



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

JAIR STEFANINI PEREIRA DE ATAÍDE

ESTUDO DA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS

**ARARUNA – PB
2023**

JAIR STEFANINI PEREIRA DE ATAÍDE

ESTUDO DA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Pavimentação.

Orientador: Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto.

Co-Orientadora: Prof^a. Me. Talita Miranda de Sousa.

**Araruna – PB
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A862e Ataide, Jair Stefanini Pereira de.
Estudo da dosagem de misturas asfálticas porosas
[manuscrito] / Jair Stefanini Pereira de Ataide. - 2023.
59 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2023.

"Orientação : Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS. "

"Coorientação: Profa. Ma. Talita Miranda de Sousa , UFCG - Universidade Federal de Campina Grande"

1. Asfalto. 2. Pavimentação. 3. Resistencia dos materiais.

I. Título

21. ed. CDD 625.8

JAIR STEFANINI PEREIRA DE ATAÍDE

ESTUDO DA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

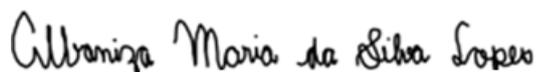
Área de concentração: Pavimentação.

Aprovado em: 05/07/2023.

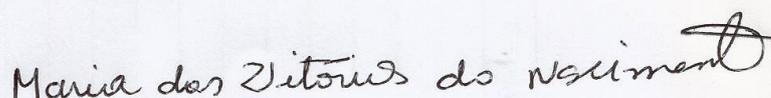
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Albaniza Maria da Silva Lopes
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Maria das Vitórias do Nascimento
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

Quando iniciamos um trabalho dessa natureza, não calculamos o quanto às pessoas que nos rodeiam podem nos ajudar na conclusão dessa tarefa. Pesquisar, produzir conhecimento, inovar é uma tarefa muito difícil, que se torna prazerosa se no caminho contarmos com a companhia de preciosos amigos – confidentes e interlocutores – que se colocam a nossa disposição para qualquer tipo de ajuda. Portanto, quando chega a hora de agradecer, tememos ser traídos pela nossa memória cometendo alguma injustiça. Mas esse é um risco que devemos correr.

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão desse trabalho, em especial à:

- ◆ Primeiramente a Deus por ter me guiado em todos os momentos;
- ◆ A minha família, principalmente meus pais e meus irmãos;
- ◆ Aos meus filhos Maria Creusa Stefanini, Jair Stefanini Júnior e Théo Stefanini pelo apoio, companheirismo, e pela fonte de inspiração para não fraquejar durante todo o curso;
- ◆ Aos professores e funcionários do Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde da UEPB em especial ao Curso de Engenharia Civil pela transmissão de conhecimentos, assistência e compreensão;
- ◆ Aos professores Osires Neto e Talita Sousa pela oportunidade, orientação, confiança e ensinamentos ministrados;
- ◆ Aos amigos que conquistei durante o curso: Carmem, Flávia, Francisco Leandro (só o ouro);
- ◆ A todos os meus companheiros de sala de aula que compartilhamos o conhecimento, dúvidas, sofrimentos e aprendizados;
- ◆ A todos que acreditaram, compartilharam e me apoiaram durante essa jornada.

“Não se preocupe com a distância entre seus sonhos e a realidade. Se você pode sonhá-los, você pode realizá-los”.

(Belva Davis)

RESUMO

No Brasil, o transporte rodoviário é o principal meio de locomoção e a grande maioria das vias são pavimentadas com concreto asfáltico como camada de revestimento. A Camada Porosa de Atrito (CPA) caracteriza-se por apresentar uma granulometria aberta com pequena quantidade de finos e elevada porcentagem de volume de vazios. Este trabalho caracterizou agregados graníticos e ligantes asfálticos do tipo AMP 55/75 e verificou a adequação desses constituintes para produção de CPA. As etapas metodológicas da minha pesquisa corresponderam: caracterização física dos agregados; caracterização reológica do ligante; e análise de dosagem asfáltica por meio de parâmetros volumétricos e resistência à tração. Os dados desse estudo mostraram-se consistentes às normas adotadas quanto a caracterização dos agregados e obtenção dos volumes de vazios, cântabro e escorrimento. Os valores obtidos para a resistência à tração não atenderam a norma estabelecida. Uma das sugestões é realizar análise microestrutural dos materiais utilizados.

PALAVRAS-CHAVE: asfalto; pavimentação; resistência dos materiais.

ABSTRACT

In Brazil, road transport is the main means of transportation and the vast majority of roads are paved with asphalt concrete as a coating layer. The Porous Attrition Layer (CPA) is characterized by having an open granulometry with a small amount of fines and a high percentage of void volume. This work characterized granitic aggregates and asphaltic binders of the AMP 55/75 type and verified the adequacy of these constituents for the production of CPA. The methodological stages of my research corresponded to: physical characterization of the aggregates; rheological characterization of the binder; and analysis of asphalt dosage through volumetric parameters and tensile strength. The data from this study were consistent with the standards adopted regarding the characterization of the aggregates and obtaining the volumes of voids, cantabrium and runoff. The values obtained for tensile strength did not meet the established norm. One of the suggestions is to carry out a microstructural analysis of the materials used.

KEYWORDS: asphalt; paving; strength of materials.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Princípio de funcionamento do pavimento asfáltico poroso.....	20
FIGURA 2.2	Percolação de água em diferentes tipos de pavimento: a) pavimento asfáltico poroso, b) pavimento asfáltico com revestimento poroso, c) pavimento asfáltico convencional.....	20
FIGURA 3.1	Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	28
FIGURA 3.2	Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral.....	33
FIGURA 4.1	Distribuição granulométrica dos agregados.....	36
FIGURA 4.2	Curva volume de vazios <i>versus</i> teor de ligante I.....	41
FIGURA 4.3	Curva volume de vazios <i>versus</i> teor de ligante II.....	42
FIGURA 4.4	Curva da % de desgaste <i>versus</i> teor de ligante I.....	43
FIGURA 4.5	Curva da % de desgaste <i>versus</i> teor de ligante II.....	44
FIGURA 4.6	Curva da resistência à tração <i>versus</i> teor de ligante I.....	45
FIGURA 4.7	Curva da resistência à tração <i>versus</i> teor de ligante II.....	46
FIGURA 4.8	Curva do escorrimento <i>versus</i> teor de ligante I.....	48
FIGURA 4.9	Curva do escorrimento <i>versus</i> teor de ligante II.....	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Ensaio e normas utilizadas para a caracterização dos agregados.....	29
TABELA 3.2	Caracterização dos Ligantes Asfálticos I e II (AMP 55/75).	31
TABELA 4.1	Quantidade passante acumulada (%).....	36
TABELA 4.2	Caracterização física dos agregados.....	37
TABELA 4.3	Caracterização do Ligante Asfáltico I (AMP 55/75-E).....	38
TABELA 4.4	Caracterização do Ligante Asfáltico II (AMP 55/75).....	39
TABELA 4.5	Proporção de cada agregado na mistura.....	40
TABELA 4.6	Porcentagem passando na mistura de projeto.....	40
TABELA 4.7	Resultados obtidos nesta pesquisa.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivo geral.....	12
1.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Constituintes de Misturas Asfálticas.....	14
2.1.1 Agregados.....	14
2.1.2 Ligante Asfáltico.....	15
2.2 Tipos de Misturas Asfálticas.....	16
2.2.1 Concreto Asfáltico – CA.....	17
2.2.2 Stone Matrix Asphalt – SMA.....	18
2.2.3 Gap-graded.....	18
2.2.4 Camada Porosa de Atrito – CPA.....	19
2.3 Vantagens da Camada Porosa de Atrito – CPA.....	22
2.4 Desvantagens da Camada Porosa de Atrito – CPA.....	23
2.5 Utilização e efeito de modificadores.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 Agregados.....	28
3.1.1 Granulometria.....	29
3.2 Ligante Asfáltico.....	29
3.2.1 Ligante Asfáltico I.....	30
3.2.2 Ligante Asfáltico II.....	30
3.3 Dosagem.....	30
3.3.1 Composição Granulométrica das misturas I e II.....	31
3.3.2 Moldagem CGS (Compactador Giratório SUPERPAVE).....	31

