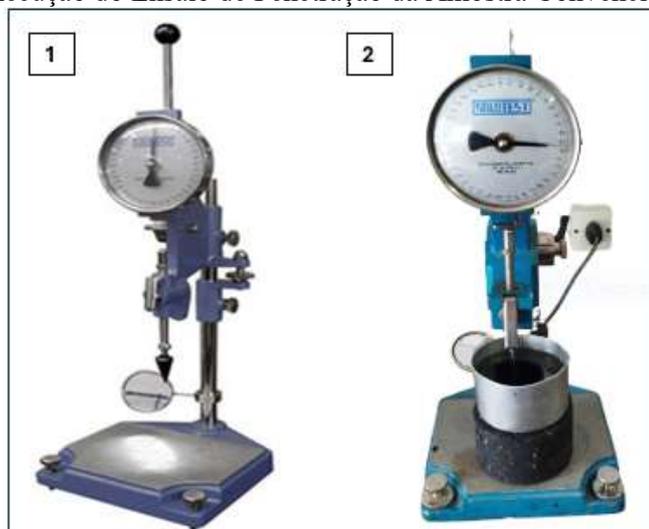
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após os procedimentos executados, pode-se analisar os resultados da modificação nas propriedades de adesividade das misturas convencionais e modificadas com o REVA.

3.2.1.2.2 Penetração

A avaliação da consistência de um cimento asfáltico em seu estado semi-sólido é conduzida através do ensaio de penetração, a partir da normativa do DNIT 155/2010-ME, onde a profundidade de penetração da agulha serve como indicador. Este método é crucial para classificar a dureza do CAP. Nele, mede-se a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha padronizada penetra verticalmente na amostra de CAP, mantida a uma temperatura de 25°C, durante 5 segundos. A agulha em questão possui massa total de 100g, conforme Figura 15.

Figura 15 – Ensaio de Penetração – (1) Penetrômetro Montado para Execução do Ensaio; (2) Execução do Ensaio de Penetração da Amostra Convencional



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O procedimento de penetração da agulha na amostra foi realizado 3 (três) vezes, a fim de obter maior precisão no ensaio. Ao término da execução, a penetração foi determinada como sendo a média dos resultados do ensaio.

3.2.1.2.3 Densidade e Massa Específica

Para determinação da densidade e massa específica do ligante asfáltico utilizou-se a norma do DNER-ME 193/96. Esta diretriz estabelece o método para determinar com precisão a densidade e a massa específica, sob temperatura controlada, de materiais líquidos e semi-sólidos, utilizando o picnômetro como instrumento de medição.

Inicialmente, uma amostra representativa do ligante é pesada e colocada dentro do picnômetro, um recipiente de volume conhecido, juntamente com uma quantidade medida de água destilada. O picnômetro é então fechado e agitado para garantir a completa mistura da amostra com a água. Posteriormente, o picnômetro é preenchido até sua capacidade total, eliminando quaisquer bolhas de ar presentes. Após essa etapa, o picnômetro é novamente pesado com a mistura de ligante e água. A Figura 16 apresenta os procedimentos técnicos executados conforme a normativa do DNER.

Figura 16 – Ensaio da Densidade e Massa Específica do Ligante Asfáltico – (1) Materiais Utilizados; (2) Aquecimento do Ligante Asfáltico; (3) Pesagem das Massas Solicitadas em Norma



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A densidade do ligante asfáltico é então calculada com base na diferença entre as massas inicial e final do picnômetro, juntamente com o conhecimento do volume do picnômetro, conforme apresentado pela Equação 1.

$$Ds = \frac{d - a}{(b - a) - (e - d)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Ds = Densidade;

d = Massa do picnômetro com tampa parcialmente preenchido com amostra;

a = Massa do picnômetro vazio com tampa;

b = Massa do picnômetro com tampa cheio d'água destilada;

e = Massa do picnômetro com tampa parcialmente preenchido com amostra mais água.

Por fim, a massa específica do ligante asfáltico é obtida dividindo-se a densidade do ligante pela densidade da água à temperatura de ensaio, conforme apresentado pela Equação 2.

$$\mu = Ds \times M_a \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

μ = Massa específica (g/cm^3);

d = Densidade;

M_a = Massa específica da água à temperatura do ensaio.

Vale destacar que embora os parâmetros de densidade e massa específica não precisem atender limites para aplicação na pavimentação, para este estudo a importância da determinação desses critérios está na determinação do volume de vazios da amostra drenante descrita na seção 3.3.

3.2.1.2.4 Viscosidade Saybolt Furol

De acordo com Gama (2013), a viscosidade é a propriedade que confere ao fluido a característica de resistência do mesmo ao escoamento. Nesse sentido, a avaliação da viscosidade desempenha um papel crucial na caracterização tanto dos ligantes asfálticos convencionais quanto dos modificados. Essas medidas fornecem *insights* fundamentais sobre as propriedades relacionadas ao processamento, mistura e aplicação dos ligantes asfálticos, tendo em vista que por meio da curva de viscosidade determinam-se as temperaturas de usinagem das misturas asfálticas.

Neste estudo, realizou-se o ensaio de viscosidade por meio do procedimento técnico da ABNT NBR 14950/03, a qual objetiva medir a consistência do ligante, através da medição do tempo em segundos de um viscosímetro em que 60ml de uma amostra padronizada escoam por um orifício padronizado. A Figura 17 apresenta os procedimentos executados pelo estudo.

Figura 17 – Ensaio da Viscosidade Saybolt Furol – (1) Preparação da Amostra; (2) Inserção do Material no Viscosímetro; (3) Finalização do Ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com os procedimentos técnicos executados, determinou-se a viscosidade do material para cada temperatura estabelecida.

3.2.1.2.5 Ponto de Fulgor e Espuma

Dois ensaios importantes para garantia da segurança de manuseio, emprego e até armazenamento do ligante asfáltico é o ponto de fulgor e análise de espuma no cimento asfáltico. O ensaio de ponto de fulgor objetiva determinar a temperatura mínima para formar vapores inflamáveis sem sustentar a combustão no ligante asfáltico. Entender essa característica é essencial, já que influencia a classificação de segurança, reduzindo os riscos no armazenamento, manuseio e transporte do ligante asfáltico.

Neste estudo, utilizou-se o método do vaso aberto Cleveland, embasados nas normas do DNER-ME 148/94 e da ABNT NBR 11341. Os procedimentos normativos executados pelo estudo são apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Ensaio do Ponto de Fulgor – (1) Preparação do Equipamento Caso Aberto Cleveland; (2) Início do Ensaio; (3) Aferição da Temperatura; (4) Finalização do Ensaio



Fonte: Elaborado pelos autor, 2024.

Após realização do procedimento técnico descrito determinou-se o ponto de fulgor das amostras ensaiadas.

Já o ensaio de espuma é normatizado pelo DNIT 095/2006 – EM. A análise da espuma em ligantes asfálticos é crucial para garantir a qualidade e estabilidade dos materiais utilizados na pavimentação. Os cimentos asfálticos, para atenderem aos padrões de qualidade, devem ser homogêneos, livres de água e compostos químicos, além de não apresentarem espuma quando submetidos ao aquecimento a 175 °C. Essa verificação torna-se ainda mais relevante quando se trata de ligantes asfálticos modificados com resíduos, onde a presença inadequada de espuma pode comprometer não apenas a eficácia do material, mas também sua segurança e durabilidade.

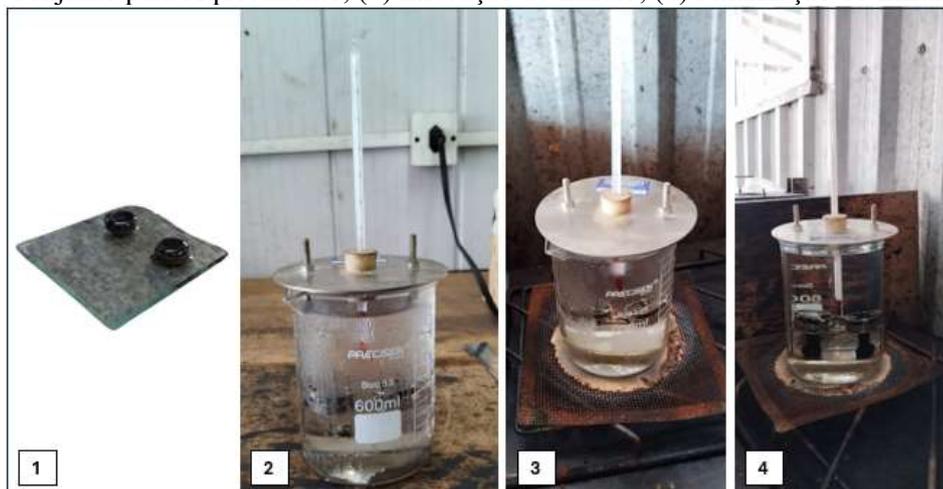
3.2.1.2.6 Ponto de Amolecimento e Índice de Susceptibilidade Térmica

Dois fatores importantes para análise da consistência térmica de materiais betuminosos é o ponto de amolecimento e o Índice de Susceptibilidade Térmica (IST). O ensaio de ponto de amolecimento representa uma medida referente ao ponto de fusão do CAP, o qual não é rigidamente determinado devido à sua natureza gradual de amolecimento. Sua avaliação é feita empiricamente, estabelecendo uma correlação entre a temperatura na qual o CAP começa a amolecer sob condições específicas e quando atinge certo grau de fluidez (DNIT, 2010).

A execução do ensaio se deu por meio do método do anel e bola (Figura 19), o qual avalia a temperatura de amolecimento, na qual uma amostra de deforma $25 \pm 0,4$ mm pela esfera durante o aquecimento. Esse parâmetro determina a característica física específica dos betumes e ligantes betuminosos em condições normalizadas de ensaio, sendo crucial para compreender

seu comportamento em diferentes temperaturas e sua aplicação na indústria da pavimentação (DNIT, 2010).

Figura 19 – Ensaio do Anel e Bola – (1) Inserção do Ligante Asfáltico nos Anéis; (2) Preparação do Conjunto para Aquecimento; (3) Execução do Ensaio; (4) Finalização do Ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após execução do ensaio, determinou-se o ponto de amolecimento das misturas como sendo a média das temperaturas em que as duas esferas envolvidas pelo CAP deslocam-se para baixo e tocam a placa de fundo.

Um outro parâmetro importante na análise da consistência térmica do ligante asfáltico é a suscetibilidade térmica. Determinado conforme a Equação 3, este parâmetro visa analisar a sensibilidade das propriedades físicas dos ligantes asfálticos às variações de temperatura (DNIT, 2006).

$$IST = \frac{500 \times (\log PEN) + 20 \times (T^{\circ}C) - 1951}{120 - 50 \times (\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

IST = Índice susceptibilidade térmica;

PEN = Penetração a 25 °C, 100g, 5 seg;

T°C = Ponto de amolecimento.

3.3 ETAPA 3: ENSAIOS NAS AMOSTRAS

A composição granulométrica utilizada neste trabalho para moldagem dos corpos de prova foi baseada nos estudos de Oliveira (2003) e Schneider (2016), conforme descrito pela Tabela 12.

Tabela 12 – Faixa Granulométrica da Moldagem das Misturas Asfálticas Drenantes

Peneira	Percentagem passando em peso			
	Faixa V	De trabalho	Oliveira (2003) & Schneider (2016)	Projeto
1"	100	100	100	100
3/4"	100	100	98	100
1/2"	70-100	74,5 - 88,5	81,5	100
3/8"	50-80	62,10 - 76,10	69,1	69,1
#4	18-30	24,6 - 34,6	29,6	29,6
#10	10-22	8,4 - 18,4	13,4	13,4
#40	6-13	9 - 10,9	5,9	5,9
#80	-	1,1 - 7,1	4,1	4,1
#200	3-6	1,3 - 5,3	3,3	3,3

Fonte: Adaptado de Schneider, 2016.

Para atender à falta de materiais finos no agregado empregado, foi adicionado material de enchimento à composição da mistura. Da mesma forma, no projeto adotado, o Cimento Portland (CP II-F) foi substituído nas mesmas proporções, buscando uma maior semelhança entre as misturas dos estudos e a dosagem do presente estudo. As quantidades em gramas utilizadas para dosagem pelo Método Marshall nos estudos são detalhadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantitativos em Gramas dos Traços de Referência

Moldagem a partir do estudo de Oliveira (2003) e Schneider (2016)

Peneiras (mm)	Passante (%)	Teores de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)							
		3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	
Quantitativo de materiais (g)									
3/4"	19	100	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	12,5	81,5	215,34	214,23	213,12	212,01	210,9	209,79	208,68
3/8"	9,5	69,1	144,34	143,59	142,85	142,1	141,36	140,62	139,87
#4	4,75	29,6	459,78	457,41	455,04	452,67	450,3	447,93	445,56
#10	2	13,4	188,57	187,6	186,62	185,65	184,68	183,71	182,74
#40	0,43	5,9	87,3	86,85	86,4	85,95	85,5	85,05	84,6
#80	0,18	4,1	20,95	20,84	20,74	20,63	20,52	20,41	20,3
#200	0,07	3,3	9,31	9,26	9,22	9,17	9,12	9,07	9,02
Fundo			15,11	15,01	15,02	14,92	14,82	14,72	14,62
Enchimento			23,3	23,2	23,00	22,9	22,8	22,7	22,6

CAP	Quantitativo de materiais (g)						
		36,00	42,00	48,00	54,00	60,00	66,00
Total (g)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Fonte: Adaptado de Schneider, 2016.

A partir dos estudos, o teor do asfalto foi definido como sendo o de 4% o que mais se adequava aos parâmetros técnicos solicitados em norma. É importante ressaltar que o teor de projeto de CAP foi mantido constante para os diversos teores de EVA incorporados ao CAP, pressupondo-se que este seria o mesmo para os diferentes tipos de CAP modificados.

Com isso, a composição granulométrica para o presente estudo está apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Composição Granulométrica da CPA do Estudo

Peneiras	Abertura das peneiras (mm)	Percentuais passantes (%)	Teor do CAP (%)
			4,0
			Quantitativo de materiais em cada corpo de prova (g)
3/4"	19	100	0
1/2"	12,5	100	0
3/8"	9,5	69,1	355,97
#4	4,75	29,6	455,04
#10	2	13,4	186,62
#40	0,425	5,9	86,4
#80	0,18	4,1	20,74
#200	0,075	3,3	9,22
Fundo			15,02
CP II-F			23,00
CAP			48,00
Total (g)			1.200,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A dosagem das misturas asfálticas CPA de referência, utilizando o ligante asfáltico CAP 50/70, e das misturas com o asfaltos modificado pelo copolímero de EVA, teve como objetivo determinar as características volumétricas e drenantes, bem como os parâmetros de resistência mecânica e adesividade do concreto asfáltico drenante produzido. Para esta análise, o ensaio Marshall foi empregado na moldagem dos corpos de prova, a fim de avaliar os parâmetros básicos conforme estipulado pela norma regulamentadora para revestimento asfáltico drenante do tipo CPA, a DNER-ES 386/99.

3.3.1 Ensaio Marshall

O ensaio marshall para moldagem das misturas asfálticas do tipo CPA seguiu os procedimentos estabelecidos nas especificações brasileiras do DNER-ME 043/95 e DNER-ES 386/99. Para cumprir as diretrizes da especificação DNER-ME 043/95, foram produzidos três corpos de prova para cada amostra analisada.

Os agregados provenientes da britagem foram primeiramente submetidos a peneiramento e separados em oito faixas granulométricas distintas, conforme especificado no projeto. Após essa etapa, foram submetidos à secagem em estufa a uma temperatura entre 105 e 110°C, e então divididos em frações destinadas a cada corpo de prova, de modo a totalizar 1.200,00 gramas quando combinados com o ligante. Os procedimentos normativos executados pelo estudo estão apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Moldagem dos Corpos de Prova – (1) Compactador Marshall; (2) Inserção da Mistura Asfáltica Drenante no Molde; (3) Desmoldagem do Corpo de Prova; (4) Corpos de Prova Moldados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para identificar as misturas estudadas e facilitar o processo de análise das amostras moldadas, foi adotada a nomenclatura apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Identificação das Misturas Asfálticas Drenantes Produzidas pelo Estudo

Misturas	Ligante asfáltico	Percentual de modificação
REF	CAP 50/70	0%
CPA01	CAP 50/70 modificado com REVA	1%
CPA02		2%
CPA03		3%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após moldagem, os corpos de prova tiveram suas alturas medidas utilizando um paquímetro, com quatro aferições realizadas em pontos diametralmente opostos para cada corpo de prova, e então calculou-se a média. Este procedimento foi aplicado a todos os corpos de prova, seguindo as diretrizes estabelecidas na especificação DNER-ME 043/95.

Com isso, pode-se determinar as características físicas, mecânicas e de adesividade das misturas asfálticas drenantes produzidas pelo estudo. Os procedimentos adotados pelo estudo estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Ensaios Executados nas Misturas Asfálticas Drenantes

Análise	Procedimentos	Norma
Volumétrica	Densidade aparente	DNIT 428/2020–ME
	Densidade máxima teórica	ABNT NBR 12891/93
	Volume de vazios comunicantes	AFNOR NF P-98-254-2/93
	Volume de vazios	ABNT NBR 12891/93
Hidráulica	Permeabilidade	CEN – EN 12697-19/2020
Mecânica	Resistência à tração por compressão diametral	DNIT 136/2018-ME
Mecânica/Adesividade	Desgaste cantabro	DNER-ME 383/99

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os procedimentos técnicos dos ensaios executados pelo estudo estão descritos nas seções abaixo.

3.3.1.1 Parâmetros Volumétricos

Após moldagem dos corpos de prova, determinou-se as características volumétricas tais como: Densidade aparente (d); Densidade Máxima Teórica (DMT); Volume de vazios comunicantes (V_{vc}); e Volume de vazios (V_v) de ar após compactação da amostra.

3.3.1.1.1 Densidade Aparente

De acordo com a especificação DNIT 428 – ME (2020, p. 2), a densidade aparente é definida como a "razão entre a massa de um corpo de prova e a massa de igual volume de água por ele ocupado, ambas a temperatura do ensaio (adimensional)".

Nessa perspectiva, a densidade aparente (d) considera os vazios presentes na mistura compactada. É importante destacar que, na determinação da densidade aparente, foi empregado um filme de PVC com densidade real de 0,47 g/cm³ conforme indicado pela norma DNIT

428/2020 - ME. Esse filme de PVC foi utilizado para proteger o corpo de prova contra a entrada de água em seu interior. Os procedimentos realizados para determinar a densidade aparente podem ser visualizados na Figura 21.

Figura 21 – Determinação da Densidade Aparente – (1) Amostras do Estudo; (2) Pré-Condicionamento das Amostras com Papel-Filme; (3) Amostras Prontas; (4) Pesagem dos Corpos de Prova na Balança Hidrostática



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O cálculo matemático para determinação da densidade aparente foi determinado conforme descrito pela Equação 4.

$$d = \frac{M_a}{M_{af} - M_i - \frac{M_f}{D_f}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

d = Densidade aparente (g/cm^3)

M_a = Peso do corpo de prova seco ao ar (g);

M_{af} = Peso do corpo de prova seco ao ar + filme de PVC (g);

M_i = Peso do corpo de prova seco ao ar + filme de PVC imersos na água (g);

M_f = Peso do filme de PVC ($M_{af} - M_a$) (g);

D_f = Peso específico do filme de PVC ($0,47 \text{ g}/\text{cm}^3$).

3.3.1.1.2 Densidade Máxima Teórica

Tendo como base a norma ABNT NBR 12891/93, determinou-se a densidade máxima teórica (DMT) com base nas massas específicas dos materiais que compõem a mistura asfáltica drenante e nos percentuais que cada um desses materiais representa em relação à mistura total.

Com as massas específicas de todos os materiais e suas proporções na mistura asfáltica drenante determinadas, a Equação 5 foi empregada para calcular a DMT.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%ag}{dag} + \frac{\%am}{dam} + \frac{\%f}{df} + \frac{\%la}{dla}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

DMT = Densidade máxima teórica;

%ag = Porcentagem de agregado graúdo na mistura asfáltica drenante;

%am = Porcentagem de agregado miúdo na mistura asfáltica drenante;

%f = Porcentagem de filler na mistura asfáltica drenante;

%la = Porcentagem de ligante asfáltico na mistura asfáltica drenante;

dag = Massa específica dos agregados graúdos (g/cm³);

dam = Massa específica dos agregados miúdos (g/cm³);

df = Massa específica do filler (g/cm³);

dla = Massa específica do ligante asfáltico (g/cm³);

3.3.1.1.3 Volume de Vazios

O volume de vazios (V_v) é determinado como sendo a proporção de vazios de ar (V_a) na amostra compactada. Para tanto, utilizou-se a norma ABNT NBR 12891, tendo em vista que é um método convencionalmente empregado no país. O cálculo foi executado conforme a Equação 6.

$$V_v = \frac{DMT - d}{DMT} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

V_v = Volume de vazios;

DMT = Densidade máxima teórica;

d = densidade aparente (g/cm³);

A norma DNER-ES 386/99 estabelece que o V_v deve estar compreendido entre 18 – 25%.

3.3.1.1.4 Volume de Vazios Comunicantes

A norma francesa AFNOR NF P-98-254-2 (1993) foi adotada como padrão normativo, considerando que o departamento de transportes do Brasil não estabelece procedimentos e limites técnicos para o uso e análise dos vazios comunicantes em misturas asfálticas drenantes no país.

Para determinar o volume de vazios comunicantes, procedeu-se com a medição da geometria de cada corpo de prova, incluindo diâmetro e altura, para calcular o volume dos materiais constituintes da mistura e os volumes de vazios (V_v) por meio de cálculos matemáticos. Os pesos dos corpos de prova foram determinados tanto em condição seca ao ar quanto submersos na água após um minuto de imersão, para determinar o volume dos materiais constituintes da mistura e os vazios não comunicantes (V_m).

Inicialmente, determinou-se o volume de materiais constituinte na mistura, juntamente com os vazios ineficazes. Esse procedimento foi determinado conforme a Equação 7.

$$V_a = \frac{M - M_i}{H_2O} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

V_a = Volume dos materiais constituintes da mistura + vazios ineficazes (cm^3);

M = Massa do corpo de prova ao ar (g);

M_i = Massa do corpo de prova imerso em água após mergulhá-lo por um minuto (g);

H_2O = Densidade da água (g/cm^3).

Com isso, o volume de vazios comunicantes foi então calculado utilizando Equação 8 abaixo.

$$V_{vc} = \frac{V - V_a}{V} \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

V_{vc} = Volume de vazios comunicantes (%);

V = Volume geométrico (cm^3);

V_a = Volume dos materiais constituintes da mistura + vazios ineficazes (cm^3).

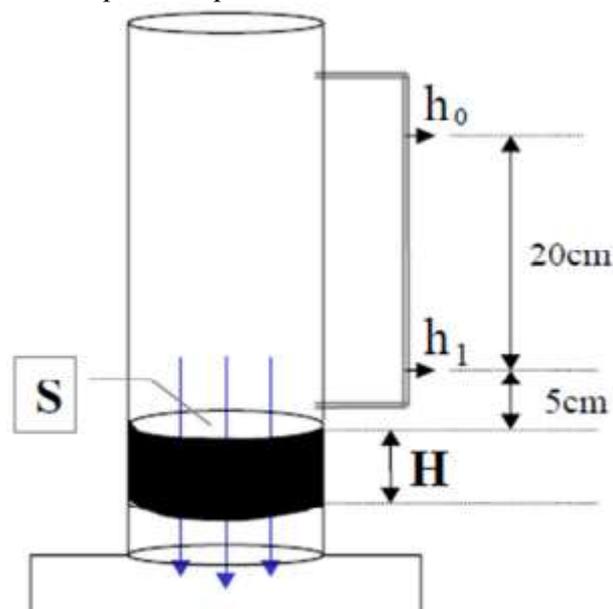
A norma AFNOR NF P-98-254-2 (1993) estabelece que o V_{vc} deve ser de no mínimo 10%.

3.3.1.2 Condutividade Hidráulica

Para conduzir o ensaio de permeabilidade nos corpos de prova, foi elaborado um permeâmetro inspirado no design do modelo EMPA, que já havia sido empregado nos estudos de Oliveira, (2003), Roseno (2005) e Schneider (2016). O permeâmetro é fundamentado na norma europeia CEN PR-12697-19-A (2020) para ensaio de permeabilidade em amostras de misturas asfálticas drenantes.

Nessa perspectiva, o ensaio de permeabilidade objetiva avaliar a propriedade de absorção vertical de água, limitando o movimento horizontal por meio do vedamento das bordas do corpo de prova, conforme apresentado pelo procedimento da Figura 22.

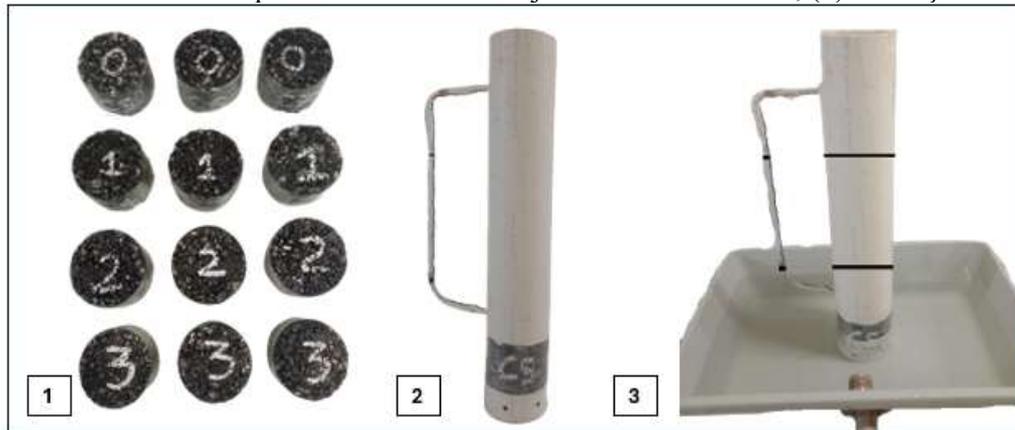
Figura 22 – Esquema Representativo do Ensaio de Permeabilidade



Fonte: CEN, 2020.

Os corpos de prova foram completamente selados com filme PVC e fixados sobre uma base de PVC usando fita adesiva, assegurando uma vedação eficaz entre o corpo de prova e o tubo de PVC de 100 mm de diâmetro do permeâmetro. Posteriormente, o equipamento foi colocado em um recipiente especial com extravasor, e água foi adicionada até que os corpos de prova ficassem completamente imersos. Após alcançar o equilíbrio do sistema, identificado pela estabilidade da coluna de água no tubo de acrílico conectado ao permeâmetro, a adição de água foi interrompida. Marcas localizadas a uma distância de 20 cm uma da outra foram utilizadas na tubulação para medir o tempo necessário para a água descer de uma marca para a outra, com o auxílio de um cronômetro. A Figura 23 representa visualmente o esquema de execução do ensaio.

Figura 23 – Execução do Ensaio de Permeabilidade – (1) Pré-Condicionamento dos Corpos de Prova; (2) Posicionamento do Corpo de Prova com o Conjunto do Permeâmetro; (3) Execução do Ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Por fim, determinou-se a permeabilidade vertical dos corpos de prova, conforme relação algébrica apresentada pela Equação 9.

$$k = 2,3 \times \left(\frac{aH}{St} \right) \times \left[\log \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \right] \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

k = Permeabilidade vertical (cm/s);

a = Área da seção transversal do tubo (cm²);

H = Altura da amostra (cm);

S = Área da seção transversal da amostra (cm²);

t = Tempo para o fluxo entre as duas marcas (s);

h_0 = Altura da água na marca superior do tubo (cm);

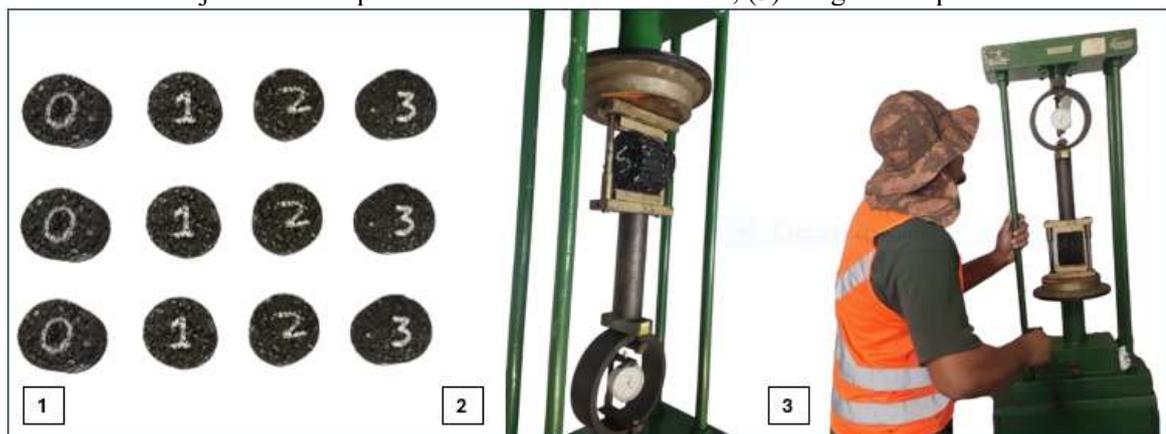
h_1 = Altura da água na marca inferior do tubo (cm).

Esse procedimento realizou-se para três corpos de prova e o resultado obtido é a média aritmética dos resultados dos três corpos de prova para garantir uma maior precisão para o ensaio.

3.3.1.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio foi regulado pela especificação DNIT 136/2018 – ME e tem como objetivo principal determinar a tensão máxima de ruptura da mistura asfáltica por compressão diametral (RT). O procedimento técnico de execução do ensaio RT envolve a aplicação de um carregamento sobre um corpo de prova Marshall solicitado diametralmente, dentro do estado plano de deformação. O carregamento é aplicado a uma velocidade de 50 mm/s, e os deslocamentos verticais são determinados, os quais podem ser interpretados como diminuições de diâmetro. A Figura 24 apresenta os procedimentos executados no estudo.

Figura 24 – Ensaio de Determinação da RT – (1) Amostras Antes do Pré-Condicionamento; (2) Ajustes do Corpo de Prova na Prensa Marshall; (3) Carga de Ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir da carga de ruptura (F), calculou-se a resistência à tração do corpo de prova por compressão diametral, conforme Equação 10.

$$\sigma_r = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

σ_r = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = Carga de ruptura (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm);

H = Altura do corpo de prova (mm).

Vale destacar que a norma DNER-ES 386/99 estabelece que a RT deve ser de no mínimo 5,5 Kgf/cm².

3.3.1.4 Ensaio Cantabro

Para avaliar a adesão entre o ligante asfáltico e os agregados nas misturas asfálticas drenantes CPA, foi realizado o exame do percentual de desgaste por abrasão dos corpos de prova na proporção ideal. A avaliação do desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero é conduzida através do Ensaio Cantabro, conforme estipulado pela especificação DNER-ME 383 (1999). A Figura 25 apresenta as etapas do ensaio executados no estudo.

Figura 25 – Ensaio Cantabro – (1) Corpos de Prova Antes do Desgaste Cantabro; (2) Corpo de Prova Dentro do Tambor Los Angeles; (3) Corpos de Prova Pós Ensaio; (4) Pesagem da Massa dos Corpos de Prova Pós Ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Por fim, determinou-se o percentual do desgaste cantabro. A Equação 11 apresenta a formulação utilizada pelo estudo para determinação do percentual do desgaste da mistura.

$$A = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \times 100 \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

A = Desgaste da mistura asfáltica drenante do tipo CPA (%);

M₀ = Massa do corpo de prova antes do ensaio (g);

M_f = Massa do corpo de prova após o ensaio (g).

A norma DNER-ES 386/99 estabelece que os corpos de prova devem apresentar no máximo 25% de perda de massa por abrasão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos pelo programa experimental deste estudo. Abordam-se os resultados da caracterização física do REVA, dos agregados, do CAP 50/70 e do CAP modificado com o REVA, juntamente com os resultados da caracterização volumétrica, funcional, mecânica e de adesividade das misturas asfálticas drenantes do tipo CPA contendo o CAP modificado em diversas proporções do REVA e considerando variadas temperaturas de usinagem.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS GRANULARES

Nesta seção são apresentadas os resultados, as análises e a devida discussão dos ensaios de granulometria, massa específica, absorção, índice de forma, equivalente de areia e abrasão Los Angeles realizados pelo estudo a partir da norma do DNIT 031:2006.

4.1.1 Análise Granulométrica

A granulometria dos materiais utilizados pela pesquisa apresentaram dimensões variando de 9,5mm – 0,075mm. Para tanto, os resultados obtidos a partir do ensaio de granulometria estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Distribuição Granulométrica
Quantidade passante (%)

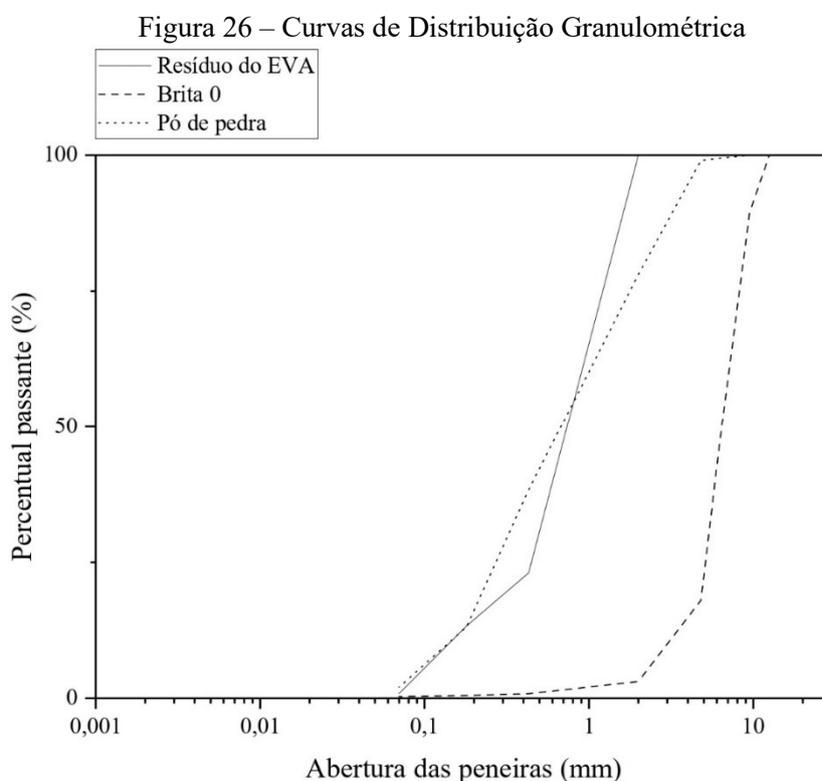
Peneiras	Abertura das peneiras (mm)	Resíduo de EVA	Brita 0	Pó de pedra	Material de enchimento
3/4"	19	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,5	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	100,00	89,43	100,00	100,00
1/4"	6,3	100,00	48,03	99,47	100,00
#4	4,75	100,00	18,04	99,04	100,00
#10	2	100,00	3,10	78,07	100,00
#40	0,425	23,06	0,83	38,33	99,95
#80	0,18	13,27	0,51	13,11	95,53
#200	0,075	0,87	0,31	2,05	80,22
FUNDO	-	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Tabela 17 evidencia que a faixa de distribuição granulométrica do REVA está variando a partir de grãos 0,425 mm até faixas de consideração do material de enchimento para a dosagem do concreto asfáltico drenante. Já os agregados do estudo variaram de 9,5 mm até partículas menores que 0,075 mm, como o material de enchimento.

A análise granulométrica revelou que o diâmetro máximo dos grãos é da ordem de 9,5 mm para o agregado graúdo. Já os diâmetros máximos do agregado miúdo, dos resíduos do EVA e do material de enchimento são de 4,75 mm, 1,18 mm e 0,43 mm, respectivamente.

Tendo as porcentagens que passam em cada peneira e seus respectivos diâmetros, foram determinadas as curvas granulométricas do resíduo do EVA e agregados utilizados no estudo. A Figura 26 apresenta a curva granulométrica dos materiais.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As curvas do agregado graúdo e do agregado miúdo utilizados no estudo apresentaram características diferentes. O pó de pedra apresentou uma curva menos íngreme que a curva da brita 0, de modo que há um maior percentual passante concentrado 2 – 0,18 mm. Essa característica possibilita um preenchimento dos vazios de forma mais eficaz, conforme aponta Bernucci *et al.* (2022).

Diante do comportamento observado pelas curvas granulométricas dos materiais granulares da pesquisa fica evidente que as distribuições granulométricas apresentam

características de variação dos materiais a serem utilizados na moldagem dos corpos de prova, conforme as faixas de solicitação de serviço proposta pela DNER-ES 386/99.

Observa-se uma semelhança entre os resultados do agregado fino da pesquisa e os do REVA. Isso implica que as características granulométricas do REVA são comparáveis às da fração fina do agregado, como o material de enchimento. Para além, o resíduo fino promove uma melhor trabalhabilidade para modificação manual (Gama, 2013). Estes fatores fundamentam a modificação das misturas pelo percentual passante da #10, com frações em diâmetros menores que 2 mm, conforme indicado por Gama (2013).

4.1.2 Massa Específica e Absorção

Os resultados obtidos a partir do programa experimental executado pelo estudo mostraram que as massas específicas dos materiais analisados variaram de 2,37 – 2,84 g/cm³. Já a absorção do agregado graúdo do estudo obteve um percentual de aproximadamente 0,49%, conforme é mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultado do Ensaio de Massa Específica e Absorção

Massa Específica (g/cm ³)			Absorção (%)		
Brita 0	Pó de pedra	Cimento Portland (CP II – F)	Brita 0		
			Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)
2,51	2,84	2,37	2000	2009,79	0,4895

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As normativas do setor de transportes do país não determinam limites a serem atendidos pelas massas e absorção dos agregados na indústria da pavimentação asfáltica. Entretanto, os dados obtidos pelo estudo estão em consonância com os resultados obtidos pela literatura vigente. O resultado da massa específica da brita 0, do pó de pedra e do CP II-F estão compatíveis com os resultados obtidos por Dresch (2016), Martinez (2017) e Pires (2019).

Quanto à absorção do agregado, os estudos tendem a obter um percentual maior que 1%, conforme destacado pelas pesquisas de Dresch (2016) e Pires (2019). Entretanto, neste estudo obteve-se uma absorção de aproximadamente 0,5%. Os resultados obtidos pelo estudo estão compatíveis com os resultados de Garcia *et al.* (2019) e Martinez (2017).

Vale destacar que o ensaio de absorção foi realizado apenas no agregado graúdo, tendo em vista que as misturas asfálticas drenantes obtém uma pequena quantidade de finos em sua

composição, sendo a maior concentração de agregados graúdos na composição final da mistura asfáltica drenante, conforme especificado por Balbo (2007).

A análise não se estendeu ao resíduo do EVA, pois conforme especificado por Gama (2013), quando o REVA é incorporado ao ligante asfáltico, este, por sua vez, não reage quimicamente e nem absorve umidade para a mistura, tendo em vista que o mesmo é encapsulado pelas propriedades adesivas do ligante betuminoso.

Por outro lado, a absorção do agregado graúdo pode ter um impacto positivo na adesividade com o ligante asfáltico se ocorrer em pequena magnitude, melhorando o intertravamento mecânico da mistura, como é o caso do agregado utilizado por este estudo. Nesse contexto, uma absorção excessiva pode reduzir a espessura da película de ligante asfáltico sobre o agregado, aumentando a suscetibilidade da mistura à ação da água e o consumo do CAP (Gouveia *et al.*, 2004).

Dessa forma, o resultado da absorção do agregado graúdo obtido pelo estudo é um parâmetro positivo para o concreto asfáltico drenante, promovendo uma boa adesividade ligante-agregado, bem como diminuindo o consumo do CAP na mistura asfáltica drenante.