3.3.3 Volume de vazios.....	31
3.3.4 Desgaste por abrasão – Cântabro.....	32
3.3.5 Resistência à tração por compressão diametral.....	33
3.3.6 Escorrimento.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1 Caracterização Física dos Agregados.....	35
4.1.1 Granulometria.....	35
<i>4.1.1.1 Caracterização Física dos Agregados.....</i>	<i>37</i>
4.2 Ligante Asfáltico.....	37
4.2.1 Ligante Asfáltico I.....	38
4.2.2 Ligante Asfáltico II.....	39
4.3 Dosagem.....	40
4.3.1 Composição Granulométrica das misturas I e II.....	40
4.3.2 Volumes de vazios.....	41
4.3.3 Desgaste por abrasão – Cântabro.....	43
4.3.4 Resistência à tração por compressão diametral.....	45
4.3.5 Escorrimento.....	47
4.3.6 Teor de Projeto de Ligante.....	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
5.1 Conclusões.....	50
5.2 Considerações para Trabalhos Futuros.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O transporte é uma atividade necessária à sociedade que possibilita atividades sociais e econômicas por meio da circulação de pessoas e mercadorias (BARRETO, 2020). No Brasil, o modal mais utilizado nesse processo de movimentação de um local para o outro é o rodoviário (MELO NETO, *et. al.*, 2022). De acordo com Mesquita (2018), no país, 58% do transporte são feitos por rodovias e a malha rodoviária é utilizada para o escoamento de 75,9% da produção.

O pavimento asfáltico é o principal tipo de revestimento utilizado nas estradas em todo mundo, proporcionando conforto aos usuários, execução rápida e custos baixos de implantação. Contudo, o revestimento asfáltico pode se deformar e se desgastar (MENDONÇA *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2020). Dessa forma, faz-se necessário que a malha rodoviária do Brasil seja bem conservada para proporcionar segurança e conforto aos usuários.

A administração de construção e/ou recuperação da rede rodoviária e da infraestrutura inerente, bem como seu uso, tem arcabouço técnico focado especialmente nos conceitos de funcionalidade e nível de serviço, ambos fortemente relacionados com o desempenho do pavimento, durante sua utilização (GARCIA, 2017).

A qualidade de utilização dos pavimentos é medida pelo conforto deste, que se expressa pela existência ou não de irregularidades capazes de reduzir o desempenho do seu uso, e pela sua segurança, geralmente atribuída à rugosidade da superfície do pavimento e à resistência aos esforços solicitados. Tais fatores determinam os custos inerentes à utilização, considerando que as características finais do pavimento influenciam na necessidade posterior de ações de manutenção, bem como em repercussões de custo decorrente também para usuários, considerando depreciação e eventuais acidentes relacionados aos veículos que dele se utilizam (AMORIM, 2022; SOUSA, 2020).

Neste sentido, surge a Camada Porosa de Atrito (CPA), que contém poucos ou quase nenhum agregado miúdo e fino, e apresenta por isso, muitos vazios interconectados, permitindo a drenagem da água por meio da camada. A retirada da

água superficial traz grandes benefícios aos motoristas, tais como a melhoria da aderência na interface pneu-pavimento, a diminuição do risco de hidroplanagem, da projeção de água proveniente dos pneus dos veículos à frente (Spray) e da reflexão das luzes dos veículos, além de reduzir os ruídos dos pneus. Apesar de apresentar tais vantagens, a camada de CPA apresenta duas grandes desvantagens: o risco de escorrimento do ligante asfáltico durante o transporte e a desagregação (DRESCH, 2016).

Por apresentar uma granulometria aberta, o escorrimento do ligante pode causar sua distribuição na mistura quando aplicada, não assegurando um recobrimento adequado dos agregados o que, conseqüentemente, pode gerar desagregação da camada, ao ser solicitada pelo tráfego. As alternativas mais utilizadas para mitigar o escorrimento são a incorporação de fibras de celulose nos agregados minerais antes da adição do ligante e o uso de ligantes modificados por polímeros (DUARTE, *et al.*, 2023; MENDONÇA, *et al.*, 2022; DRESCH, 2016).

O estudo do comportamento de ligantes asfálticos com agentes modificadores como polímeros torna-se interessante devido à relação direta existente entre qualidade do pavimento e desempenho do ligante, os quais devem satisfazer as Normas e especificações aprovadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. O resultado do seu uso pode acarretar aumento da vida útil do pavimento, redução de custos na manutenção e ainda na redução da poluição ambiental (DNIT, 2006; DNIT, 1999).

1.1 Objetivo geral

A partir de um estudo teórico-experimental, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo da dosagem da Camada Porosa de Atrito (CPA).

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicamente os agregados graúdos e miúdos a serem utilizados na Camada Porosa de Atrito;
- Caracterizar reologicamente o ligante (AMP 55/75) originários de duas fontes diferentes;
- Confrontar os resultados encontrados com os limites de volumes de vazios, cântabro, resistência à tração com compressão diametral e escorrimento, estabelecidos na norma.

A seguir, este trabalho apresentará os seguintes capítulos: Capítulo 2, Revisão Bibliográfica; Capítulo 3, Materiais e Métodos; Capítulo 4, Resultados e Discussões; Capítulo 5, Conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os dados bibliográficos que fundamentam esta pesquisa tais como misturas asfálticas e seus constituintes, os tipos de camadas asfálticas suas vantagens e desvantagens, além do uso e efeito de modificadores.

2.1 Constituintes de Misturas Asfálticas

Os revestimentos asfálticos são camadas flexíveis apoiadas sobre estratos de base, sub-base e de reforço do subleito, fundadas por materiais granulares, solos ou combinações de solos, sem adição de agentes cimentantes. Sua constituição é majoritariamente (entre 90% e 95%) de agregados (graúdos e miúdos) com ligantes asfálticos que têm o papel de aglutinar e impermeabilizar (SOUSA, 2020; DNIT, 2006).