4.1.3 Índice de Forma

A partir do programa metodológico proposto para análise do índice de forma dos agregados graúdos, evidenciou-se um índice de aproximadamente 1,0, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultado do Índice de Forma dos Agregados Graúdos

Índice de forma da amostra			
Quantidade de amostra	Comprimento médio	Espessura média	Índice de Forma
200	6,01	5,8	1,04

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O resultado do ensaio foi satisfatório tendo em vista que o índice de forma dos agregados graúdos do estudo foi superior a 0,5 (limite solicitado pelo DNIT 031:2006).

Nesse contexto, índices maiores que 0,5, indicam que os agregados vão proporcionar um melhor intertravamento na compactação das misturas, resultando em uma material mais resistente (Arndt; Souza; Bianchini, 2007; Silva, 2012). Isso aumenta a capacidade de suportar cargas, reduz a deformação plástica e melhora a durabilidade da pavimentação. Além disso,

uma forma mais equilibrada dos agregados contribui para uma distribuição uniforme das tensões, diminuindo a probabilidade de falhas prematuras, como trincas e deformações permanentes no revestimento asfáltico (Bernucci *et al.*, 2022).

Dessa forma, o resultado obtido pelo estudo para o índice de forma dos agregados indica que estes podem promover melhores desempenhos mecânicos para as misturas asfálticas, conforme apresentado por Arndt, Souza & Bianchini (2007) e Silva (2012).

4.1.4 Abrasão Los Angeles

O percentual de desgaste Los Angeles obtido para o agregado graúdo ensaiado pelo estudo foi de aproximadamente 9,5%, conforme os dados apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultado do Ensaio de Abrasão Los Angeles

Graduação	Classificação da Graduação para o ensaio			Execução do ensaio		
	Massa total (g)	Qt. Rotações	Nº Esferas	Carga abrasiva (g)	Massa final (g)	Abrasão (%)
C	5000	500	8	3330	4526,7	9,47

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os resultados obtidos pelo ensaio foram satisfatórios haja vista que o limite para o desgaste no agregado graúdo solicitado pela norma do DNIT 031:2006 é de no máximo 50%. Com isso, tendo em vista que o percentual obtido pelo estudo é de aproximadamente 9,5% e o limite que a norma solicita para o ensaio de Abrasão Los Angeles é de no máximo 50%, justifica-se o emprego do agregado graúdo na produção das misturas asfálticas drenantes.

Para além, agregados com baixa resistência à abrasão tendem a se desgastar e fragmentar mais facilmente, o que pode comprometer a integridade da mistura asfáltica. Nessa perspectiva, quando os agregados se desgastam rapidamente, produzem partículas finas que podem alterar sua estrutura interna. Isso pode levar a uma diminuição na estabilidade, além de aumentar a suscetibilidade à deformação permanente, como trilhas de roda. Além disso, a fragmentação excessiva dos agregados pode causar uma segregação indesejada, onde partículas de diferentes tamanhos não se distribuem uniformemente, resultando em áreas de fraqueza (Dresch, 2016; Martinez, 2017).

O resultados obtido pelo estudo estão em consonância com os resultados obtidos por Dresch (2016) e Schneider (2016) os quais obtiveram percentuais de desgaste do agregado por abrasão próximos a 10%, conforme o resultado obtido por este estudo.

4.1.5 Equivalente de Areia

Os resultados do Equivalente de Areia (EA) para o pó de pedra analisado pelo estudo variaram de 64,71 – 67,06%, obtendo como uma média de aproximadamente 66%. Os resultados obtidos, por meio do procedimento adotado, estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultado do Ensaio do Equivalente de Areia

Amostra I		Amostra II			Amostra III			EA	
L Argila (cm)	L Areia (cm)	EA I (%)	L Argila (cm)	L Areia (cm)	EA II (%)	L Argila (cm)	L Areia (cm)		EA III (%)
8,5	5,7	67,06	8,5	5,6	65,88	8,5	5,5	64,71	66,00

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

A norma DNIT 031/2006 – ES estipula que o percentual do equivalente de areia do agregado miúdo a ser empregado em misturas asfálticas deve ser igual ou superior a 55%. Para tanto, o resultado do EA do agregado miúdo utilizado pelo estudo conforme pode ser observado na tabela acima é de 66%.

Nessa perspectiva, tendo em vista que o resultado obtido pelo estudo é superior a 55%, conclui-se que o resultado do equivalente de areia tem valores aceitáveis, em relação a areia da natural, segundo a especificação DNIT 031/2006 - ES do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes para obras de pavimentação asfáltica no Brasil.

Este resultado também está em consonância com os resultados obtidos pelos estudos de Dresch (2016), Schneider (2016) e Martinez (2017).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

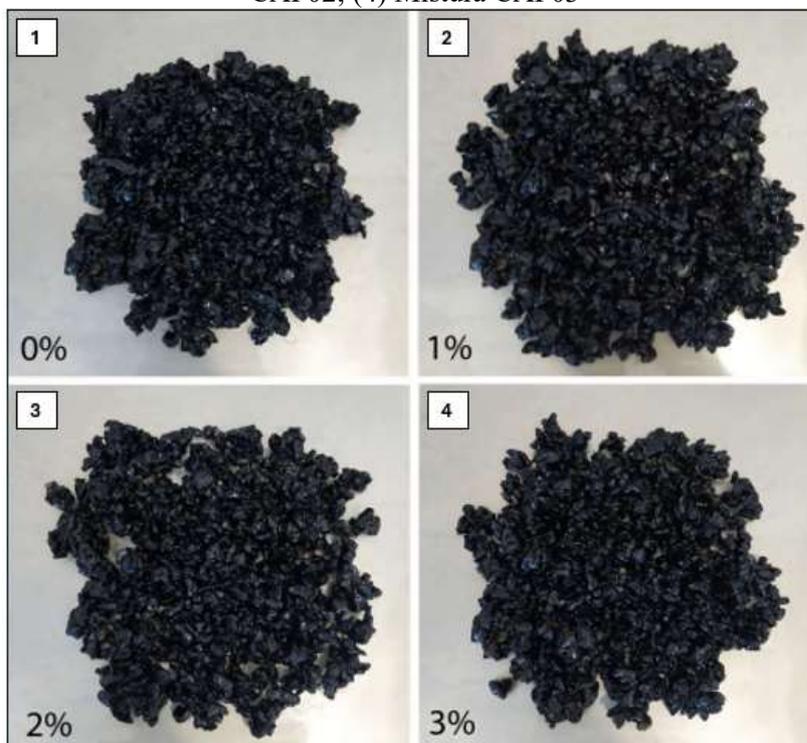
Nesta seção são apresentados os resultados e a devida discussão dos ensaios da caracterização física do ligante asfáltico modificado a partir da norma DNIT 095/2006.

4.2.1 Adesividade ao Ligante Asfáltico

Os resultados visuais obtidos pelo estudo para a adesividade do ligante asfáltico com os agregados graúdos do estudo estão apresentados na Figura 27. Para tanto, vale destacar que já no momento da incorporação do REVA no ligante asfáltico foi possível observar que à medida que aumentava a porcentagem do resíduo, a mistura se mostrava cada vez mais consistente e

difícil trabalhabilidade, conforme frisou Balbo (2007). Ao completar o tempo de repouso das amostras, o material foi retirado do becker e espalhado em uma placa cerâmica. Pode-se observar que o ligante asfáltico aderiu 100% a superfície do agregado.

Figura 27 – Mistura Final na Placa Cerâmica – (1) Mistura REF; (2) Mistura CAP01; (3) Mistura CAP02; (4) Mistura CAP03



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na análise qualitativa dos resultados obtidos, observou-se que a incorporação dos resíduos de EVA influenciou positivamente as propriedades físicas de homogeneidade e adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico. Verificou-se uma melhoria significativa na adesividade do ligante à brita, com a formação de uma mistura mais homogênea, coesa, com boa adesão, sem o descolamento da película. Esses resultados resultam em benefícios para a durabilidade e desempenho do revestimento asfáltico, além de indicar um potencial uso sustentável desses resíduos na construção de pavimentos asfálticos, conforme indicado por Santana *et al.* (2018).

A melhoria da adesividade do ligante asfáltico com os agregados na mistura asfáltica, especialmente em misturas drenantes, como é o caso da CPA, traz benefícios significativos para a durabilidade ao dano por umidade e até um retardo no envelhecimento do ligante asfáltico. De acordo com Bernucci *et al.* (2022), uma adesão mais forte entre o ligante e os agregados

reduz a vulnerabilidade ao dano por umidade, prevenindo a formação de trincas e desagregações devido à infiltração de água.

Além disso, essa melhoria na adesividade ajuda a retardar os processos de envelhecimento do asfalto, preservando suas propriedades mecânicas e resistência ao longo do tempo (Bernucci *et al.*, 2022; Lesueur; Petit; Ritter, 2013; Rios, 2014). No caso específico das misturas drenantes, a CPA beneficia-se ainda mais, pois mantém sua capacidade de drenagem e aumenta a segurança nas vias, resultando em pavimentos mais duráveis, com menor necessidade de manutenção e maior conforto para os usuários (Martinez, 2017).

4.2.2 Viscosidade Saybolt Furol

O ensaio de viscosidade Saybolt Furol foi realizado tanto na amostra de referência REF quanto nas amostras modificadas (CAP01, CAP02 e CAP03). Os resultados do ensaio de viscosidade para o CAP REF e para as amostras modificadas CAP01, CAP02 e CAP03 são mostrados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados do Ensaio da Viscosidade

Misturas	Viscosidade Saybolt Furol (s)			
	135°C	150°C	163°C	177°C
REF	203	130	53	32
CAP01	215	135	65	37
CAP02	225	131	82	39
CAP03	230	150	90	39

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

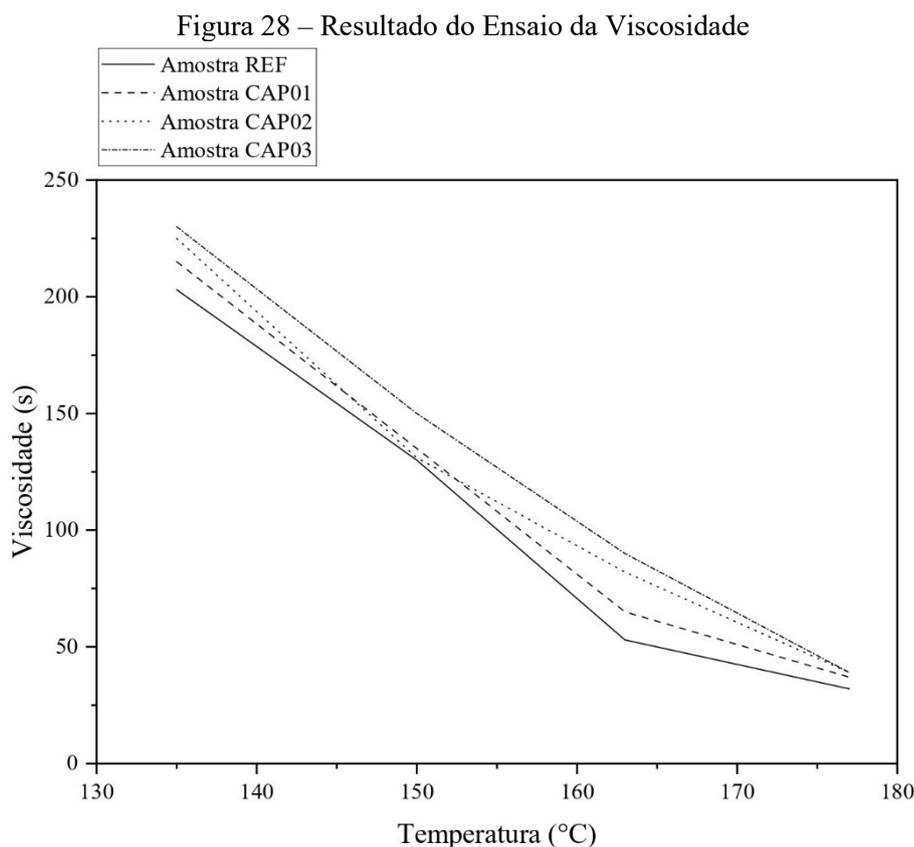
Conforme pode-se observar na Tabela 22, a amostra de referência REF apresentou viscosidades variando de 32 – 203s. Já as amostras modificadas CAP01, CAP02 e CAP03 apresentaram variações superiores aos resultados obtidos pela amostra sem modificação (amostra REF), obtendo resultados variando de 39 – 230s.

A menor viscosidade obtida foi para a amostra REF com uma viscosidade de 32 s. Já a maior viscosidade apresentada foi para o CAP modificado com resíduo no teor de 3% (amostra CAP03), com uma viscosidade de 230 s.

Nesse contexto, é possível observar o aumento da viscosidade do CAP diante do aumento do teor de REVA para as amostras modificadas CAP01, CAP02 e CAP03, se comparadas com a amostra REF. As viscosidades das amostras modificadas chegaram a

apresentar aumentos de aproximadamente 13% em relação a amostra de referência REF, sem modificação.

Entretanto, cabe destacar que embora houveram variações para o aumento do teor do REVA (Figura 28), o material modificado ainda atendeu aos parâmetros normativos da DNIT 095/2006, que especifica a variação e os limites a serem atendidos para o ensaio de viscosidade, os quais devem atender aos limites de 30 – 150 segundos (s).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Em síntese, quando submetido a uma baixa temperatura de 135°C, a incorporação do resíduo polimérico provoca um aumento notável na viscosidade em comparação com o CAP puro. De forma geral, os resultados demonstraram que os ligantes modificados com o REVA exibem viscosidades mais altas em relação ao ligante convencional, assim como os estudos realizados por Gama (2013) e Rios (2014).

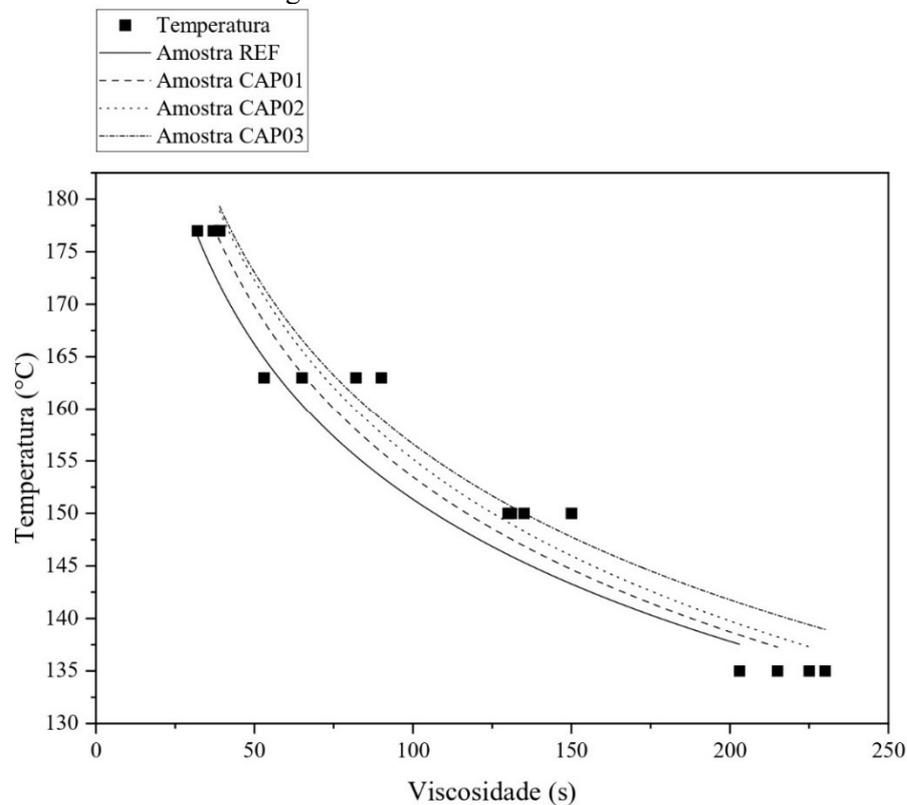
Em uma temperatura mais elevada, como é o caso do aquecimento do ligante asfáltico a 177°C, o comportamento do asfalto não mostra diferenças significativas entre os diversos teores, nem em relação ao CAP puro, assim como discutido por Balbo (2007). Os resultados indicaram que, a 135°C, o ligante original tem a viscosidade mais baixa, enquanto o asfalto modificado com maiores porcentuais do REVA apresentam uma viscosidade mais alta, o que é

típico da adição de resíduos ao ligante, conforme observado também nas análises de Santana *et al.* (2018) e Pereira, Silva e Vieira (2021).

O aumento da viscosidade depende, em grande parte, do tipo e da quantidade de modificador utilizado, além da interação entre este modificador e o ligante asfáltico utilizado. De acordo com Domingos *et al.* (2012), o CAP modificado com 8% de EVA tende a apresentar uma viscosidade mais alta em comparação com outros modificadores, como *Polyphosphoric Acid* (PPA), Elvaloy e SBS, tanto a 135°C quanto a 177°C, evidenciando a significativa influência desse polímero no aumento da viscosidade do ligante modificado.

Para determinação das temperaturas de usinagem, determinou-se as curvas de viscosidade com base na norma DNER-ME 043/95. A temperatura em que o ligante foi aquecido foi aquela em que este apresentou uma viscosidade de 85 ± 10 sSF e a temperatura de compactação da mistura foi aquela em que a viscosidade foi de 140 ± 15 sSF. Já os agregados foram aquecidos a uma temperatura 10°C acima da temperatura do aquecimento do ligante asfáltico. As curvas da viscosidade determinadas pelos pontos de temperatura à 135°C, 150°C, 163°C e 177°C são apresentadas na Figura 29.

Figura 29 – Curvas da Viscosidade



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Assim como descrito por Polacco *et al.* (2005), as curvas deste estudo não apresentam regiões distintas, exibindo uma diminuição gradual da viscosidade com o aumento da temperatura, conforme ilustrado na Figura 30. Além disso, esse comportamento gradual e contínuo também é observado em asfaltos modificados com PE e SBS, reforçando a consistência dos resultados obtidos em diferentes tipos de modificadores poliméricos (Polacco *et al.*, 2005).

A partir das curvas da viscosidade, obtiveram-se as temperaturas de usinagem dos materiais utilizados pelo estudo. Para as amostras REF, sem modificação, as temperaturas variaram de 142,8 – 157,1°C. Já para as amostras CAP01, CAP02 e CAP03, modificadas pelo REVA, as temperaturas de usinagem variaram de 143,46 – 173,69°C. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Temperaturas de Usinagem

Misturas	Temperaturas dos ligantes asfálticos (°C)	Temperaturas dos agregados (°C)	Temperaturas de compactação (°C)
REF	157,1 – 152,3	167,1 – 162,3	146,9 – 142,8
CAP01	159,74 – 154,24	169,87 – 164,24	148,10 – 143,46
CAP02	162,46 – 156,65	172,46 – 166,65	150,17 – 145,27
CAP03	163,69 – 158,07	173,69 – 168,07	151,78 – 147,02

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Dessa forma, as curvas das viscosidades indicaram aumentos das temperaturas de usinagem das misturas asfálticas a serem produzidas com o ligante asfáltico modificado de aproximadamente 4,2% em relação a amostra de referência REF. Vale destacar que embora o aumento seja perceptível, este não ultrapassou a temperatura de 177°C, conforme especificado pela norma DNER-ME 045/95.

4.2.3 Penetração

Os resultados obtidos pelo estudo para o ensaio de penetração das amostras REF, CAP01, CAP02 e CAP03 estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados do Ensaio de Penetração

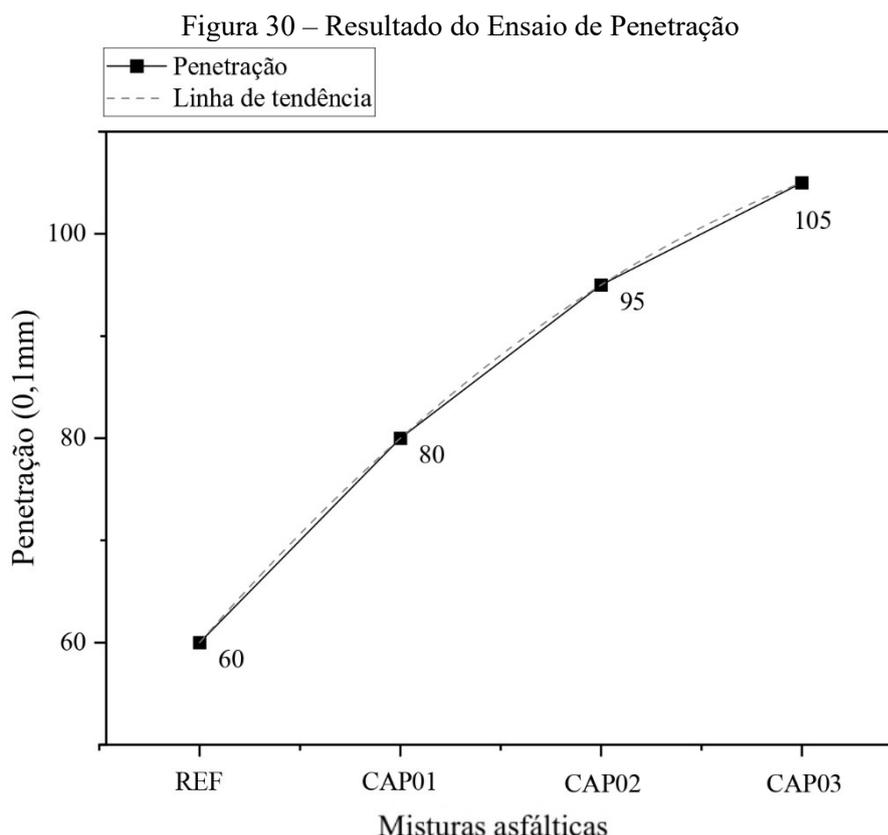
Misturas	Penetração (0,1mm)
REF	60
CAP01	80
CAP02	95
CAP03	105

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A amostra de referência REF, sem modificação, obteve um índice de penetração de 60 (0,1mm), caracterizando-se como um CAP de consistência média (DNIT, 2006). Já as amostras modificadas em teores de 1, 2 e 3% do REVA apresentaram um aumento na penetração média de 15 (0,1mm), em relação a amostra REF, evidenciando a diminuição da consistência da amostra. Esse aumento da penetração nas amostras modificadas foi de 75,00% em relação a amostra de referência REF.

Embora o CAP modificado tenha apresentado essa diminuição de consistência das amostras CAP01, CAP02 e CAP03, estas ainda se caracterizam como CAPs de consistência média, conforme a norma DNIT 095/2006.

A Figura 30 apresenta os resultados obtidos pelo estudo para as amostras REF, CAP01, CAP02 e CAP03.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Conforme pode ser observado graficamente na Figura 31, os resultados apontam para o aumento da penetração e uma menor consistência do CAP. Isso se justifica pelo meio de modificação por via úmida de forma manual para as frações finas de resíduos copolímeros utilizado no estudo, conforme apresentado por Martinez (2017). Ou seja, resíduos com frações

granulométricas graúdas tendem a diminuir a penetração de forma mais direta e promover maior aderência já quando incorporados em menores porcentagens (Martinez, 2017).

Em uma análise comparativa realizada por Saoula *et al.* (2009), examinou-se o ligante asfáltico modificado com diferentes teores de incorporação de EVA, variando entre 3%, 5% e 7% do copolímero puro. O estudo objetivou analisar as características físicas dos ligantes modificados, especificamente na penetração e consistência. Os resultados revelaram um aumento potencial na penetração quando a modificação do ligante asfáltico era de até 3%, contudo, à medida que os níveis de incorporação do ligante asfáltico modificado aumentavam, a rigidez se intensificava, resultando em uma redução da penetração, devido ao substancial acréscimo na viscosidade do ligante asfáltico modificado.

Esse processo pode contribuir também para o retardo do envelhecimento e oxidação do ligante asfáltico, conforme discutido por Gama (2013). No processo de envelhecimento de curto prazo, a mistura sofre alterações reológicas bruscas, como o aumento da viscosidade e a diminuição da penetração, devido à oxidação pelo ar quente e à perda de componentes voláteis. Por outro lado, no envelhecimento de longo prazo, as mudanças continuam, mas em uma taxa menor e cada vez mais lenta, sendo mais perceptíveis nos primeiros anos. Diante deste contexto, a incorporação de frações finas de resíduos podem conferir melhores características físicas e até mecânicas as misturas asfálticas modificadas, contribuindo assim para sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo.

Essa observação pode ser explicada pela sensibilidade térmica do material, já que o CAP exhibe mudanças em suas propriedades físicas devido aos efeitos da temperatura e à oxidação do ligante asfáltico. Panda & Mazumdar (1999) destacaram a importância da temperatura de mistura na produção do CAP modificado com resíduos copoliméricos, ressaltando sua influência na penetração do ligante asfáltico. Suas descobertas indicaram que o aumento da temperatura de mistura resultou em uma redução na penetração do CAP, mesmo com a mesma porcentagem de EVA, conforme proposto no estudo de Martinez (2017).

4.2.4 Densidade e Massa Específica

Os resultados do ensaio de densidade do asfalto modificado (CAP01, CAP02 e CAP03) apresentaram uma variação de 1,00 – 1,015 g/cm³, se comparado com a amostra de referência REF, sem modificação. De modo semelhante, a massa específica do material variou de 0,9971 – 1,0121 g/cm³. Os resultados obtidos de densidade e massa específica do ligante asfáltico puro e modificado estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados da Densidade e Massa Específica

REF	Densidade (g/cm³)			REF	Massa específica (g/cm³)		
	CAP01	CAP02	CAP03		CAP01	CAP02	CAP03
1,00	1,005	1,01	1,015	0,9971	1,0021	1,0071	1,0121

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Conforme apresentado na Tabela 25, os resultados da densidade do material modificado obteve um aumento de aproximadamente 0,5% em relação a amostra de referência REF, com aumento médio de 0,005 g/cm³. Esse aumento da densidade foi observado também nos resultados da massa específica do material, tendo em vista que a determinação da massa específica é dependente do resultado da densidade do material.

Nesse contexto, os resultados obtidos não apresentaram grande variação nos valores, conforme descrito por Balbo (2007), considerando que o percentual de modificação estava na faixa de 1-4% - um intervalo que não causa mudanças significativas na composição do ligante asfáltico modificado. Os resultados deste estudo estão alinhados com os achados de Soares *et al.* (1999), Gama (2013), Martinez (2017) e Brito e Casagrande (2020).

Segundo Martinez (2017), o aumento da densidade do ligante asfáltico pode ser observado com a elevação do percentual do material modificador. Nesse contexto, ligantes asfálticos modificados com materiais de densidades semelhantes à do ligante asfáltico, como o REVA, ocupam maiores volumes de asfalto na matriz de agregados, resultando em menores volumes de vazios em comparação à amostra de referência do CAP 50/70. Esse resultado pode indicar um aumento na rigidez do ligante asfáltico e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas drenantes, bem como na adesividade superficial entre o ligante asfáltico e os grãos de agregados. Isso também contribui para o aumento da resistência ao dano por umidade induzida, maior rigidez e redução da deformação permanente em misturas asfálticas (Martinez, 2017).

4.2.5 Ponto de Fulgor e Espuma

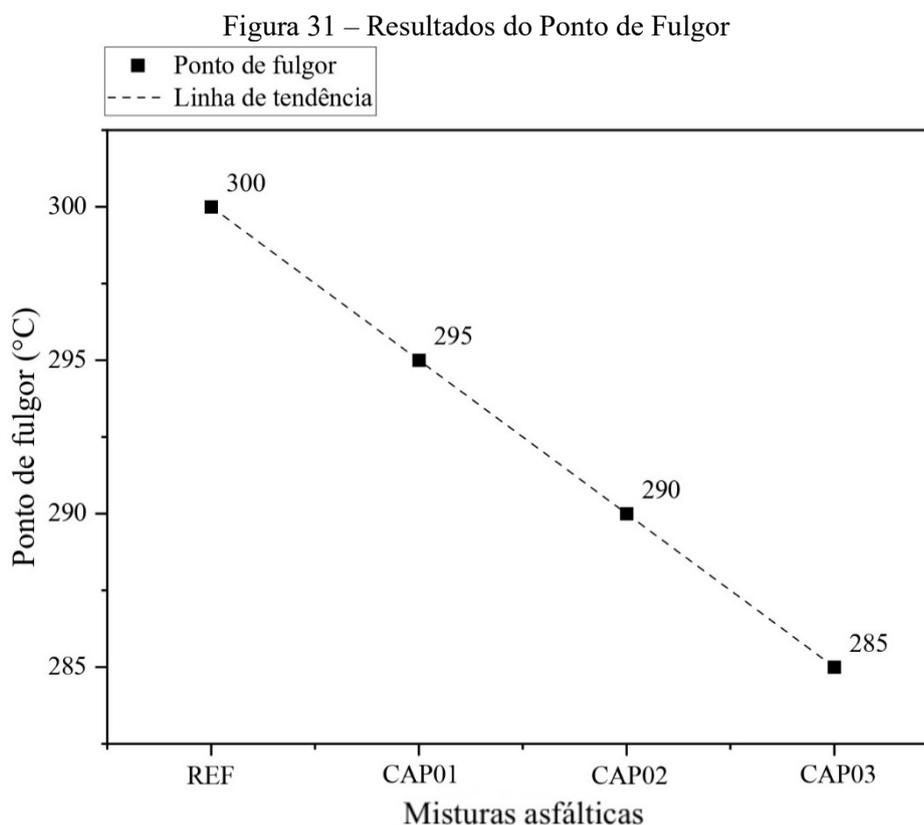
Os resultados obtidos pelas amostras modificadas CAP01, CAP02 e CAP03 para o ponto de fulgor apresentaram uma variação de 285 – 300°C, com relação a amostra de referência REF. Para tanto, os resultados obtidos pelo estudo estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados do Ensaio do Ponto de Fulgor

Misturas	Ponto de fulgor (°C)
REF	300
CAP01	295
CAP02	290
CAP03	285

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Tabela 26 evidencia a variação do ponto de fulgor em relação a amostra referência REF, sem modificação. Essa variação do ponto de fulgor aconteceu em temperaturas de 5°C, sendo a amostra REF com o maior ponto de fulgor (300°C). Com uma diminuição de 15°C em relação a amostra REF, a menor temperatura de fulgor foi evidenciada para a amostra modificada com teor de 3% do REVA (amostra CAP03), com uma temperatura de 285°C. A Figura 31 apresenta essa diminuição a medida em que se acrescenta o teor do REVA na amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Entretanto, vale destacar que embora as misturas modificadas CAP01, CAP02 e CAP03 apresentaram um comportamento de diminuição da temperatura de fulgor, estas ainda atenderam aos limites exigidos pela norma DNIT 095/2006, a qual o CAP 50/70 deveria apresentar uma temperatura de fulgor mínima de 235°C.

Segundo Lima (2008) e Rosa *et al.* (2012), essa diminuição do ponto de fulgor é atribuída à presença de constituintes voláteis provenientes do resíduo copolimérico, uma vez que este copolímero não é puro e sofre degradação térmica. Esses constituintes voláteis também foram detectados durante as incorporações do resíduo polimérico ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50-60) e em ensaios subsequentes, evidenciados pelo forte odor característico do resíduo polimérico. Embora essa redução no ponto de fulgor não seja desejável, não comprometerá o material obtido, pois, para aplicações em campo, a temperatura de aquecimento está dentro da faixa mínima exigida pelo DNIT (235°C).

Assim como o ponto de fulgor, o ensaio de espuma para todos os teores de asfalto modificado atendeu as normativas vigentes, não apresentando espuma quando aquecidos a uma temperatura de 175°C, conforme apresentado na Tabela 17. Dessa forma, o ensaio de espuma revelou um material adequado para uso na pesquisa, haja vista que o material incorporado não reagiu quimicamente com o cimento asfáltico analisado, conforme indicado por Gama (2013) e Santos *et al.* (2021).

4.2.6 Ponto de Amolecimento e Índice de Susceptibilidade Térmica

Os resultados obtidos pelas amostras REF, CAP01, CAP02 e CAP03 para o ponto de amolecimento e para o Índice de Suscetibilidade Térmica apresentaram variações de 46 – 49°C e (-0,31) – (-1,02), respectivamente.

Para tanto, a Tabela 27 apresenta os resultados para o ponto de amolecimento das amostras analisadas pelo estudo.

Tabela 27 – Resultados do Ensaio do Ponto de Amolecimento

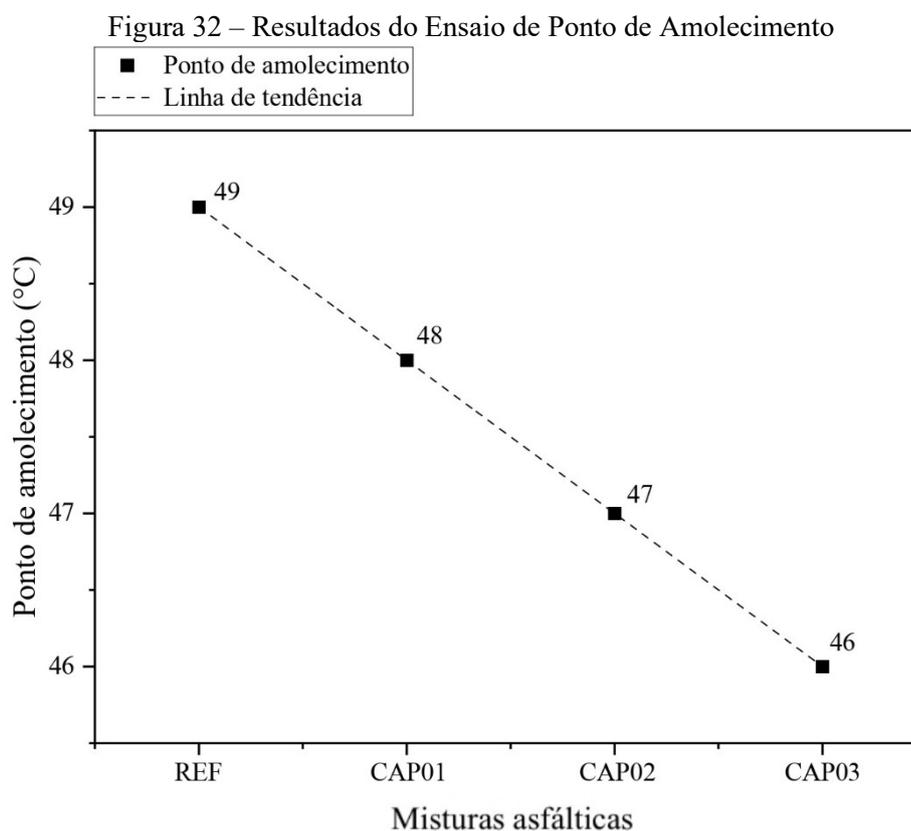
Misturas	Ponto de amolecimento (°C)
REF	49
CAP01	48
CAP02	47
CAP03	46

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Conforme pode ser observado na Tabela 27, os resultados obtidos para o ponto de amolecimento das amostras estudadas ilustram como o teor de REVA influencia a transição no ligante asfáltico modificado. Para a amostra de CAP convencional (amostra REF), o ponto de amolecimento foi medido em 49°C. Conforme o teor do REVA aumentava, houve uma

diminuição linear na temperatura, chegando a 46°C com um teor de 3% do REVA, para a amostra CAP03.

Nesse contexto, os resultados mostram uma pequena variação de temperatura de 3°C para a diminuição do ponto de amolecimento, em relação com a amostra REF, sem modificação. Essa diminuição observada para as amostras modificadas CAP01, CAP02 e CAP03 foi de aproximadamente 6,00% em relação a amostra de referência REF. Essa diminuição pode ser observada na Figura 32.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Vale destacar que embora o teor de modificação do REVA tenha proporcionado uma diminuição do ponto de amolecimento do asfalto modificado, essa diminuição não comprometeu o atendimento normativo exigido pela norma DNIT 095/2006, a qual especifica que o ponto de amolecimento mínimo que deve ser apresentado pelo material é de 46°C.

Embora o desejado é que houvesse um aumento do ponto de amolecimento, pois, segundo Oda (2000), o aumento do ponto de amolecimento indica um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto modificado. De maneira geral, uma redução de 49°C, para a amostra pura do ligante asfáltico, até 46°C com 3% de resíduo

polimérico adicionado, não apresenta uma variação significativa, conforme discutido por Balbo (2007) e Lima (2008).

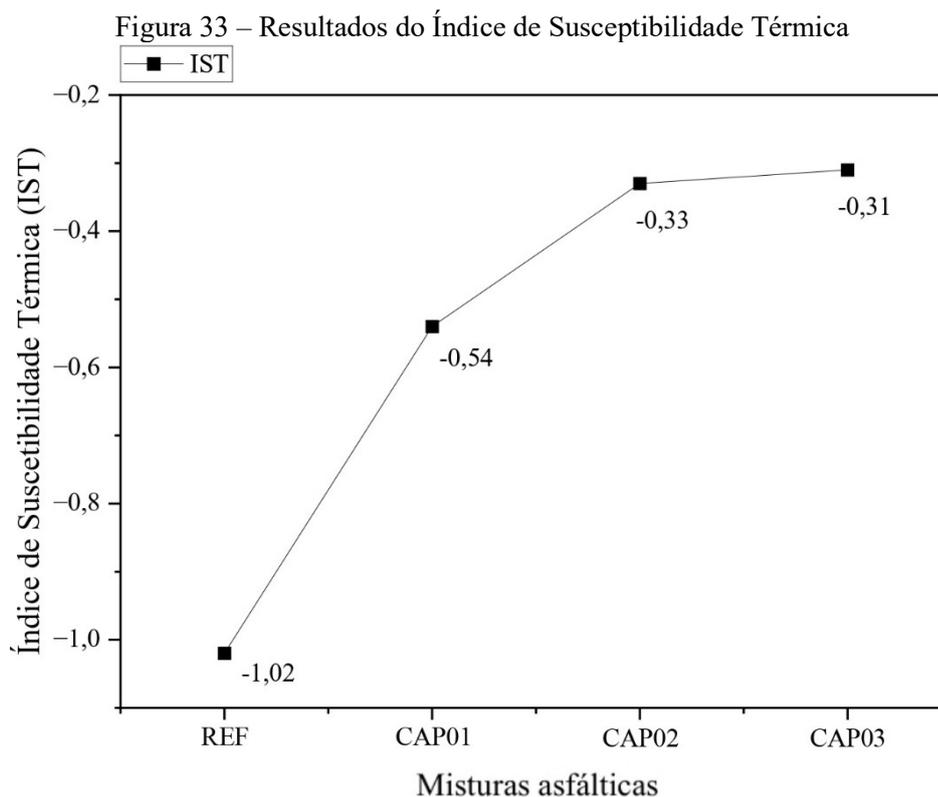
Uma outra medida relacionada com a temperatura de amolecimento do ligante asfáltico é o Índice de Suscetibilidade Térmica (IST), o qual é um parâmetro que indica a sensibilidade desse material à variação de temperatura. Para tanto, a amostra de referência REF apresentou um índice de -1,02. Com uma diminuição média do IST entre as amostras modificadas de aproximadamente -0,24, o menor índice obtido pelo estudo foi para a amostra CAP03, modificada com 3% do REVA, a qual apresentou um IST de -0,31, conforme apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados do IST para as Amostras do Estudo

Misturas	IST
REF	-1,02
CAP01	-0,54
CAP02	-0,33
CAP03	-0,31

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir da Tabela 28, pode-se observar que os índices obtidos para as amostras modificadas CAP01, CAP02 e CAP03 do estudo apresentam uma diminuição, se comparados com a amostra referência REF, sem modificação. Essa diminuição foi de aproximadamente 70,00%, conforme pode ser observado na Figura 33.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Conforme pode ser observado pela Figura 33, os resultados referentes ao IST mostraram uma proximidade maior com zero quando se comparou com o ligante sem modificações, para os teores de 2 e 3% do REVA, conforme indicado pelos estudos de Lima (2008) e Gama (2013).

Nesse contexto, os índices obtidos pelo estudo se enquadram nos parâmetros normativos exigidos pela norma DNIT 095/2006 para o material ensaiado, a qual deve apresentar um IST entre -1,50 a 0,7.