2.1.1 Agregados

Agregado é um termo genérico para os materiais que estão nas dimensões da fração areia, dos pedregulhos, da britagem de rochas minerais ou de cascalheiras de ocorrência natural. São utilizados nas diversas camadas constituintes dos pavimentos, na forma de misturas ou associações compostas de diferentes frações com ligantes asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Para ser utilizado em misturas asfálticas, o agregado deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior pois, o desempenho em serviço de um determinado agregado depende das propriedades geológicas da rocha de origem. Entretanto, cada utilização em particular requer agregados com características específicas que podem ser classificados de acordo com:

- **Natureza** – podem ser naturais, artificiais e reciclados;
- **Tamanho** – gráudo (dimensões maiores do que 4,8 mm e máxima de 50 mm) e miúdo (dimensões maiores que 0,075 mm e máxima de 4,8 mm);
- **Distribuição dos grãos** – influencia quase todas as propriedades (rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, entre outras);
- **Forma e outras propriedades importantes** – A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e na resistência ao cisalhamento e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade.

2.1.2 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico é oriundo do processo de refino do petróleo e possui características de termoviscoelasticidade. Entre os milhares de tipos de petróleo, apenas cerca de 10% têm características para produzir ligantes asfálticos para pavimentação rodoviária. Quando submetido a tensões, o ligante asfáltico apresenta baixa deformação elástica e gera deformações plásticas. O ligante é um material semissólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (BERNUCCI, *et al.*, 2022; LAGOS-VARAS *et al.*, 2020).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), os tipos de ligantes asfálticos existentes no mercado brasileiro são denominados:

- cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- asfaltos diluídos – ADP;
- emulsões asfálticas – EAP;
- asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- asfaltos modificados por polímero (AMP) ou por borracha de pneus (AMB);
- agentes rejuvenescedores (AR e ARE).

As misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com a temperatura empregada em sua produção:

- **Misturas a quente** – são aquelas em que a temperatura de usinagem varia entre 150°C e 180°C, dependendo especialmente do tipo de ligante usado;
- **Misturas mornas** – são aquelas em que a temperatura de usinagem varia entre misturas a quente e a temperatura utilizada nas misturas a frio;
- **Misturas semimornas** – são aquelas em que a temperatura de usinagem menor ou igual a 100°C;
- **Misturas a frio** – são produzidas à temperatura ambiente onde a emulsão utilizada e os agregados não passam pelo processo de aquecimento.

Segundo Sousa (2020), as finalidades em utilizar elevadas temperaturas na usinagem e compactação de misturas asfálticas a quente são:

- i. retirar a água contida nos agregados antes da usinagem, evitando que fique “aprisionada” podendo causar desagregação do pavimento;
- ii. reduzir a viscosidade do ligante a tal ponto que este possa ser bombeado em usina e possa recobrir os agregados de maneira adequada.

2.2 Tipos de Misturas Asfálticas

Os pavimentos asfálticos representam mais de 90% da construção de estradas em todo o mundo (WANG *et al.*, 2020). São estruturas de múltiplas camadas, no qual o revestimento asfáltico recebe a atuação direta do contato das rodas dos veículos e a ação climática. Dessa forma, o revestimento asfáltico deve ser tanto quanto possível impermeável para restringir a entrada direta de águas pluviais e resistente aos esforços, de diferentes magnitudes, do contato pneu-pavimento em movimento (BERNUCCI, *et al.*, 2022).

Em outras palavras, o pavimento asfáltico deve atender aos requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade às deformações permanentes, durabilidade à desagregação e envelhecimento, resistência à derrapagem dos pneus, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local. Para isso, faz-se necessário um projeto de dimensionamento adequado da estrutura do pavimento, com espessuras e propriedades mecânicas das camadas asfálticas que atendam às necessidades estruturais (BERNUCCI, *et al.*, 2022).

Conforme mencionado anteriormente, as misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com a temperatura empregada em sua produção em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. A seguir, lista-se as misturas mais fabricadas e utilizadas:

2.2.1 Concreto Asfáltico – CA

O concreto asfáltico (CA), também denominado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), é a mistura asfáltica usinada mais empregada no Brasil. O CA é uma mistura asfáltica muito resistente em todos os aspectos, decorrente da mistura de agregados de vários tamanhos, fíler e cimento asfáltico, podendo ter ainda alguns aditivos, aquecidos em temperaturas previamente escolhidas (BERNUCCI, *et al.*, 2022).

De modo geral, o CA possui poucos vazios em sua estrutura, conseqüentemente possui alta densidade. Tal fato se dá em virtude do preenchimento dos vazios pelos agregados miúdos. Dessa forma, proporciona um revestimento resistente, pouco permeável e apresenta uma curva granulométrica linear e bem-graduada.

2.2.2 Stone Matrix Asphalt - SMA

Originário da Alemanha, o SMA é melhor conhecido mundialmente pela sigla e pode ser traduzido para português como matriz pétreo asfáltica. O SMA é um revestimento asfáltico, usinado a quente, caracterizado por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos. Devido a essa particular graduação, forma-se um grande volume de vazios que, por sua vez, são preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura da fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras (BERNUCCI, *et al.*, 2022).

O SMA é uma mistura rica em ligante asfáltico, geralmente é aplicado em espessuras variando entre 1,5 a 7 cm, dependendo da faixa granulométrica. São misturas impermeáveis com volume de vazios que variam de 4 a 6% em pista, ao contrário da CPA que será visto posteriormente.

De modo geral, o SMA possui proporcionalmente agregados de maiores dimensões em comparação com a quantidade de finos, apresentando uma descontinuidade em certos intervalos granulométricos. O objetivo dessa granulometria é formar um esqueleto mineral mais resistente a deformações permanentes, utilizando-se do maior contato entre os agregados graúdos (AMORIM, 2022).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), em virtude da alta concentração de agregados graúdos, tem-se macrotextura superficialmente média a aberta (rugosa, grosseira superficialmente), formando pequenos “canais” superficiais entre os agregados graúdos, contribuindo para uma eficiente drenabilidade (superficial) de água de chuva, e aumento de aderência pneu-pavimento. Deve-se enfatizar que o SMA, apesar dessas características, é um revestimento impermeável.

2.2.3 Gap-graded

A graduação com intervalo (gap) é uma outra opção de camada asfáltica bastante difundida no Brasil. A *gap-graded* é descontínua e densa, caracterizada em uma faixa granulométrica especial que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas não em teor de vazios elevado (BERNUCCI, *et al.*, 2022).

A *gap-graded* tem sido empregada como camada estrutural de revestimento (camada de rolamento) e sendo realizada com asfalto-borracha, mas também com asfalto modificado por polímero (LOPES *et al.*, 2020).