Isso sugere que a consistência do ligante permanece praticamente constante ao longo de uma gama mais ampla de temperatura em comparação com o CAP sem modificações. Essa estabilidade indica que o ligante conserva sua flexibilidade e capacidade de resistir à formação de fissuras, mesmo quando exposto a condições climáticas mais baixas (Alencar, 2005; Dantas *et al.*, 2007; D'Antona; Frota, 2011).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES

Nesta seção, serão apresentados os resultados e as devidas análises da caracterização física, mecânica, hidráulica e de adesividade das misturas asfálticas produzidas pelo estudo.

4.3.1 Parâmetros Volumétricos

Dado que a principal característica da CPA é sua capacidade de drenagem, é crucial analisar as propriedades volumétricas da mistura asfáltica. O cumprimento das diretrizes estabelecidas pela especificação de serviço DNER-ES 386 (1999) é um dos fatores que qualificam as misturas abertas do tipo CPA. A seguir, são apresentados os resultados obtidos para densidade aparente, densidade máxima teórica, volume de vazios e volume de vazios comunicantes para as amostras REF, CPA01, CPA02 e CPA03 analisadas pelo estudo.

Para tanto, os resultados da densidade aparente para as amostras REF variaram de 1,83 – 1,97 g/cm³, obtendo uma média de 1,90 g/cm³. Já as amostras CPA01, CPA02 e CPA03, modificadas pelo REVA, apresentaram uma variação de 1,86 – 2,03 g/cm³. A densidade aparente média máxima foi obtida para as amostras modificadas com 3% do REVA (amostra CPA03), estas chegaram a obter uma densidade aparente média de aproximadamente 2,0 g/cm³.

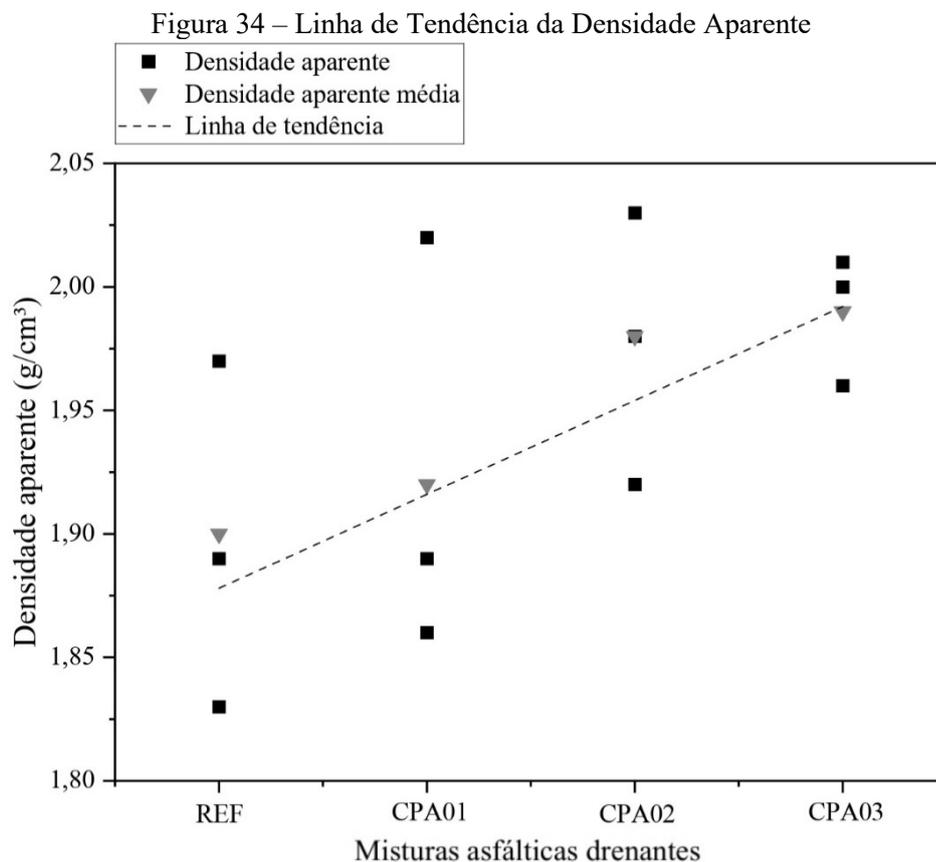
De maneira semelhante, a densidade máxima teórica para as amostras de referência REF foram de 2,4261. Já as amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03 variaram de 2,4273 – 2,4297, com o valor máximo para as amostras modificadas com um teor de 3% do REVA, conforme apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 – Resultados da Densidade Aparente e Densidade Máxima Teórica

Mistura	Densidade Aparente (g/cm ³)	Densidade Aparente Média (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)
REF	1,89	1,90	2,4261
	1,83		
	1,97		
CPA01	1,86	1,92	2,4273
	1,89		
	2,02		
CPA02	2,03	1,98	2,4285
	1,98		
	1,92		
CPA03	1,96	1,99	2,4297
	2,01		
	2,00		

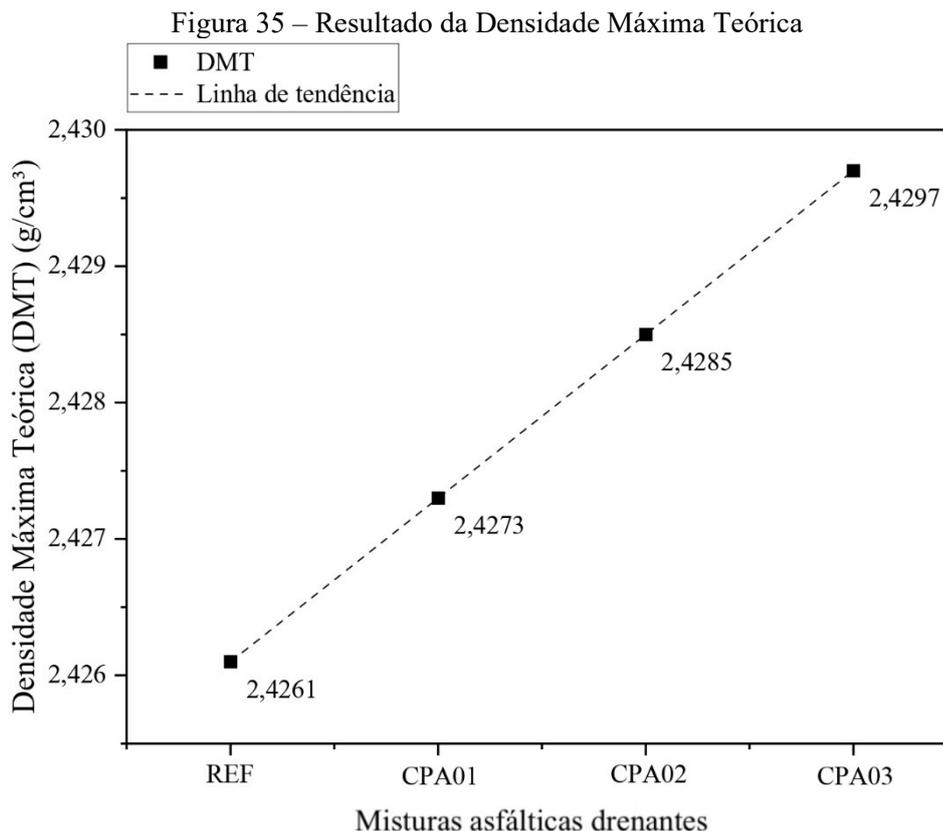
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Conforme apresentado pela Tabela 29, o comportamento da densidade aparente é crescente à medida em que aumenta-se o teor de modificação do REVA ao ligante asfáltico. A Figura 34 apresenta o resultado visualmente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Ao levar em conta as massas específicas de cada material e suas proporções correspondentes, sem considerar os espaços vazios na mistura, e visto que o ligante embora seja menos denso que os agregados, os valores de densidade teórica máxima mostraram um comportamento semelhante aos da densidade aparente, tendo em vista a variação da massa específica do asfalto modificado, ou seja, a densidade teórica máxima aumentou com o aumento do teor resíduo de EVA, conforme apresentado na Figura 35.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir dos resultados de densidade das misturas asfálticas drenantes produzidas pelo estudo, determinou-se os volumes de vazios das misturas, conforme programa experimental proposto.

O volume de vazios das amostras analisadas variou 18,10 – 21,82%. Os maiores índices de vazios foram obtidos para as amostras REF, sem modificação. Estas alcançaram percentuais de vazios de aproximadamente 24,60%. Já as amostras com menores índices de vazios foram as que estavam modificadas com o maior percentual do REVA – a amostra CPA03, com teor de 3% de modificação do REVA. Estas alcançaram índices de vazios abaixo dos 18%.

Já os resultados obtidos pelo estudo para os volumes de vazios comunicantes variaram de 11,52 – 10,20%. De modo semelhante ao comportamento do volume de vazios total das amostras, o maior índice de vazios comunicantes foi observado nas amostras REF, sem modificação. Estas alcançaram índices de aproximadamente 13,60%. Já os menores índices de vazios comunicantes foram obtidos para as amostras modificadas com 3% do teor do REVA (CPA03). Estas alcançaram limites próximos a 10%.

Na Tabela 30 são apresentados os resultados obtidos para os volumes de vazios obtidos pelo estudo.

Tabela 30 – Resultados dos Parâmetros Volumétricos

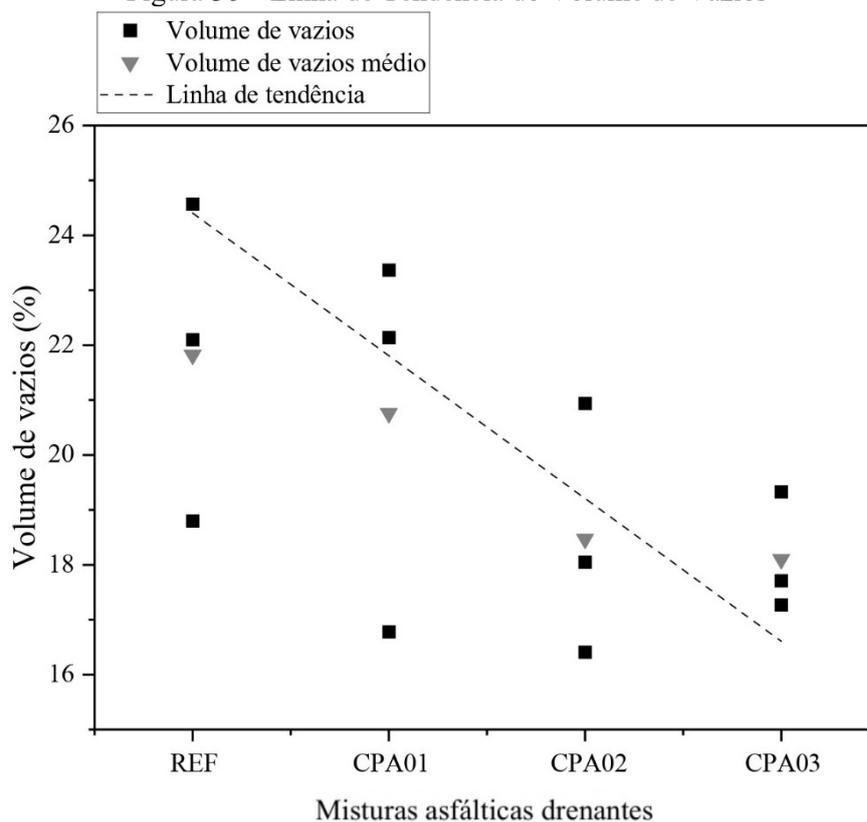
Mistura	Volume de vazios (%)	Volume de Vazios Médio (%)	Volume de vazios comunicantes (%)	Volume de Vazios Comunicantes Médio (%)
REF	22,10	21,82	11,37	11,52
	24,57		13,59	
	18,80		9,61	
CPA01	23,37	20,76	11,55	10,51
	22,14		9,84	
	16,78		10,12	
CPA02	16,41	18,47	10,14	10,23
	18,05		10,18	
	20,94		10,39	
CPA03	19,33	18,10	9,56	10,20
	17,27		11,93	
	17,71		9,11	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 30, pode-se perceber que houve uma diminuição do volume de vazios e, conseqüentemente, dos vazios comunicantes das amostras CPA01, CPA02 e CPA03 em relação a amostra de referência REF. A diminuição do volume de vazios total das amostras modificadas foi de aproximadamente 17,00% em relação a amostra de referência REF. De modo semelhante, a diminuição do percentual de vazios comunicantes das amostras modificadas foi de aproximadamente 11,45%.

A Figura 36 apresenta a tendência de diminuição do volume de vazios para as amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03 em comparação com a amostra de referência REF, sem modificação.

Figura 36 – Linha de Tendência do Volume de Vazios



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

As amostras com teores de asfalto de 4,0% modificadas pelo REVA em percentuais de 0,0%, 1,0%, 2,0% e 3,0% atendem ao critério da especificação DNER-ES 386/99, a qual misturas asfálticas do tipo CPA devam possuir um volume de vazios maior que 18% e estejam abaixo de 25%.

Os resultados obtidos por este estudo estão em conformidade com os dados obtidos pelo estudo de Martinez (2017). Semelhante aos resultados obtidos pelo autor, neste estudo percebe-se uma tendência de diminuição do volume de vazios e volume de vazios comunicantes em função do aumento de teor de resíduo para a modificação do ligante asfáltico utilizado nas misturas de estudo. Nesse contexto, a diminuição do volume de vazios na mistura CPA modificada com a mistura referência com o CAP 50/70 pode ser atribuído à adição da lâmina de asfalto modificado pelo elastômero, haja vista que o encapsulamento dos elastômeros tendem a aumentar a coesão do ligante, ajudando a manter os agregados juntos de maneira mais eficaz, sendo esse aumento mais significativo no caso da mistura CPA03, a qual possui o maior percentual de REVA na composição ligante-mistura (Gama, 2013).

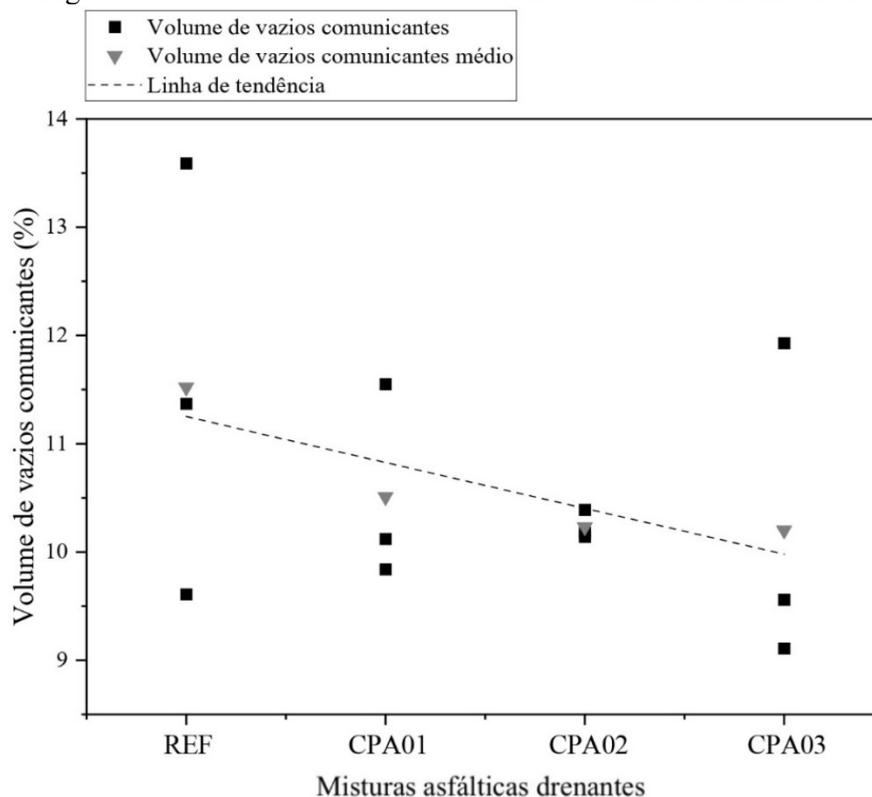
Embora todos os parâmetros normativos para as características volumétricas estejam de acordo com a normativa DNER-ES 386/99 e as misturas produzidas pelo estudo apresentaram valores de volumes de vazios e vazios comunicantes semelhantes entre si, a mistura de

referência REF foi a mistura que apresentou resultados mais próximos do limite estabelecido em norma no departamento de transportes do país. Entretanto, em países como o Japão, onde a utilização de pavimentos asfálticos drenantes já é uma realizada avançada, é exigido que as misturas drenantes possuam volumes de vazios variando entre 17% e 23%. Enquanto que na França, a legislação atual exige que a porcentagem mínima de volume de vazios seja de 20%, com o uso mais comum sendo de 25%. Nos Estados Unidos, as misturas asfálticas drenantes frequentemente empregadas apresentam volumes de vazios similares às especificações brasileiras, situando-se entre 18% a 25% (Rubio, 2006; Alvarez, Martin, Estakhri, 2011; Teixeira, 2015).

Nessa perspectiva, a quantificação do volume de vazios em misturas asfálticas não é considerada apenas uma característica de desempenho normativo, sendo diretamente relacionada com a funcionalidade hidráulica e mecânica das misturas, em especial das misturas asfálticas permeáveis do tipo CPA. Dessa forma, é um aspecto essencial para a durabilidade da mistura, ou seja, misturas com uma maior porcentagem de vazios geralmente apresentam menor durabilidade devido à sua reduzida resistência a cargas repetitivas e ao desgaste (Dresch, 2016).

Quanto aos vazios comunicantes, os resultados obtidos pelo estudo apresentaram uma característica semelhante aos resultados obtidos pelo volume total de vazios das amostras, foi perceptível uma diminuição do V_{vc} , conforme apresentado na Figura 37. Isso se deve ao fato da diminuição do volume total de vazios da mistura, o qual, conseqüentemente, possibilita também a diminuição dos vazios eficazes, conforme discutido por Schneider (2016).

Figura 37 – Linha de Tendência do Volume de Vazios Comunicantes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Nesse contexto, tendo em vista que o excesso de vazios comunicantes pode comprometer a integridade estrutural e diminuir a vida útil do pavimento é crucial encontrar um equilíbrio adequado entre a quantidade de vazios e a durabilidade para assegurar um bom desempenho do pavimento, a qual deve ser próximo de 10%, conforme os resultados obtidos pelo estudo e especificado pela normativa francesa AFNOR-NF-P-98-254-2 (1993).

Essas especificações são condicionadas para garantir que as misturas asfálticas permaneçam dentro das especificações durante as condições de uso, sendo necessário manter as porcentagens de vazios dentro de um intervalo específico durante o processo de projeto. Isso se deve ao fato de que, ao longo do tempo e devido ao impacto do tráfego, os agregados podem se compactar enquanto o asfalto pode migrar para a superfície da camada de rolamento. De acordo com Dresch (2016), isso leva a uma condição em que as rodovias se tornam derrapantes devido à formação da possível fina camada de asfalto no topo da superfície do concreto asfáltico. Além disso, pode ocasionar variações no volume do asfalto devido às mudanças de temperatura a depender do ligante asfáltico empregado.

Vale destacar que os resultados obtidos pelo estudo também estão em concordância com o resultados apresentados por Kolodziej (2016), os quais todos os corpos de prova ensaiados em seu estudo atenderam à especificação, com um volume vazios comunicantes superior a 10%.

4.3.2 Condutividade Hidráulica

Os resultados obtidos pelo estudo para a permeabilidade das amostras de referência REF apresentaram uma variação de 0,27 – 0,41 cm/s. Já as amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03 apresentaram permeabilidades variando de 0,16 – 0,37 cm/s, conforme apresentado na Tabela 31.

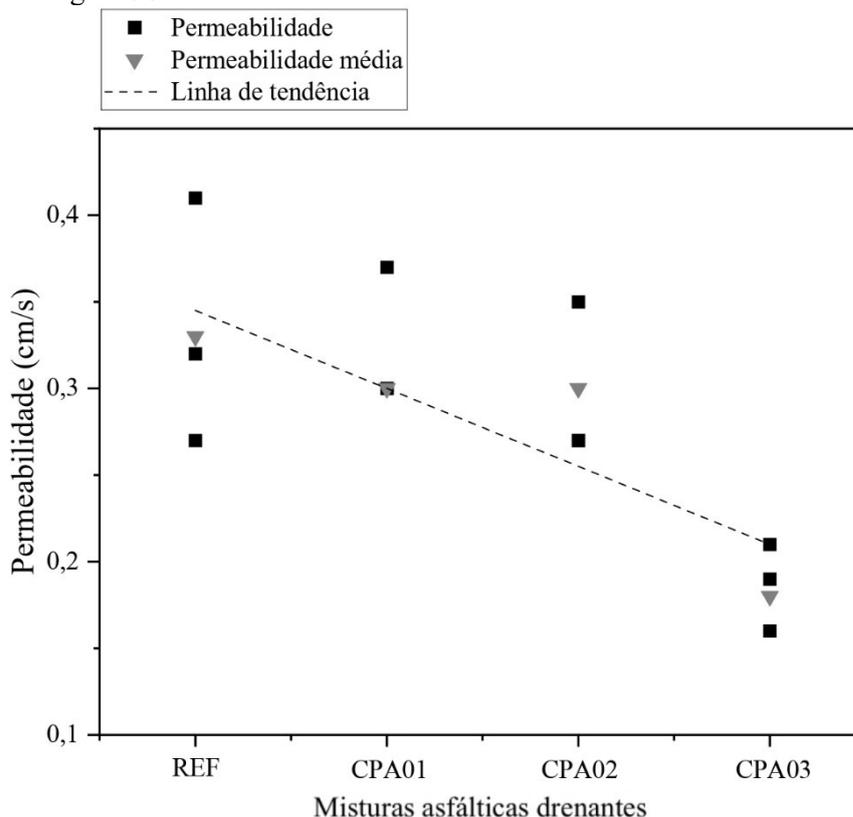
Tabela 31 – Resultados do Ensaio de Permeabilidade

Mistura	Permeabilidade (cm/s)	Permeabilidade Média (cm/s)
REF	0,41	0,33
	0,32	
	0,27	
CPA01	0,37	0,30
	0,30	
	0,22	
CPA02	0,35	0,30
	0,27	
	0,27	
CPA03	0,21	0,18
	0,19	
	0,16	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Conforme esperado, houve uma diminuição da permeabilidade para as amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03 em relação a amostra de referência REF, sem modificação, conforme apresentado na Figura 38. Vale destacar que essa diminuição da permeabilidade foi de aproximadamente 45,45%. Esse fato é consequência do percentual de vazios na mistura, ou seja, misturas com maior percentual de vazios tendem a possuir uma melhor condutividade hidráulica se comparadas com misturas com menores índices de vazios (Dresch, 2016).

Figura 38 – Linha de Tendência do Coeficiente de Permeabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Assim como os estudos de Schneider (2016) e Dresch (2016), o grau de permeabilidade para todas as misturas tipo CPA moldadas pelo estudo obtiveram uma classificação de condutividade hidráulica elevada, as quais apresentaram coeficientes de permeabilidade superior a 10^{-3} m/s, conforme classificação proposta por Lambe e Whitman (1974).

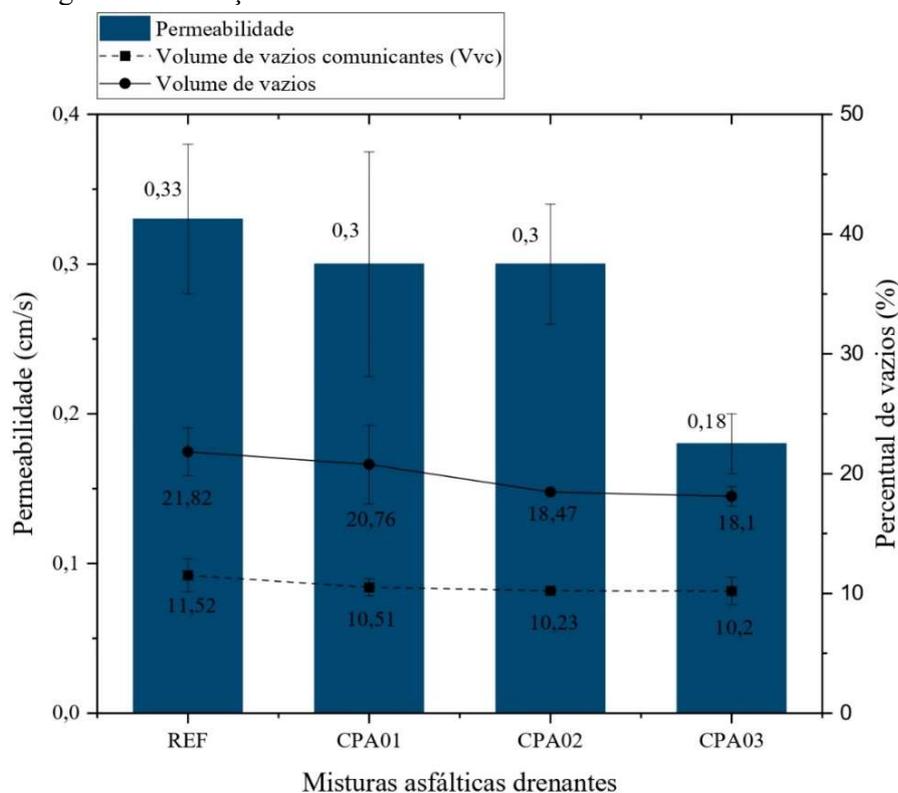
Embora as misturas moldadas pelo estudo apresentem valores semelhantes de coeficiente de condutividade hidráulica devido ao fato de terem valores semelhantes de porcentagem de vazios, a mistura que obteve os melhores resultados para permeabilidade foi a mistura sem modificação do resíduo copolimérico de EVA. De acordo com Martinez (2017), esse fato é justificável tendo em vista que os resíduos tendem a melhorar as propriedades adesivas da mistura tornando-a mais homogênea e facilitando o intertravamento agregado-ligante.

Contudo, conforme esperado, consegue-se perceber a eficiência das misturas asfálticas tipo CPA na drenabilidade da água superficial nos pavimentos devido ao seu alto volume de vazios.

4.3.2.1 Relação Entre a Permeabilidade e os Vazios na Mistura Asfáltica

Para as misturas asfálticas estudadas com ligantes asfálticos modificados com o REVA, como foi utilizado o mesmo CAP e mesmo agregado em todas elas, os principais fatores intervenientes na permeabilidade considerando-se as mesmas condições de ensaio, seriam as variações dos teores do resíduo nas misturas e as propriedades volumétricas. A Figura 39 apresenta a relação entre a permeabilidade e os volumes totais de vazios e vazios comunicantes das amostras REF, CPA01 CPA02 e CPA03 analisadas pelo estudo.

Figura 39 – Relação Entre a Permeabilidade e os Percentuais de Vazios



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Através do gráfico da Figura 39, no eixo Y à esquerda estão apresentados os valores percentuais médios para a permeabilidade das amostras analisadas pelo estudo. Enquanto no eixo Y à direita são apresentados os valores médios para os vazios totais e comunicantes das misturas asfálticas drenantes.

A amostra de referência REF obteve uma permeabilidade média de 0,33 cm/s e paralelamente percentuais de vazios totais e vazios comunicantes de 21,82% e 11,52%, respectivamente. Já as amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03 apresentaram valores menores que a amostra de referência REF, sem modificação. As amostras CPA01, CPA02 e

CPA03 apresentaram uma permeabilidade média de 0,30 cm/s, 0,30 cm/s e 0,18 cm/s, respectivamente. Paralelamente, as amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03 apresentaram índices totais de vazios e vazios comunicantes menores que a amostra de referência REF.

Nessa perspectiva, a Figura 39 descreve que quanto menor o volume de vazios na mistura, menor será a facilidade de percolação do escoamento pelo revestimento asfáltico permeável. Esse resultado também foi obtido nas pesquisas de Oliveira (2003), Martinez (2017) e Schneider (2019).

4.3.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral (RT) das amostras obtidas pelo estudo variaram de 1,10 – 1,28 MPa. A amostra de referência REF, sem modificação, apresentou uma variação de 1,07 – 1,16 MPa. Já as amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03 apresentaram uma variação superior as amostras REF, com uma variação 0,99 – 1,35 MPa, conforme pode-se observar na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados do Ensaio da RT

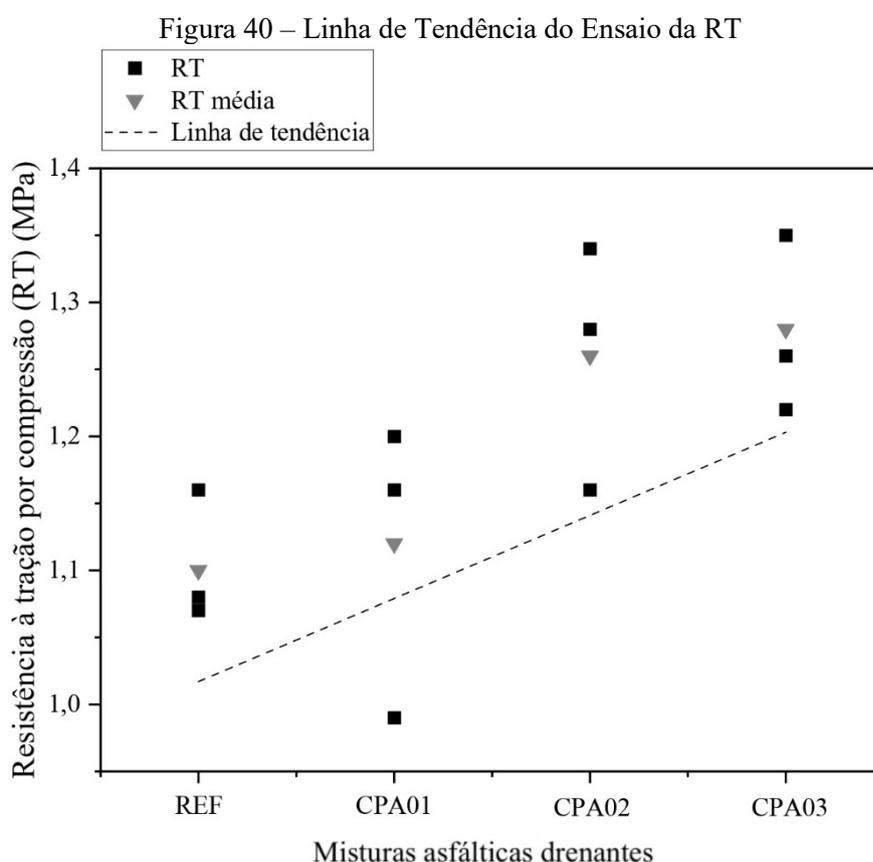
Mistura	RT (MPa)	RT Média (MPa)
REF	1,07	1,10
	1,08	
	1,16	
CPA01	0,99	1,12
	1,16	
	1,20	
CPA02	1,16	1,26
	1,28	
	1,34	
CPA03	1,22	1,28
	1,26	
	1,35	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir da Tabela 32, nota-se que as misturas de CPA02 e CPA03 apresentaram os melhores valores de RT para o teor de ligante de 4,0%, de 1,26 MPa e 1,28 MPa, respectivamente. Já as amostras da REF e CPA01, embora estando no limite permitido pela norma DNER-ES 386/99, apresentaram resultados mais baixos se comparados com as misturas

de CPA02 e CPA03. Em especial, a mistura sem nenhuma modificação (REF) apresentou a menor RT. Ambas apresentaram 1,10 MPa e 1,12 MPa, respectivamente.

Conforme esperado, nota-se que houve o aumento de aproximadamente 16,36% da resistência à tração por compressão diametral à medida em que houve o aumento do teor do resíduo do EVA nas amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03, em comparação com a amostra de referência REF, sem modificação. Essa tendência de diminuição da RT pode ser observada na Figura 40.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A norma DNER-ES 386/99 determina que misturas asfálticas drenantes devem apresentar uma RT mínima de 0,55 MPa. Nessa perspectiva, é possível verificar que todas as misturas asfálticas produzidas por este estudo atenderam a especificação normativa do DNER-ES 386/99 para produção de misturas asfálticas drenantes do tipo CPA, com RT igual ou superior a 0,55 MPa.

A partir dos resultados obtidos pelo estudo, nota-se que a resistência à tração é diretamente proporcional ao teor de ligante modificado e inversamente proporcional ao índice de vazios, ao analisar a resistência à tração em função do teor de ligante pelo volume de vazios,

verifica-se que as misturas tendem a seguir uma mesma tendência. Essa melhoria é devido as características elastoméricas do copolímero de EVA, que, ao ser incorporado na mistura, aumenta a flexibilidade e a coesão do ligante, resultando em uma estrutura mais resistente e durável (Martinez, 2017).

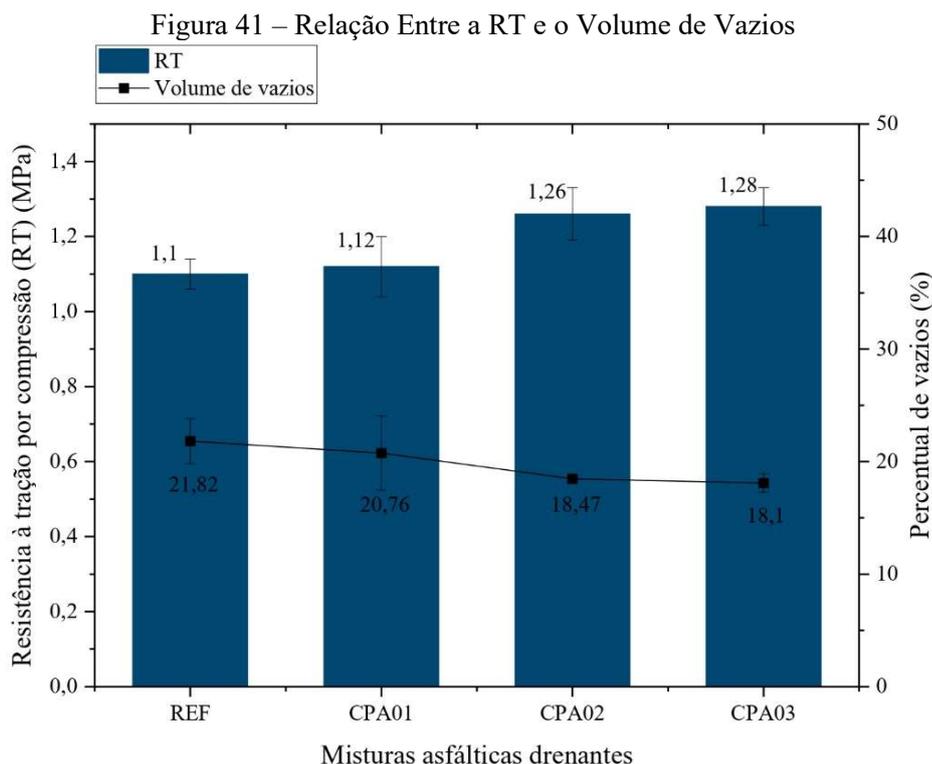
Tal fato pode ser explicado pela presença de uma porcentagem maior de volume de vazios nessa mistura, o que resulta numa diminuição da resistência à tração, conforme discutido por Schneider (2016).

Os resultados obtidos por esse estudo estão em concordância com a literatura vigente. Outras pesquisas acadêmicas também obtiveram resultados semelhantes aos resultados obtidos por esse estudo, como as pesquisas acadêmicas de Maia *et al.* (2019) e Schneider *et al.* (2019).

4.3.3.1 Relação Entre a Resistência à Tração e o Volume de Vazios

Para as misturas asfálticas estudadas com ligantes asfálticos modificados com o REVA, como foi utilizado o mesmo CAP e mesmo agregado em todas elas, os principais fatores intervenientes na resistência a tração considerando-se as mesmas condições de ensaio, seriam o teor do resíduo e o volume de vazios das misturas.

A Figura 41 apresenta a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o volume de vazios para cada mistura analisada pelo estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Conforme pode-se observar na Figura 41, no eixo Y à esquerda são apresentados os valores da resistência à compressão diametral média de cada amostra ensaiada. Paralelamente, no eixo Y à direita são apresentados os percentuais médios do volume de vazios de cada amostra ensaiada e o eixo X informa quais as amostras analisadas.

O resultado com maior valor para a resistência à tração por compressão diametral ocorreu para as misturas asfálticas com modificação do ligante asfáltico de 4% do teor do REVA, com uma RT de 1,28 MPa, por sua vez esta apresentou um volume de vazios de aproximadamente 18%. Analogamente, a menor RT foi para a mistura sem nenhuma modificação com o REVA, a qual obteve o maior índice de vazios, com um percentual de aproximadamente 21,90%.

Nessa perspectiva, a Figura 41, evidencia que houve um aumento da resistência à tração por compressão diametral à medida que o volume de vazios das misturas diminuiu. Esse comportamento linear já havia sido definido também por Balbo (2007) e Bernucci *et al.* (2022).

4.3.4 Desgaste Cantabro

Os resultados da perda de massa por abrasão das amostras REF, CAP01, CPA02 e CAP03 apresentaram variações médias de 0,83 – 0,16%. Os resultados obtidos pelo estudo

estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Resultados do Ensaio Cantabro

Mistura	Desgaste Cantabro (%)	Desgaste Cantabro Médio (%)
REF	0,35	0,25
	0,24	
	0,17	
CPA01	0,13	0,2
	0,41	
	0,073	
CPA02	1,12	0,83
	0,72	
	0,65	
CPA03	0,18	0,16
	0,22	
	0,08	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

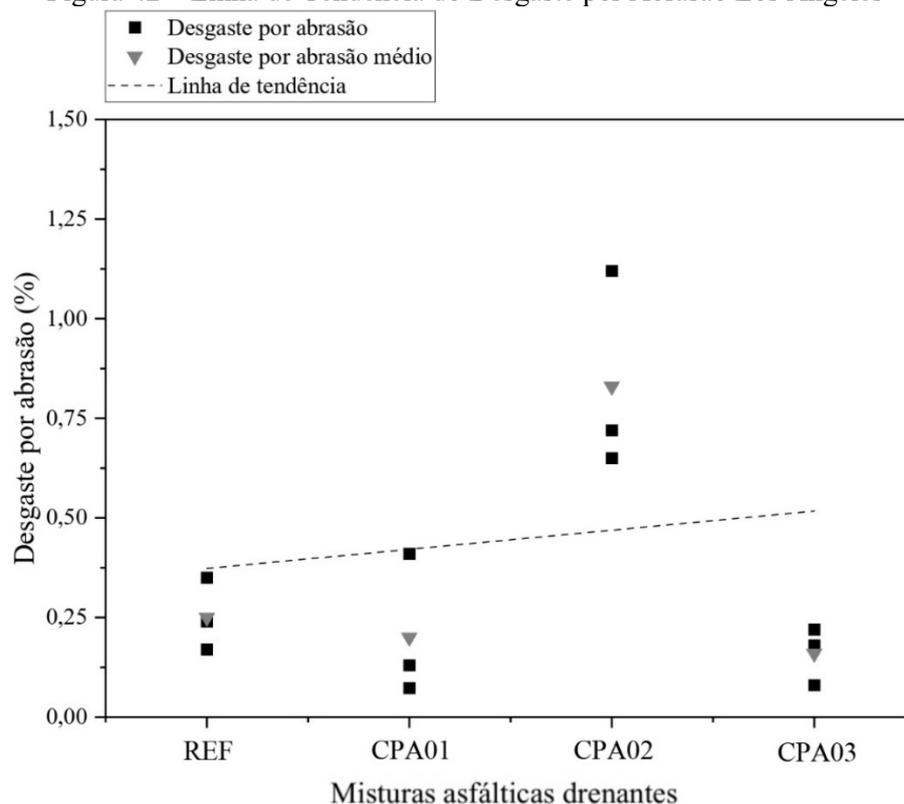
Conforme pode-se observar na Tabela 33, a amostra de referência REF, sem modificação, apresentou um percentual de desgaste variando de 0,17 – 0,35%. Analogamente, as amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03 apresentaram variações na perda de massa de 0,13 – 0,72%.