2.2.4 Camada Porosa de Atrito – CPA

Misturas asfálticas porosas são utilizadas nas mais diversas aplicabilidades do processo de pavimentação, desde camadas de rolamento a camadas responsáveis pela captação da água para formação de reservatórios ou recarga de aquíferos (MANSOUR; PUTMAN, 2013). Quando tal mistura é voltada a servir como uma camada de desgaste, a mistura asfáltica porosa recebe o nome de Camada Porosa de Atrito (CPA), ou seja, uma camada colocada sobre uma estrutura convencional de asfalto denso ou concreto de cimento Portland, sem função estrutural específica (PINHEIRO, 2004).

Conforme definição da Norma Rodoviária de Especificação de Serviço DNER-ES 386/99 (DNER, 1999), a CPA pode ser definida como “mistura executada em usina apropriada, com características específicas, constituída de agregado, material de enchimento (filer) e cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero do tipo SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), espalhada e comprimida a quente”.

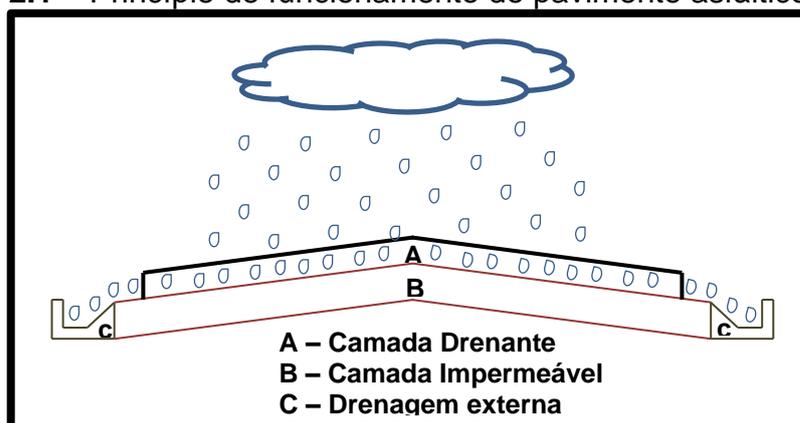
Tal especificação brasileira estabelece cinco faixas granulométricas e teor de ligante asfáltico variando de 4 a 6% para Camada Porosa de Atrito (CPA), sendo que, os agregados graúdos devem apresentar adequada cubicidade (índice de forma $\geq 0,5$) e serem resistente ao desgaste, com valor de abrasão *Los Angeles* igual ou inferior a 30%, podendo ser utilizado agregado com valores maiores, desde que comprovado seu adequado desempenho em utilização anterior, com ligante do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) modificado por polímero do tipo SBS. A mistura deve apresentar Volume de vazios (Vv) de 18 a 25%, bem como, desgaste máximo obtido no Ensaio Cantabro de 25%, e resistência à tração por compressão diametral mínima de 0,55 MPa (DNIT, 1999).

Para Alvarez, Martin e Estakhri (2010) e Liao *et al.* (2014), a dosagem de uma mistura asfáltica porosa deve estar ancorada no princípio denominado por esses

autores de densidade de equilíbrio, segundo o qual a mistura deve apresentar densidade capaz de conferir concomitantemente características de funcionalidade (aumento da permeabilidade, redução do ruído gerado na interação pneu-pavimento e aumento da aderência dos pneus dos veículos ao revestimento), sem comprometer a durabilidade do pavimento.

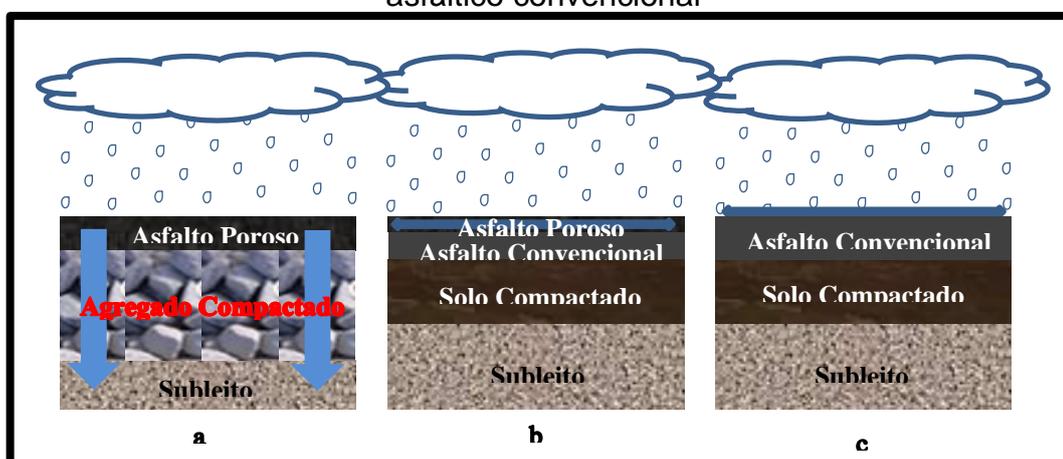
Segundo Kandhal (2002), de acordo com a configuração da CPA, a água da chuva penetra na camada porosa (Figura 2.1), atingindo a camada impermeável, sobre a qual é drenada até as laterais da camada. A remoção da água superficial aumenta a segurança da rodovia além de filtrar contaminantes da superfície desta (ANUPAM, *et al.*, 2016; BARRETT *et al.*, 2006), com considerável vantagem para a CPA, em relação ao pavimento convencional (Figura 2.2).

Figura 2.1 – Princípio de funcionamento do pavimento asfáltico poroso



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Figura 2.2 – Percolação de água em diferentes tipos de pavimento: a) pavimento asfáltico poroso, b) pavimento asfáltico com revestimento poroso, c) pavimento asfáltico convencional



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

A permeabilidade é uma propriedade que expressa a capacidade de percolação de um determinado fluido através de um meio poroso. Em se tratando de misturas asfálticas porosas, onde o fluido em questão é a água, a permeabilidade é uma das principais propriedades, tendo em vista a necessidade de se evitar acúmulo de água sobre a camada de revestimento, a fim de evitar surgimento de problemas práticos, como a redução da aderência pneu-pavimento e a hidroplanagem, bem como, problemas estruturais como o agravamento da deformação permanente e do trincamento por fadiga, além de danos induzidos diretamente pela umidade, cuja consequência é a perda de adesividade entre agregados e ligante asfáltico (ALVAREZ, MARTIN; ESTAKHRI, 2010; BENEDETTO; UMILIACO, 2014).

O agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos. Suas partículas individuais devem ser resistentes, apresentar moderada angulosidade, estando livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. Deve apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55%, de acordo com a Norma Rodoviária – Método de Ensaio DNER – ME 054 (DNER, 1999).

O material de enchimento, ou filer, deve ser constituído por materiais minerais finamente divididos, não plásticos, secos e isentos de grumos, tais como cimento Portland, cal extinta, pó calcário, cinza volante, e que atendam à granulometria da Norma Rodoviária- Método de Ensaio DNER-ME 083 (DNER, 1999).

Deve ainda ser adotado o Ensaio Marshall, seguindo a Norma Rodoviária- Método de Ensaio DNER-ME 043/95, para a verificação das condições de vazios, e o desgaste por abrasão *Los Angeles* deve ser determinado através do Ensaio Cântabro da mistura asfáltica, considerando os parâmetros pertinentes ao item 5.5.2 da Norma rodoviária de Especificação de Serviço DNER-ES 386/99.