Para as misturas REF, CPA01 e CPA03, os resultados do ensaio de abrasão Cantabro mostraram comportamentos bastante semelhantes, com médias de desgaste próximas a 0,2%. Esses resultados indicam que essas misturas possuem uma alta resistência à desintegração superficial, tendo em vista que normativamente a tendência é que as misturas asfálticas drenantes apresentem no máximo 25% de perda de massa por abrasão.

Por outro lado, a mistura CPA02 apresentou um comportamento diferente. Embora a perda tenha sido decrescente ao longo dos ensaios, a média de desgaste foi significativamente maior, em torno de 0,8%. Isso sugere que a mistura CPA02 possui uma menor resistência à abrasão em comparação com as outras misturas estudadas.

A Figura 42 apresenta os resultados da perda de massa por abrasão com o aumento do teor de modificação do ligante asfáltico nas misturas.

Figura 42 – Linha de Tendência do Desgaste por Abrasão Los Angeles



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Analisando o contexto geral dos resultados obtidos pelo ensaio cantabro para as amostras REF, CPA01, CPA02 e CPA03, houve uma tendência de aumento da perda de massa por abrasão influenciado pela amostra CPA02, a qual obteve resultados superiores se comparados com a tendência dos resultados das amostras REF, CPA01 e CPA03.

Essa variação da perda de massa pela abrasão pode ser explicada pelas propriedades drenantes da mistura asfáltica permeável. De acordo com Dresch (2016), a perda de massa por abrasão das misturas asfálticas do tipo CPA pode ser justificada pela elevação do volume de vazios na mistura. Um maior volume de vazios significa que há menos material ligante e agregados para manter a coesão interna da mistura, resultando em uma estrutura menos densa e mais suscetível à desintegração. Com menos material para absorver e dissipar as forças de abrasão, as partículas dos agregados ficam mais expostas e vulneráveis ao desgaste. Consequentemente, a resistência da mistura à abrasão diminui, levando a uma maior perda de massa quando submetida a ensaios de abrasão como o cantabro (Kolodziej, 2016).

Entretanto, conforme pode ser observado na figura acima, as amostras modificadas CPA01 e CPA03 apresentam uma tendência de diminuição da perda de massa de aproximadamente 36,00% se comparadas com a amostra sem modificação REF.

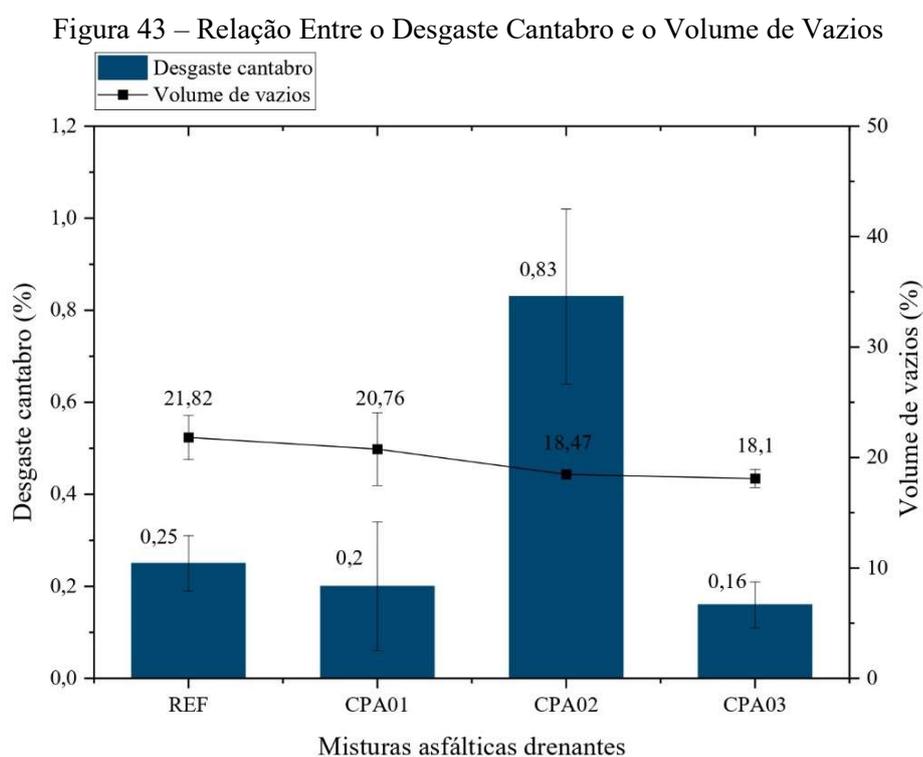
De modo geral, todas as amostras ensaiadas pelo estudo atenderam as especificações do departamento de transportes do Brasil, o qual especifica que para uma mistura asfáltica tipo CPA a perda de material por abrasão Los Angeles deve ser de no máximo 25% (DNER, 1999). Nessa perspectiva, todas as amostras do estudo atenderam a especificação, tendo em vista que apresentaram um desgaste inferior a 25%.

Os resultados obtidos por este estudo também estão em concordância com os resultados obtidos por Dresch (2016) e Martinez (2017).

4.3.4.1 Relação Entre o Desgaste Cantabro e o Volume de Vazios

Para o entendimento das alterações da adesividade na mistura asfáltica, por meio da perda de massa por abrasão, são apresentados os resultados de desgaste cantabro das misturas elaboradas com ligantes modificados com o REVA, em função do volume de vazios.

A Figura 43 apresenta a relação entre a perda de massa por abrasão e o volume de vazios para cada mistura analisada pelo estudo. No eixo Y à esquerda são apresentados os valores médios do desgaste cantabro das misturas. Já o eixo Y à direita está relacionado com os valores dos percentuais médios do volume de vazios das misturas de cada amostra ensaiada e o eixo X informa quais amostras foram estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Embora a mistura CPA02 tenha se desviado da linha de tendência, as misturas REF, CPA01 e CPA03 mostraram um padrão decrescente do volume de vazios paralelamente às perdas de massa por abrasão, evidenciando que o percentual de desgaste à abrasão é diretamente proporcional ao volume de vazios, conforme o estudo apresentado por Martinez (2017).

Em síntese, os resultados obtidos revelam um padrão entre o volume de vazios das misturas asfálticas tipo CPA e a perda de massa por abrasão. Observou-se que uma menor compactidade, refletida por um aumento no volume de vazios, está diretamente associada a uma maior perda de massa durante a abrasão. Esta relação evidencia a influência da compactação adequada das misturas asfálticas drenantes para a resistência ao desgaste em condições de tráfego real. Além disso, destaca a necessidade contínua de otimizar as técnicas de projeto e execução desses pavimentos, visando garantir sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa que abrangem a avaliação dos principais resultados do comportamento físico dos ligantes asfálticos modificados pelo REVA e o desempenho das misturas asfálticas do tipo CPA com o asfalto modificado, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

Nesse contexto, a partir das análises realizadas pelo estudo pode-se destacar as seguintes conclusões:

- Os percentuais de 1, 2 e 3% do teor do resíduo do EVA incorporado ao ligante asfáltico promoveram modificações ao CAP 50-70 no tocante as propriedades de consistência e segurança, entretanto, não foram modificações significativas, pois as modificações embora realizadas não alteraram a classe de classificação do CAP, sendo caracterizado como um CAP com consistência média, assim como o CAP sem modificação, tendo em vista os percentuais baixos de incorporação do REVA em relação ao peso em massa do ligante asfáltico, conforme previsto na literatura vigente;
- A inserção do resíduo polimérico ao CAP 50-70 causou modificações nas características físicas do material, resultando em uma maior viscosidade e valores maiores de penetração em certas proporções. As análises dos testes demonstraram que a quantidade de resíduo polimérico é o principal fator de influência. Na penetração, o aumento da consistência do material está para frações mais elevadas do material modificador, conforme discutido por Gama (2013). Em frações com variações superiores a 5% do material modificante, o comportamento do material modificado tende a se tornar mais viscoso e, conseqüentemente, aumentar a sua consistência. No estudo, percebeu-se o aumento da viscosidade em relação a amostra de referência REF de aproximadamente 13% para as amostras com 3% do teor do REVA;
- A densidade e a massa específica do CAP 50-70 modificado em percentuais de 1, 2 e 3% sofreram pequenas variações, com aproximadamente 0,5% em relação a amostra de referência REF, porém essas variações não foram significativas a modo que teve pequena influência na densidade máxima teórica dos corpos de prova;
- O ponto de fulgor e o ensaio de espuma atenderam as normativas de transportes vigentes. Entretanto, vale destacar que o ponto de fulgor reduziu aproximadamente 5% em relação a amostra de referência REF, sendo o valor mais baixo registrado na amostra modificada com 3% do REVA. Essa diminuição sugere a presença de componentes

voláteis originados do material polimérico residual, uma vez que esse polímero não é puro. No entanto, apesar dessa redução não ser positiva, não irá comprometer a utilização desse asfalto modificado, pois, para aplicação em campo, a temperatura de aquecimento não ultrapassa os 135°C;

- Através da análise do ensaio de ponto de amolecimento, não foram observadas alterações significativas no ponto de amolecimento do asfalto modificado. De forma geral, constatou-se uma variação de 1°C entre os pontos de amolecimento da mistura pura para as misturas modificadas. Devido à necessidade de avaliação dentro de um intervalo de temperatura, essa variação não é considerada significativa, de acordo com os resultados obtidos no índice de susceptibilidade térmica do ligante;
- O IST, em todos os cálculos realizados, mostrou valores que se enquadram nas especificações estabelecidas ($-1,5 < \text{IST} < +0,7$). Os extremos do IST variaram de -1,02 a -0,31. Portanto, o asfalto analisado é apropriado para uso em pavimentação, demonstrando uma sensibilidade térmica intermediária, não amolecendo rapidamente com o aumento da temperatura e nem sendo muito quebradiço em baixas temperaturas;
- Quanto ao índice de vazios, todas as misturas com o ligante asfáltico modificado mostraram menos vazios do que a mistura de referência, as quais todas atenderam a normativa para misturas tipo CPA. As amostras CPA III e CPA IV se destacaram com os menores volumes de vazios, 18,47% e 18,10%, respectivamente, sem afetar a permeabilidade das misturas;
- A condutividade hidráulica das misturas teve um decréscimo influenciado pela diminuição dos vazios na mistura. Ou seja, o ligante modificado nas misturas tornou-as mais consistentes e com menores vazios, estes por sua vez diminuíram a permeabilidade das mesmas sem afetar a eficiência do escoamento, conforme classificação proposta por Lambe e Whitman (1974);
- Quanto à resistência à tração por compressão diametral e ao desgaste cantabro todas as amostras obtiveram resultados superiores ao limite estabelecido pela norma DNER-ES 386/99. Nesse contexto, a adição de resíduos copoliméricos de EVA ao CAP 50/70 e posteriormente nas misturas asfálticas CPA resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas e de adesividade das amostras modificadas CPA01, CPA02 e CPA03, as quais apresentaram o aumento de 16,36% e 30,00%, respectivamente, em relação a amostra de referência REF.

Com base nas análises e reflexões realizadas, é possível inferir que a aplicação do resíduo do Etileno Acetato de Vinila proveniente da indústria de calçados em revestimentos asfálticos do tipo CPA conforme sugerido é viável. Essa prática possibilita a destinação adequada dos resíduos, além de aprimorar as características volumétricas, funcionais, mecânicas e de adesão das misturas asfálticas executadas com esse material.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para dar continuidade ao estudo, apresentam-se a seguir algumas sugestões para futuras pesquisas:

- Analisar as propriedades físicas, reológicas e envelhecimento do ligante asfáltico em combinação entre variadas tipologias de asfalto e o resíduo de EVA;
- Estudar mais teores de resíduo de EVA para melhor caracterização dentro das faixas aceitáveis pelo DNIT;
- Analisar a combinação de microscopicamente e tomograficamente a determinação da separação de fases nos ligantes modificados com o REVA oriundos de diferentes indústrias;
- Realizar análise comparativa entre as metodologias de incorporação do resíduo;
- Estudar variadas faixas granulométricas e teores de projeto do asfalto modificado a fim de analisar a influência desses resíduos de forma mais assertiva;
- Estudar a vida de fadiga e análise mecanicista de misturas asfálticas modificadas pelo resíduo de EVA;
- Verificar a viabilidade de execução e implementação de testes práticos em dimensões amplas e moderadas de projetos de pavimentação com revestimento asfáltico tipo CPA com asfalto modificado pelo copolímero de EVA, objetivando entender as propriedades mecânicas e operacionais em situações reais para durabilidade e ciclo de vida do material.

REFERÊNCIAS

- ABICALÇADOS. **Relatório Anual 2016**. Abicalçados: Novo Hamburgo, 2017. Disponível em: <https://www.abicalcados.com.br/midia/relatorios/relatorio-setorial-2016.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. 2014. Disponível em <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/12571/Relatorios_de_Pesquisa__RDT.html>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- AHMED, A. W. *et al.* *Pavement performance follow-up and evaluation of polymer-modified test sections*. *International Journal of Pavement Engineering*, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 1474-1487, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1435878>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2018.1435878>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- ALECRIM, C. M. C.; BRANCO, V. T. F. C. Avaliação da incorporação de asfalto reciclado em camada porosa de atrito. *In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 33., 2019, Balneário de Camboriú. Anais [...]*. Rio de Janeiro: ANPET, 2019. P. 1837-1840. Disponível: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Materiais%20e%20Tecnologias%20Ambientais%20II/1_487_RT.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.
- ALECRIM, C. M. C.; MAIA, R. S.; BRANCO, V. T. F. C. AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA EM CAMADA POROSA DE ATRITO. *In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 33., 2019, Balneário de Camboriú. Anais [...]*. Rio de Janeiro: ANPET, 2019. p. 1-12. Disponível: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019_v1_old/Infraestrutura/Materiais%20e%20Tecnologias%20Ambientais%20II/3_770_AC.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.
- ALENCAR, A. E. V. **Estudo das propriedades do cimento asfáltico de petróleo modificado por copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Química) - Departamento de Química Orgânica e Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.
- ALENCAR, A. E. V. *et al.* Estudo comparativo sobre o efeito do envelhecimento nas propriedades de ligantes asfálticos modificados por EVA, elvaloy e SBS. *In: 20º Encontro de Asfalto, 20., 2010, Rio de Janeiro. Anais [...]*. Rio de Janeiro: IBP, 2010.
- ALTOÉ, S. P. S.; SALES, A.; MARTINS, C. H. Resíduos de pneus e da queima do bagaço da cana-de-açúcar na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (*pavers*). **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 608-637, 2019. Disponível em: <https://www.revistas.ibracon.org.br/index.php/riem/article/view/1188>. Acesso em: 13 de jul. 2024.
- ALVAREZ, A. E.; MARTIN, A. E.; ESTAKHRI, C. *A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures*. *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 1159-1166, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.038>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181000471X>. Acesso em: 03 jul. 2024.

ALVES, A. *et al.* Estudo acústico de tráfego rodoviário rodante sobre pavimentos em concreto asfáltico e com camada porosa de atrito na rodovia BR 158/RS. **Transportes**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 47–62, 2018. DOI: 10.14295/transportes.v26i4.1410. Disponível em: <https://anpet.emnuvens.com.br/anpet/article/view/1410>. Acesso em: 8 jun. 2024.

ANJOS, L. Z. dos. **Reciclagem de materiais poliméricos para pavimentação**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2019.

APS, M. L.; BERNUCCI, L. B. Mitigação do ruído proveniente do tráfego de rodovias por meio da implantação do revestimento asfáltico do tipo camada porosa de atrito-CPA: Caso Brasileiro. *In*: Ana Elena Salvi; Cesar Bargo Perez. (Org.). **Arquitetura: Ambiente e sustentabilidade**. Santos: Universitária Leopoldianun, 2016. p. 135-149.

ARAO, M. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a inserção de Polietileno Tereftalato (PET) Triturado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ARNDT, J. A.; SOUZA, J. de; BIANCHINI, M. Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto. *In*: Congresso Brasileiro de Concreto, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: IBRACON, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS E EFLUENTES. **Política Nacional de Resíduos Sólidos: a visão do setor de tratamento de resíduos**. São Paulo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7208: Materiais betuminosos para emprego na pavimentação**. Rio de Janeiro, 1990.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12891: Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall**. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14950: Materiais betuminosos- Determinação da viscosidade Saybolt Furol**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-254-2: Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, partie 2.** Paris, 1993.

BACARINI, A. **Aproveitamento de resíduos de EPS e EVA como agregados em concreto leve.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BARROS, K. S. **Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da RMF para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. A Política Nacional de Resíduos Sólidos altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 147, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 25 abr. 2024.

BRASKEM. **Copolímero de Etileno Acetato de Vinila HM728.** São Paulo, 2010.

BRILHANTE, A. K. V. C. **Transição para Cidade-Esponja: Desafios e Oportunidades para a Cidade de João Pessoa-PB.** 2020. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

BRINGEL, R. M. *et al.* *Thermo-Rheological Behavior of Modified Bitumens Adding Virgin and Waste Polymers.* In: *4th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 2008, Copenhagen, Dinamarca. **Anais [...].** Dinamarca: *Asphalt Roads for Life*, 2008.

BRITO, G. Q.; CASAGRANDE, M. D. T. Desempenho de Mistura Asfáltica do Tipo Areia-Asfalto a Quente (AAQ) com Inserção de PET (Polietileno Tereftalato) Micronizado. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 20., Campinas, 2020. **Anais [...].** São Paulo: ABMS, 2020. p. 127-134.

CAMPOS, O. de S. **Análise do comportamento de trecho piloto de revestimento poroso com asfalto modificado por polímero.** 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CANABRAVA NETO, E. G. *et al.* Telhado verde: alternativa sustentável para a drenagem do escoamento superficial. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 125–136, 2021. DOI: 10.29183/2447-3073.MIX2021.v7.n2.125-136. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4338>. Acesso em: 27 jun. 2024.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CARMO, J. B. do; SOARES, L. C.; ZANETTE, F. C. Análise comparativa de desempenho do pavimento permeável e asfáltico quando aplicado em um estacionamento residencial de Belo Horizonte. **Paramétrica**, [S. l.], v. 13, n. 14, p. 2–15, 2021. Disponível em: <https://www.periodicos.famig.edu.br/index.php/parametrica/article/view/262>. Acesso em: 5 jul. 2023.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B. de. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

CHAI, C. *et al.* *Mechanical Properties of Crumb Rubber and Basalt Fiber Composite Modified Porous Asphalt Concrete with Steel Slag as Aggregate*. **Polymers**, [S. l.], v. 12, n. 11, p. 1-16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12112552>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/11/2552>. Acesso em: 12 jul. 2024.

CLARA, E. *et al.* *Influence of polymeric molecular chain structure on the rheological-mechanical behavior of asphalt binders and porous asphalt mixes*. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 369, n. 1, p. 1-13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130575>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823002866?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jun. 2024.

CONTREIRAS, P. A. R. A Quarta Revolução Industrial: Um estudo de caso realizado na empresa Lix de Tecnologia. **Revista Gestão, Inovação e Negócios**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 79-97, 2015. Disponível em: <https://revistas2.unievangelica.edu.br/index.php/administracao/article/view/1307>. Acesso em: 07 jun. 2024.

COSTA FILHO, F. C. **Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de Scheelita na composição de concretos asfálticos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. 2011. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

DANTAS, T. N. C. *et al.* Utilização de resíduo industrial polimérico na obtenção de asfalto modificado. *In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo, Gás e Biocombustíveis*, 4., 2007, Campinas. **Anais [...]**. Natal: ABPG, 2007. p. 1-7.

D'ANTONA, D. M.; FROTA, C. A. Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado pelo polímero EVA para pavimentos urbanos de Manaus - AM. **Polímeros**, São Carlos, v. 21, n. 1, p. 13-18, jan./ mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000007>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/NdWNFBxmy7qHCskT97ZbBq/>. Acesso em: 07 jun. 2024.

DAVOODI, A. *et al.* *Influence of nano-silica modified rubber mortar and EVA modified porous asphalt on the performance improvement of modified semi-flexible pavement.* **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 337, n. 1, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127573>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822012491?via%3Dihub>. Acesso em: 13 jul. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 035/98**: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 043/95**: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 054/97**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 078/94**: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 148/94**: Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e combustão (Vaso Aberto Cleveland). Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 193/96**: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 194/98**: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 383/99**: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ES 386/99**: Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 005/2006 – TER**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 031/2006 – ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 095/2006 – EM**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 155/2010 – ME:** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 412/2019 – ME:** Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. Brasília, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 413/2021 – ME:** Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Brasília, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 425/2020 – ME:** Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio. Brasília, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 428/2020 – ME:** Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio. Brasília, 2020.

DOMINGOS, M. D. I. *et al.* Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 15-22, mai./ago. 2012. DOI: <https://doi.org/10.4237/transportes.v20i2.560>. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/560>. Acesso em: 01 jul. 2024.

DORNELES, F. F. **Viabilidade técnica da produção de ligante modificado com borracha de pneus inservíveis pelo processo úmido (*wet process*) através do sistema não estocável (*continuous blending*), para concreto asfáltico.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

DRESCH, F. **Comportamento de misturas asfálticas tipo Camada Porosa de Atrito (CPA).** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

DUMKE, M. P. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

EIRAS, D. H. M. *et al.* A importância da composição da massa asfáltica para um bom desempenho. **Revista Teccen**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 65-72, jul./dez. 2018. Disponível em: <https://www.sumarios.org/artigo/import%C3%A2ncia-da-composi%C3%A7%C3%A3o-da-massa-asf%C3%A1ltica-para-um-bom-desempenho>. Acesso em: 27 jun. 2024.

ESCOBAR, V. C. **Comparação de desempenho de mistura SMA efetuada com asfalto modificado por borracha utilizando agregados do município de Alegrete e concreto asfáltico**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN - EN 12697-19**: Bituminous mixtures - Test methods - Part 19: Permeability of specimen. Comitê de Organização Online, 2020.

FOGEIRO, J. S. **Cidade Esponja – Aplicação do Conceito e Métodos no Bairro Marechal Gomes da Costa, Porto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura Paisagista) - Universidade do Porto, Porto, 2019.

FURTADO, D. B. **Projeto de dosagem e dimensionamento de um pavimento asfáltico poroso para uma área de estacionamento**. 2017. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

GAMA, D. A. **Avaliação do potencial do uso do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

GAO, M. *et al.* *Effects of freeze–thaw cycles on micro and meso-structural characteristics and mechanical properties of porous asphalt mixtures*. **Reviews on Advanced Materials Science**, [S. l.], v. 62, n. 1, p. 1-17, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1515/rams-2023-0116>. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/rams-2023-0116/html>. Acesso em: 13 jul. 2024.

GARCIA, E. S. H. *et al.* Análise do desempenho de misturas asfálticas drenantes utilizando ligantes asfálticos modificados. *In*: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ANPET, 2019. p. 1-10. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asf%C3%A1lticas%20I/4_297_AC.pdf. Acesso em: 05 abr. 2024.

GONÇALVES, L. S. M.; TEIXEIRA, B. A. do N. Eventos de Chuva Característicos: metodologia adaptada e aplicada a poços de infiltração na cidade de São Carlos–SP. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v18e24>. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/611/83>. Acesso em: 20 jun. 2024.

GOUVEIA, L. T. *et al.* Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade. *In*: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 18., 2004, Florianópolis. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ANPET, 2004. p. 138-149.

GOUVEIA, M. A. de O. **Asfalto drenante: proporções granulométricas e aplicabilidade**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação de Engenharia Civil) – Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2019.

HAMMES, G. **Estudo do desempenho mecânico de uma mistura asfáltica drenante produzida com ligante altamente modificado**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

HAMMES, G.; THIVES, L. P. *Porous Asphalt Mixture with Improved Fatigue Resistance and Stormwater Pollutant Reduction in Urban Road Pavement*. **Water**, [S. l.], v. 15, n. 16, p. 1-21, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15162962>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/16/2962>. Acesso em: 09 jun. 2024.

HARAGUCHI, M. T. *et al.* Indicadores físicos da qualidade do solo em bacias de retenção em latossolo vermelho distrófico. **Revista Uniaraguaia**, Goiânia, v. 18, n. 3, p. 84-98, set./dez. 2023. Disponível em: <https://sipe.uniaraguaia.edu.br/index.php/REVISTAUNIARAGUAIA/article/view/1348>. Acesso em: 17 jun. 2024.

HASSAN, A.N. *et al.* *A Review of Crumb Rubber Modification in Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures*. **Jurnal Teknologi**, [S. l.], v. 70, n. 4, p. 127–134, 2014. DOI: <https://doi.org/10.11113/jt.v70.3501>. Disponível em: <https://journals.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/3501>. Acesso em: 13 jul. 2024.

HENKES, J. A. Tragédia climática e ambiental: mais de 90% dos municípios e das indústrias do Rio Grande Do Sul foram duramente impactadas com os recentes eventos climáticos. **Revista Brasileira de Meio Ambiente e Sustentabilidade**, Florianópolis, v. 4, n. 2, p. 1-4, abr/mai. 2024. Disponível em: <https://rbmaes.emnuvens.com.br/revista/article/view/406/332>. Acesso em: 02 jul. 2024.

HOMEM, T. da R. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HONG, Z. *et al.* *Laboratory performance evaluation of waste tire rubber (WTR) and ethylene-vinyl acetate (EVA) - modified asphalt mixtures*. **International Journal of Pavement Engineering**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 1-12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2224914>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2023.2224914>. Acesso em: 11 jun. 2024.

HUANG, Z. *et al.* *Investigation of Viscoelastic Properties of Polymer-Modified Asphalt at Low Temperature Based on Gray Relational Analysis*. **Sustainability**, [S. l.], v. 15, n. 8, p. 1-14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15086858>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6858>. Acesso em: 12 jul. 2023.

HU, M. *et al.* *Laboratory Investigation of the Adhesion and Self-Healing Properties of High-Viscosity Modified Asphalt Binders*. **Transportation Research Record**, [S. l.], v. 2674, n. 1, p. 307-318, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198120902990>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198120902990>. Acesso em: 14 jul. 2024.

INSTITUTO DE ASFALTO. **Manual do asfalto**. Série do Manual N° 4 (MS-4), 1989.

JACQUES, G. E. **Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Construção e Infraestrutura) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

JIANG, W. *et al.* *Development of porous asphalt mixture based on the synthesis of PTEMG and MDI polyurethane asphalt*. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 411, n. 1, p. 1-13, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134537>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823042563?via%3Dihub>. Acesso em: 11 maio. 2024.

JING, H. *et al.* *Investigation on the permeability of porous asphalt concrete based on microstructure analysis*. **International Journal of Pavement Engineering**, [S. l.], v. 21, n. 13, p. 1683-1693, jun./dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1563785>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2018.1563785>. Acesso em: 29 jun. 2024.

JING, R. *et al.* *Effect of mineral fillers on epoxy-modified open-graded porous asphalt durability*. **International Journal of Pavement Engineering**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 1-10, jan./jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268799>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2023.2268799>. Acesso em: 15 jun. 2024.

KALANTAR, Z, N.; KARIM, M. R.; MAHREZ, A. *A review of using waste and virgin polymer in pavement*. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 33, n. 1, p. 55-62, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812000323>. Acesso em: 28 jun. 2024.

KOŁODZIEJ, V. M. **Estudo das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas de revestimentos asfálticos porosos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Mecânica de suelos**. México: Editorial Limusa S.A, 1974.

LESUEUR, D., PETIT, J., RITTER, H-J. *The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state of the arte review*. **Road Materials and Pavement Design**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 1-16. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.743669>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2012.743669>. Acesso em: 17 abr. 2024.

LIMA, C. K. M. de. **Estudo da Incorporação de Resíduo Industrial Polimérico ao CAP**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LIMA, H. A. A. de; TEIXEIRA, B. R. dos R.; AIRES, R. M. da S. *Misturas asfálticas quentes modificadas por adição de borracha de pneu*. **Revista da FAESF**, [S. l.], v. 6, n. 1. p. 44-68,

jan./mar. 2022. Disponível em: <https://faesfpi.com.br/revista/index.php/faesf/article/view/152>. Acesso em: 22 jun. 2024.

MACEDO, J. T. **Avaliação do desempenho térmico de forros produzidos com adição de resíduo EVA**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

MAIA, R. S. *et al.* Utilização de revestimentos drenantes do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) e de Asfalto Modificado por Polímero (AMP) como soluções para o meio urbano em Fortaleza - CE. *In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 33.*, 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ANPET, 2019. p. 1-8.

MARTINEZ, J. G. B. **Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MARTINS, E. V. E. **Avaliação do uso de areia britada produzida pela cominuição de rochas granulíticas, visando utilização em filtros de obras de terra**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade da Bahia, Salvador, 2012.

MENEZES, L. A. A. *et al.* Cidades esponjas e suas técnicas compensatórias: uma revisão sistemática de literatura. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 10, p. e119111032606, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32606>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/32606>. Acesso em: 23 jul. 2023.

MORAES, G. C. de. **Uma análise descritiva histórica dos materiais utilizados na pavimentação: a história da pavimentação no município de Porto Velho/Rondônia no período de 1978 a 2014**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

MOREIRA FILHO, L. A.; SANCHES, A. E.; PINHEIRO, É. C. N. M. Pavimentação em estradas um estudo de caso no ramal Francisca Mendes no município de Rio Preto da Eva. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 11, p. 74265–74280, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n11-235. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/54062>. Acesso em: 26 jun. 2024.

NEGRÃO, D. P. **Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NUNES, F. A. **Aplicação de asfalto modificado com polímeros**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário do Cerrado Patrocínio, Patrocínio, 2018.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

OLIVEIRA, A. K. C. de. **Caracterização de concreto permeável para utilização em pavimentação de calçadas na cidade de Campina Grande-PB**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

OLIVEIRA, C. G. M. **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **TRANSPORTES**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 90–101, 2017. DOI: 10.14295/transportes.v25i3.1314. Disponível em: <https://anpet.emnuvens.com.br/anpet/article/view/1314>. Acesso em: 9 maio. 2024.

PANDA, M.; MAZUMDAR, M. *Engineering Properties of EVA-Modified Bitumen Binder for Paving Mixes*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 131-137, mar./mai. 1999. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:2(131)). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%281999%2911%3A2%28131%29>. Acesso em: 05 jul. 2024.

PELLIZZARI, V. **Avaliação da eficácia na restauração da capacidade de infiltração da camada superior de pavimentos porosos**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PEREIRA, A. G.; SILVA, R. L. da; VIEIRA, C. da S. *Modified asphalt binders: A bibliographic analysis*. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. e35710414321, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.14321. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14321>. Acesso em: 8 jul. 2024.

PEREIRA, M. H. N. **Análise comparativa do comportamento mecânico de concreto asfáltico usando ligante modificado por via seca e por via úmida com mistura de resíduo industrial: borracha de recauchutagem de pneus e borra oleosa de petróleo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

PIRES, L. G. O. **Estudo de dosagem de ligante para Camada Porosa de Atrito com o intuito de reduzir o fenômeno da hidroplanagem**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2019.

POLACCO, G. *et al. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers*. **European Polymer Journal**, [S. l.], v. 41, n. 12, p. 2831-2844, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014305705002491>. Acesso em: 17 abr. 2024.

POURANIAN, M. R.; IMANINASAB, R.; SHISHEHBOR, M. *The effect of temperature and stress level on the rutting performance of modified stone matrix asphalt*. **Road Materials and Pavement Design**, [S. l.], v. 21, n. 5, p. 1386–1398, set./out. 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1546221>. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2018.1546221>. Acesso em: 11 jul. 2024.

PUNITH, V. S. *et al.* *Laboratory investigation of open-graded friction-course mixtures containing polymers and cellulose fibers.* **Journal of Transportation Engineering**, [S. l.], v. 138, n. 1, p. 67–74, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000304](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000304). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000304>.

PUTMAN, B. J. **Evaluation of open-graded friction courses: construction, maintenance, and performance.** 2012. Report N°. FHWA-SC-12-04 - *Clemson University*, Clemson, 2012.

QUAN, E.; XU, H.; SUN, Z. *Composition Optimization and Damping Performance Evaluation of Porous Asphalt Mixture Containing Recycled Crumb Rubber.* **Sustainability**, [S. l.], v. 14, n. 5, p. 1-20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14052696>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/5/2696>. Acesso em: 12 jun. 2024.

QUEIROZ, M. Q. L. *et al.* Análise do uso da trincheira de infiltração como técnica compensatória de drenagem em Feira de Santana. **Sitientibus**, [S. l.], v. 1, n. 64, p. 1-9, 2024. DOI: 10.13102/sitientibus.v1i64.10446. Disponível em: <https://periodicos.uefs.br/index.php/sitientibus/article/view/10446>. Acesso em: 28 jun. 2024.

QUINTANA, H. A. R.; COTTE, E. H. S.; TABARES, J. O. C. *Resistencia bajo carga monotónica de mezclas de concreto asfáltico modificadas con gilsonita por vía seca.* **Tecnura**, Bogotá, v. 18, n. 1, p. 31-37, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.SE1.a02>. Disponível em: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/issue/view/640>.

RAMOS, S. R.; RAMOS, L. L. A.; LYRA, A. P. R. Espaço público e vitalidade: parque linear como instrumento de reconciliação em área residual da infraestrutura viária. **Arq. Urb**, [S. l.], v. 1, n. 24, p. 126–145, 2019. DOI: 10.37916/arq.urb.vi24.62. Disponível em: <https://www.revistaarqurb.com.br/arqurb/article/view/62>. Acesso em: 28 jun. 2024.

REIS, A. C. dos. **Reflexo do processo de urbanização na cidade de Parauapebas:** do breve contexto mundial à sua formação. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

REIS, F. B. dos; FERNANDES, P. R. B. A reutilização de resíduos sólidos na economia circular: estudo de caso no mercado de calçadista. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 5, p. 48456-48470, may. 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-311>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/29772/23490>. Acesso em: 01 jul. 2024.

RIBEIRO, R. M. G. **Gestão de resíduos de EVA de uma empresa produtora de componentes para calçado.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade do Porto, Porto, 2019.

RIOS, F. R. de A.; BARBOSA SOBRINHO, A. A.; MORAIS, C. S. R. Análise térmica de asfalto do petróleo, modificado com resíduos poliméricos. **Revista Eletrônica de Petróleo e**

SANTOS, F. P. Adição da fibra do bagaço da cana-de-açúcar em concreto asfáltico: análise comparativa. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 8, n. 2, p. 1-10, jul./dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2021.v8i2.3680>.

SAOULA, S. *et al.* Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste. **Physics Procedia**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 1319-1326, set./dez. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2009.11.098>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389209001813?via%3Dihub>. Acesso em: 29 mai. 2024.

SCHNEIDER, D. **Determinação do teor de asfalto para enquadramento de uma mistura asfáltica aberta como Camada Porosa de Atrito**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2016.

SCHNEIDER, D. *et al.* Comportamento hidráulico e mecânico de uma mistura asfáltica aberta enquadrada como Camada Porosa de Atrito. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 33., 2019. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ANPET, 2019. p. 1-12. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019_v1_old/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asf%C3%A1lticas%20II/1_301_AC.pdf. Acesso em: 22 maio. 2024.

SCOTTON, J. A.; MIRON, L. I. G.; LERSCH, I. M. Assistência técnica em habitação de interesse social para promoção do habitat saudável. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 16, n. 4, p. 85–100, out./dez. 2021. DOI: 10.11606/gtp.v16i4.178679. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/178679>. Acesso em: 26 jun. 2024.

SILVA, D. da; SILVA, R. K. I. da; MOLIN, E. D. Intervenções em riscos e desastres: o papel da psicologia no acolhimento das demandas emocionais da população que sofre com as enchentes no Rio Grande do Sul. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 10, n. 5, p. 5378–5390, 2024. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v10i5.14265>. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/14265>. Acesso em: 2 jul. 2024.

SILVA, D. de A. **Estudo da influência do índice de forma do gráudo nas propriedades mecânicas do concreto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

SILVA, K. B. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CPA (camada porosa de atrito) com incorporação de PEBD (polietileno de baixa densidade) no ligante betuminoso**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2019.

SILVA, M. da. *et al.* Agregação de resíduos de blocos de concreto reciclado na matriz de pavimento asfáltico drenante. **Revista científica ACERTTE**, [S. l.], v. 2, n. 12, p. 1–21, 2022. DOI: <https://doi.org/10.47820/acertte.v2i12.114>. Disponível em: <https://acertte.org/index.php/acertte/article/view/114>. Acesso em: 26 jun. 2024.

SOARES, A. B. B. de A. **Uso de resíduos em pavimentação rodoviária**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade Regional da Bahia, Barreiras, 2022.

SOARES, J. B. *et al.* O efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas. *In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 13., 1999, São Carlos. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ANPET, 1999. p. 1-11. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/69429/1/1999_eve_jboares.pdf. Acesso em: 21 mai. 2024.

SOUZA, G. Y. F. de. **Biovaletas – infraestrutura verde sustentável**. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022.

SOUZA, M. F. D.; SORIANO, J.; PATINO, M. T. O. Resistência à compressão e viabilidade econômica de blocos de concreto dosado com resíduos de tijolos cerâmicos. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0537>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Q7bFNntLTZczXrFmw6qg6sN/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

SPONCHIADO, É. **Poço de infiltração e pavimento permeável como técnica compensatória de drenagem urbana de controle na fonte**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2021.

TEIXEIRA, L. H. Asfalto poroso no Japão. *In: Offshore Technology Conference*, 6., 2015, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: OTC, 2015. p. 27-29.

TEIXEIRA, L. H. **Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas drenantes do tipo BBDR com utilização de matriz betuminosa altamente modificada HIMA**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

TISCOSKI, G. R. **Análise da viabilidade técnica do uso de PEBD em mistura asfáltica tipo CPA via método seco**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2019.

VARGAS, Y. W. Y.; MAQUILÓN, J. E. C.; QUINTANA, H. A. R. *Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR)*. **Tecnura**, Bogotá, v. 20, n. 50, p. 106-118, out./dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a08>. Disponível em: http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2016000400008. Acesso em: 20 abr. 2024.

VIEIRA, D. de M. *et al.* Contribuições aos estudos sobre a aplicação do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) na composição de camadas de pavimentos no Brasil. **Revista Tecnologia**, [S. l.], v. 42, n. 2, p. 1-14, jun./dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5020/23180730.2022.12133>. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/12133>. Acesso em: 26 jun. 2024.

VILELA, J. V.; FIALHO, M. D. A. **Análise do perfil patológico encontrado na rua Manoel Gonçalves de Castro/Caratinga/MG pelo método IGG**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdades DOCTUM de Caratinga, Caratinga, 2018.

XU, B. *et al.* *Investigation on performance of mineral-oil-based rejuvenating agent for aged high viscosity modified asphalt of porous asphalt pavement*. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 395, n. 1, p. 1-11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136285>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623004432?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jun. 2024.

XU, B. *et al.* *Rheological Performance Analysis of Different Preventive Maintenance Materials in Porous High-Viscosity Asphalt Pavements*. **Materials**, [S. l.], v. 17, n. 7, p. 1-16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17071458>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/7/1458>. Acesso em: 12 jul. 2024.

YAN, K. *et al.* *Compound modification of asphalt mixture using ethylene-vinyl acetate copolymer and amorphous poly alpha olefin*. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 341, n. 1, p. 1-13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127705>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822013800?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jun. 2024.

YAOFEI, L. *et al.* *Research on skid-resistance durability of high viscosity modified asphalt mixture by accelerated abrasion test*. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 1-13, jan./jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02878>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509524000299?via%3Dihub>. Acesso em: 14 jul. 2024.

ZHANG, W. *et al.* *Aging Behavior of High-Viscosity Modified Asphalt Binder Based on Infrared Spectrum Test*. **Materials**, [S. l.], v. 15, n. 8, p. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15082778>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/8/2778>. Acesso em: 10 jul. 2024.

ZHANG, W. *et al.* *Evaluation of the effect of different preparation processes on the road performance of thermoplastic resin modified porous asphalt mixtures*. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 428, n. 1, p. 1-12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136256>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061824013977?via%3Dihub>. Acesso em: 09 abr. 2024.

ZHU, S. *et al.* *Thermal Aging Degradation of High-Viscosity Asphalt Based on Rheological Methods*. **Materials**, [S. l.], v. 16, n. 18, p. 1-19, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16186250>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/18/6250>. Acesso em: 14 jul. 2024.