O ligante asfáltico utilizado na composição das misturas porosas deve ser modificado por polímero SBS, ainda de acordo com a Norma rodoviária de Especificação de Serviço 386 do DNER (DNER, 1999). A norma americana ASTM D7064 não estipula que o ligante utilizado deve ser modificado, mas coloca que misturas que utilizam tais ligantes apresentaram desempenho superior (ASTM, 2013). Wurst e Putman (2013) justificam a utilização de ligante modificado por polímero SBS

com o fato de tal ligante ser o mais utilizado nos Estados Unidos em camadas porosas de atrito.

No Brasil, atualmente, deve-se seguir as especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT, adotando-se o Ensaio Marshall (DNER-ME-043) para verificação das condições de vazios, o Ensaio Cântabro para analisar o desgaste por Abrasão *Los Angeles*, e, por fim, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (FARAH, 2009).

2.3 Vantagens da Camada Porosa de Atrito – CPA

O uso da CPA acima da camada estrutural de mistura densa, possibilita que a água da chuva seja drenada para fora da rodovia diminuindo a presença de água superficial e permitindo que o atrito pneu-pavimento permaneça dentro das faixas aceitáveis em quaisquer condições meteorológicas. Ademais, o escoamento evita a infiltração vertical eliminando a projeção de gotículas de água e, conseqüentemente, melhorando a visibilidade dos condutores.

Outra característica importante dessa mistura asfáltica é que ao reduzir a espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento, conseqüentemente, reduz:

- As distâncias de frenagem;
- O spray proveniente do borrfio de água pelos pneus dos veículos (aumenta a distância de visibilidade dos condutores);
- A reflexão da luz dos faróis noturnos.

Todos esses aspectos conjuntos são responsáveis pela redução do número de acidentes em dias de chuva. Dessa forma, o CPA reduz o risco de acidentes em virtude do aumento do atrito da interface pneu-pavimento em condições molhadas, quando comparadas estruturas com misturas asfálticas densas e com placas de cimento Portland. Em outras palavras, a utilização de CPA aumenta a segurança da via em comparação a outras misturas asfálticas (KANDHAL, 2002).

O desempenho de uma camada porosa também causa impacto positivo na redução de ruídos, que é influenciada pelo índice de vazios (Vv) deste tipo de pavimento, bem como pela espessura e granulometria (SRIRANGAM *et al.*, 2015).

2.4 Desvantagens da Camada Porosa de Atrito – CPA

A porosidade pode gerar efeitos negativos nas misturas asfálticas, considerando que os revestimentos que apresentam alto índice de vazios (Vv) são mais suscetíveis ao desgaste, que consiste na perda progressiva de agregados deste revestimento asfáltico (SURESHA; GEORGE; SHANKAR, 2010). Tal desgaste ocorre em virtude da perda de adesão entre o ligante asfáltico e o agregado ou devido à fraca coesão das matérias asfálticas que envolvem o agregado (LYONS; PUTMAN, 2013).

No caso das misturas porosas, o desgaste é mais impactante porque a porosidade permite uma oxidação mais rápida do ligante asfáltico cuja superfície de contato com o oxigênio é maior, aumentando consideravelmente o processo de envelhecimento. A porosidade, contrapondo superfícies relativamente impermeáveis do pavimento asfáltico convencional, ainda deixa a mistura mais susceptível aos efeitos da umidade (RASMUSSEN *et al.*, 2007; SURESHA; GEORGE; SHANKAR, 2010; LYONS; PUTMAN, 2013).

Hanzah, Hasan e Ven (2012) verificaram prejuízo à permeabilidade em misturas asfálticas porosas, através do aumento do tempo de percolação e da redução do coeficiente de permeabilidade, em função do tempo e da temperatura. Constatou-se, pelos autores, que as duas variáveis – tempo e temperatura – corroboram para a redução da permeabilidade, que ocorre de forma mais acentuada no início e nas temperaturas mais elevadas, entre as empregadas no estudo (30 e 35°C).

Martin, Putman e Neptune (2014) e Chen *et al.* (2015) apontam como uma causa adicional da redução de permeabilidade em misturas porosas o processo de colmatação (preenchimento de vazios ou fissuras), desenvolvido ao longo do tempo de utilização da rodovia, quando sedimentos decorrentes das águas pluviais, vento e veículos, são depositados sobre o revestimento do pavimento. De acordo com esses autores, ao atingir o nível máximo de colmatação dos poros, a mistura porosa passa

a ser totalmente impermeável, portando-se, do ponto de vista hidrológico, como uma mistura densa convencional, perdendo a função para a qual foi projetada.

De acordo com Hamzah e Hardiman (2005) o efeito da colmatação pode ser reduzido com a adoção de revestimento poroso composto por duas camadas de granulometrias distintas, conhecido como revestimento poroso duplo.

Adicionalmente, como inconveniente da CPA, o fenômeno de *raveling* (desagregação) ocorre quando partículas de agregado se soltam da superfície asfáltica (MANRIQUE-SANCHEZ; CARO; ARÁMBULA-MERCADO, 2016). A desagregação acontece devido ao alto índice de vazios conectados da estrutura da camada porosa, que permitem que o ar e água entrem na camada causando um envelhecimento precoce do ligante, transformando-o em um material mais rígido (KRINGOS; SCARPAS 2008).

O fenômeno de desprendimento de agregado pode ser dividido em dois tipos: coesivo (clima quente) e adesivo (clima frio), e sofre interferência dos componentes da CPA. O envelhecimento do ligante aumenta a resistência da camada ao desprendimento coesivo, porém diminui substancialmente a resistência em climas frios, conseqüentemente, ao desprendimento adesivo (GHAUCH *et al.*, 2015; MANRIQUE-SANCHEZ *et al.*, 2016).

Para Suresha *et al.* (2008), o desempenho da camada porosa de atrito depende principalmente da sua permeabilidade. O entupimento dos vazios da mistura asfáltica é considerado por Dietz (2007) como o fenômeno que mais causa redução de desempenho. Huber (2000) coloca que esse fenômeno faz com que a estrutura perca suas propriedades de drenagem e redução de ruídos. O entupimento dos poros decorre especialmente pelos processos de transporte de partículas de areia trazidos pelos veículos ou pelo escoamento da água das chuvas. Nielsen (2007) notou que a redução de permeabilidade aumenta de acordo com a idade do pavimento, tornando-se mais acentuado entre as trilhas de roda e em locais com pouco ou nenhum tráfego. Para reduzir a colmatação dos poros da camada porosa de atrito por detritos e afins, foi desenvolvida uma camada com granulometria mais fina no topo, criando uma espécie de peneira onde os detritos de maior diâmetro ficariam presos, deixando a camada com granulometria grossa protegida destes (HAMZAH; HARDIMAN, 2005).

A permeabilidade é a característica principal de uma camada porosa de atrito sendo proporcional ao índice de vazios da mistura asfáltica. Os poros de uma mistura drenante podem ser classificados em: a) Poros efetivos: são aqueles que contribuem efetivamente para a passagem da água através da estrutura. São também chamados de vazios comunicantes e garantem o desague no exterior do pavimento; b) Poros semi-efetivos: auxiliam no armazenamento de água, porém não garantem a passagem; c) Poros ineficazes: não contribuem nem para o armazenamento ou passagem de água (MEURER; FILHO, 2001).

Deformação permanente também é um dos principais defeitos observados em pavimentos flexíveis. Sendo atribuída à camada de revestimento, às subcamadas ou a toda estrutura do pavimento, ocorrem em trilhas de rodas de caminhões, corredores de ônibus urbanos e em pátios de estacionamentos (ZHANG *et al.*, 2013; MEDINA; MOTTA, 2015).

2.5 Utilização e efeito de modificadores

Dada à estrutura aberta, as misturas asfálticas porosas estão mais suscetíveis aos agentes que deterioram sua estrutura. Uma das maneiras para melhorar o desempenho destas misturas é a incorporação de aditivos às mesmas. Os mais utilizados são as fibras minerais, sintéticas ou orgânicas e a incorporação de polímeros ao ligante asfáltico.

Segundo Polacco *et al.* (2004) e Sangita *et al.* (2011), as vantagens ocasionadas pela incorporação de aditivos estão atreladas à natureza química e a quantidade do agente modificador utilizado. De um modo geral, é verificado uma melhora em termos de deformação permanente, suscetibilidade térmica e trincas por fadiga e térmicas, o que resulta em misturas asfálticas mais duráveis e rodovias com maior vida de serviço, justificando a aplicação destes materiais.

No caso de adição de polímeros ocorrerem diretamente no ligante asfáltico, há geralmente um aumento da rigidez e melhora no que diz respeito à suscetibilidade térmica do ligante, tornando as misturas asfálticas mais resistentes a deformações permanentes, em locais de clima quente. Também é possível obter vantagens por

meio da adição de polímeros diretamente nas misturas asfálticas, considerando que estes atuam formando uma película em torno do agregado, aumentando a sua rugosidade, resultando em misturas asfálticas de boa qualidade (AWWAD; SHBEEB, 2007).

Os polímeros utilizados como modificadores de ligante asfáltico são agrupados da seguinte forma: elastômeros termoplásticos, plastômeros e polímeros reativos. Os primeiros são responsáveis por conferir propriedades elásticas ao ligante modificado, contribuindo para a resistência à deformação permanente, devido à alta recuperação elástica do ligante asfáltico resultante. Os plastômeros modificam o ligante, formando uma estrutura tridimensional resistente, modificando sua consistência, conferindo rigidez e menor deformação, sob aplicação de cargas (AIREY, 2002; POLACCO *et al.*, 2004).

O polímero mais utilizado como modificador de ligante asfáltico para aplicação em pavimentação é o estireno-butadieno-estireno (SBS). Este polímero pertence ao grupo dos elastômeros termoplásticos, apresentando estrutura molecular linear e radial, onde os blocos de estireno se unem para formar uma rede reticulada. Entre os integrantes do grupo dos plastômeros, encontram-se o polietileno (PE), o etileno-acetato de vinila (EVA) e o etileno-butil de acrilato (EBA).

A utilização de aditivos comerciais em misturas asfálticas pode representar aumento nos custos de obras de pavimentação, o que fatalmente pode limitar a ampliação da malha rodoviária. Diante deste dilema, o uso de aditivos obtidos a partir de resíduos (vidro, escória de aciaria, pneus, plásticos e polímeros reciclados) em substituição aos aditivos comerciais é uma alternativa, representando inclusive, benefícios ambientais, por dar um destino nobre a possíveis poluentes (MOGHADDAM, KARIM e SYAMMAUN, 2012; MOGHADDAM e KARIM, 2012).

Lyons e Putman (2013) consideram aditivos estabilizantes a partir de resíduos de borracha como sendo o mais eficiente inibidor de escorrimento do ligante asfáltico em pavimentos com altas temperaturas de serviço (60°C). De um modo geral, os trabalhos de Al-Hadidy e Yi-qiu (2009a), Al-Hadidy e Yi-qiu (2009b), Attaelmanan, Feng e Al (2011), Sangita *et al.* (2011) e Vasudevan *et al.* (2012) mostram um aumento na estabilidade Marshall e uma redução na fluência, o que resulta num aumento do

Quociente Marshall (QM), relação entre estes parâmetros, indicando uma boa resistência à deformação permanente como resultado da adição de polímero, independentemente do tipo ou modo de adição.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais que foram realizados para as caracterizações dos agregados e ligantes asfálticos utilizados na mistura asfáltica tipo CPA. Dessa forma, a metodologia a ser adotada será dividida em três etapas, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma das atividades desenvolvidas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Na primeira etapa foram selecionados e caracterizados fisicamente os agregados. Na segunda etapa, caracterizou-se reologicamente o ligante asfáltico puro. Na terceira e última etapa foi realizada a caracterização da dosagem.

Os métodos de ensaios a serem utilizados se basearam nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos (LEP), da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.1 Agregados

Os agregados graníticos utilizados nesta pesquisa foram a brita 19mm, brita 12,5 mm e pó de pedra, todos oriundos da pedreira Rocha Cavalcante sediada

na cidade de Campina Grande – PB. O filer utilizado foi a cal hidratada adquirida no comércio de Campina Grande – PB.

Tabela 3.1 – Ensaios e normas utilizadas para a caracterização dos agregados

Ensaio	Métodos
Distribuição do tamanho das partículas dos agregados	DNIT ME 083/1998
Determinação da massa específica dos agregados graúdos	DNIT ME 195/1997
Determinação da massa específica dos agregados miúdos	DNIT ME 084/1995
Abrasão <i>Los Angeles</i>	DNIT ME 035/1998
Equivalente areia	DNIT ME 054/1997
Índice de forma	DNIT ME 086/1994
Partículas planas e alongadas	ASTM D 4791/2010
Angularidade	ASTM C 1252/2017

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

3.1.1 Granulometria

A granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizada de acordo com a norma DNIT-ME 083/98, através de peneiras de malhas com aberturas: 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm, 19,1mm e 25,4mm. O material utilizado foi colocado em estufa a 110°C por 4 horas para a retirada da umidade e o peneiramento foi realizado manualmente.

3.2 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o Cimento Asfáltico de Petróleo AMP 55/75, fornecido por duas empresas distintas, definidos como Ligante Asfáltico I e Ligante Asfáltico II.

3.2.1 Ligante Asfáltico I

O Ligante Asfáltico I (AMP 55/75- E), utilizado nesta pesquisa, foi adquirido na obra na BR 230 – Paraíba. Todos os ensaios de caracterização do ligante, com exceção do ensaio de recuperação elástica, foram repetidos após o envelhecimento, por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico de cada mistura, em movimento, por meio do *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT). Este procedimento é útil na identificação de possíveis mudanças nas propriedades do ligante que podem ocorrer durante a usinagem a 150°C. Os resultados foram utilizados para verificar se o ligante atende aos requisitos para utilização nesta pesquisa.

3.2.2 Ligante Asfáltico II

O Ligante Asfáltico II (AMP 55/75), também utilizado nesta pesquisa, foi adquirido na Lidermac Construções, com sede em Recife, PE. Estes resultados são importantes para verificação da viabilidade do uso do mesmo na produção de misturas asfálticas, além da utilização dos resultados de viscosidade na determinação das temperaturas de usinagem e compactação das misturas.

3.3 Dosagem

Para a dosagem, seguiu-se as especificações da norma americana ASTM D7064/2013 utilizando os Ligantes Asfálticos I e II, para a mistura asfáltica do tipo CPA. Também foram considerados os parâmetros e as composições granulométricas, determinados pela norma brasileira DNIT 386/99. De acordo com Jacques (2018), apesar da norma americana possuir sua própria metodologia para obtenção da granulometria das misturas, é preferível utilizar alguma das faixas determinadas pela norma DNIT 386/99, adequando assim as misturas à realidade brasileira. Os ensaios e as respectivas normas utilizadas para a dosagem da mistura estão expostos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Caracterização dos Ligantes Asfálticos I e II (AMP 55/75)

Ensaio	Métodos
Volume de Vazios	DNIT – ME 427/2020 e 428/2022
Desgaste por abrasão - Cântabro	DNIT – ME 386/1999
Resistência à tração indireta por compressão diametral	DNIT – ME 136/2018
Escorrimento	ASTM D6390/2017

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

3.3.1 Composição Granulométrica das misturas I e II

Para composição granulométrica das misturas I e II analisou-se a distribuição dos grãos dos agregados e foi feito o enquadramento na faixa V, do DNIT-ME 386/99. A escolha por esta faixa se deu, pois, dentre as faixas granulométricas, esta é a mais comumente utilizada no Brasil.

3.3.2 Moldagem CGS (Compactador Giratório SUPERPAVE)

A fim de determinar o teor de projeto de ligante foram analisados os teores de ligante de 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%, por meios dos resultados de volume de vazios, da perda de massa por abrasão – cântabro, da resistência à tração indireta por compressão diametral e do escorrimento. Segundo a ASTM D7064 (2013), a compactação deve ser realizada no CGS, com 50 giros, pressão aproximada de 600 kPa e ângulo de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$.

3.3.3 Volumes de vazios

De acordo com a DNIT-ME 386/99, uma mistura asfáltica do tipo CPA deve apresentar um volume de vazios entre 18 e 25%. Nesta pesquisa, para determinação do volume de vazios, foram acuradas as densidades aparentes, pela especificação de serviço DNIT 428/2022 e, densidades máximas verificadas por meio do *Rice Test*, regido pela norma DNIT 427/2020.

O procedimento determinado pela especificação DNIT 428/2022, para cálculo da densidade aparente da mistura, consiste em pesar o corpo de prova ao ar, envolvê-lo com fita e, então, repetir o procedimento de pesagem. Posteriormente, aplica-se uma camada de parafina que envolva todo o corpo de prova, e pesa-o novamente. Por fim, o corpo de prova envolto por fita e parafina é submerso em água, a 25°C, e obtém-se o peso submerso. De posse desses dados, é possível calcular a densidade aparente das misturas com volume de vazios superiores a 10%.

Para determinar a densidade máxima das misturas foram realizados os *Rices Test* para cada teor de ligante asfáltico. A norma DNIT 427/2020, estabelece que cada mistura seja espalhada ainda quente sobre uma placa metálica e, após atingir temperatura ambiente, as frações de misturas maiores sejam separadas manualmente e pesadas. Após este procedimento as amostras são levadas ao agitador mecânico para retirada do ar contido e então, são pesadas submersas. Estes pesos permitirão o cálculo da densidade máxima da mistura.

Os ensaios foram realizados em triplicata para cada teor dos ligantes I e II. De posse dos resultados de cada ensaio foi possível determinar o volume de vazios da mistura, por meio da Equação 3.1.

$$V_v(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad (3.1)$$

onde:

V_v → índice de vazios (%);

G_{mb} → densidade aparente da mistura compactada;

G_{mm} → densidade máxima medida da mistura.

3.3.4 Desgaste por abrasão - Cântabro

De acordo com a especificação 386/99 do DNIT, o ensaio de Cântabro é um dos parâmetros importantes analisados para as misturas asfálticas do tipo CPA, não podendo a perda de massa ser superior a 25%. Neste ensaio, os corpos de prova foram pesados, e colocados, um a um, no tambor do equipamento de *Los Angeles*, limpo e sem carga abrasiva, rotacionados por 300 vezes a 30 rpm (rotações por

minuto) e, temperatura de 25°C. Após este processo, o corpo de prova é retirado e pesado novamente.

A porcentagem de desgaste é calculada por meio da Equação 3.2

$$A = \left(\frac{P - P'}{P} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

onde:

A → *desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero, com aproximação de 1%*;

P → *peso do corpo de prova antes do ensaio*;

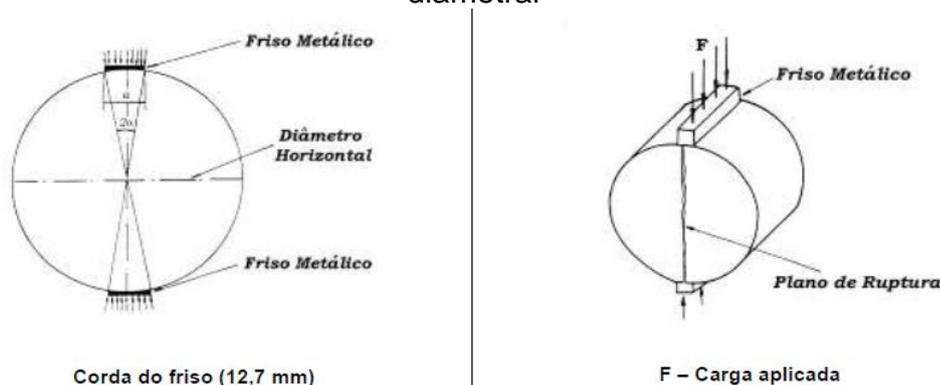
P' → *peso do corpo de prova após a realização do ensaio*.

Como mencionado anteriormente, segundo a especificação 386/99 do DNIT, o limite máximo de desgaste pelo ensaio de cântabro para uma mistura CPA é de 25%, enquanto que para a norma americana D7064 o limite aceitável é de 20%. Nesta pesquisa, os ensaios foram realizados em triplicata para cada teor dos ligantes I e II.

3.3.5 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado em triplicata para cada teor dos ligantes I e II, segundo as recomendações da DNIT-ME 136/2018. Este consiste na aplicação de duas forças concentradas e, diametralmente opostas de compressão, em um cilindro que geram tensões de tração perpendiculares ao diâmetro, como esquematizado na Figura 3.2 (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Figura 3.2 - Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral



Fonte: (DNIT, 2018)

Para iniciar o procedimento, o corpo de prova deve ser mantido por, no mínimo, 4 horas em um compartimento com temperatura controlada de 25°C. Após esse período, o corpo de prova deve ser acomodado em um dispositivo centralizador e levado à prensa. A carga é aplicada a uma velocidade de 0,8 mm/s até a ruptura da amostra e, em seguida, a tensão é calculada por meio da Equação 3.3.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3.3)$$

onde:

σ_R → tensão de tração (MPa);

F → carga de compressão de ruptura (N);

D → diâmetro da amostra (mm);

H → altura da amostra (mm).

3.3.6 Escorrimento

Para realização do ensaio de escorrimento do ligante foram seguidas as recomendações da ASTM D6390/2017. De acordo com a recomendação, o ensaio deve ser realizado com no mínimo duas amostras de 1200 ± 200 g, não compactadas, que devem ser acomodadas sem perturbação em um cesto com dimensões padronizadas e levadas à estufa durante o período de $1h \pm 5$ min, na temperatura de usinagem da mistura.

Decorrido o período de permanência na estufa, o conjunto é retirado e pesa-se apenas o prato contendo o material resultante do escorrimento do cesto. A porcentagem de escorrimento é determinada por meio da Equação 3.4, e não deve ser superior a 0,3% para misturas asfálticas porosas do tipo CPA.

$$\text{Escorrimento (\%)} = \frac{(D-C)}{(B-A)} \times 100 \quad (3.4)$$

onde:

A → peso do cesto vazio;

B → peso do cesto contendo a amostra;

C → massa do prato;

D → massa do prato contendo o material resultante do escorrimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as discussões dos ensaios realizados para as caracterizações dos agregados e ligantes asfálticos utilizados na mistura asfáltica tipo CPA. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, da Universidade Federal de Campina Grande.

4.1 Caracterização Física dos Agregados

Os agregados graníticos utilizados nesta pesquisa foram a brita 19 mm, brita 12,5 mm e pó de pedra. A caracterização dos agregados apresentou todos os valores dentro dos limites estabelecidos por suas respectivas normas, viabilizando assim, o uso dos agregados (graúdos e miúdos) nesta pesquisa, corroborando com Carvalho *et al.* (2021) e Porto *et al.* (2018) ao utilizarem os mesmos agregados para avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas.

4.1.1 Granulometria

A granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizada de acordo com a norma DNIT-ME 083/98, por meio de peneiras de malhas com aberturas: 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm, 19,1mm e 25,4mm. O material utilizado foi colocado em estufa a 110°C por 4 horas para a retirada da umidade e o peneiramento foi realizado manualmente.

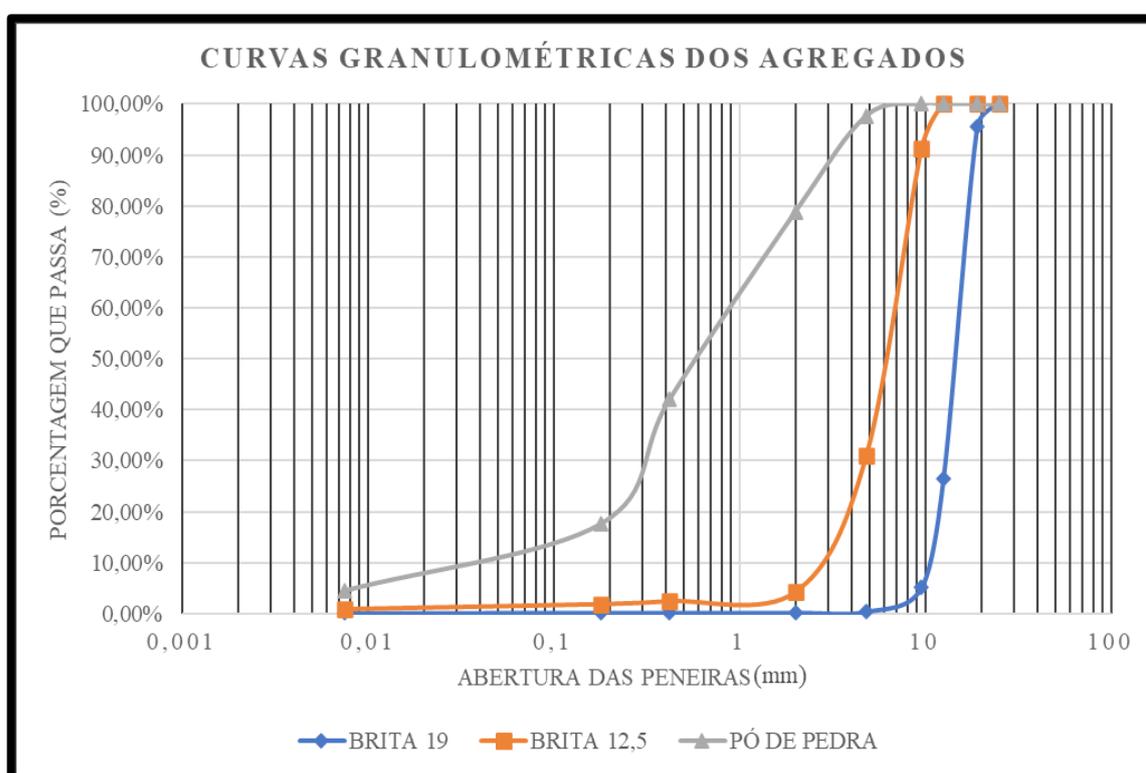
A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram, a quantidade passante e as curvas granulométricas de cada agregado, respectivamente.

Tabela 4.1 – Quantidade passante acumulada (%)

Peneira	Diâmetro (mm)	Brita 19mm	Brita 12,5mm	Pó de Pedra
1"	25,40	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,10	95,5	100,0	100,0
1/2"	12,70	26,5	100,0	100,0
3/8"	9,50	5,1	91,2	100,0
Nº 4	4,80	0,4	31,0	97,6
Nº 10	2,00	0,2	4,3	78,9
Nº 40	1,42	0,2	2,5	42,0
Nº 80	0,18	0,2	1,9	17,7
Nº 200	0,075	0,2	0,9	4,5

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Figura 4.1 – Distribuição granulométrica dos agregados



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

De acordo com a Figura 4.1 é possível observar que os agregados graúdos utilizados apresentam uma granulometria uniforme, já o pó de pedra apresentou uma granulometria densa. Tais resultados são semelhantes aos encontrados por Carvalho *et al.* (2021) e Queiroz *et al.* (2018).

4.1.1.1 Caracterização Física dos Agregados

Os resultados da caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Caracterização física dos agregados

Ensaio	Limites	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	
		Pó de Pedra	Brita 19mm	Brita 12,5mm
Massa Específica Real (g/cm³)	NA	2,47	2,286	2,1007
Massa Específica Aparente (g/cm³)	NA	2,49	2,267	2,079
Absorção (%)	≤2	0,70	0,520	0,70
Abrasão Los Angeles (%)	≤55	NA	18,97	22,16
Equivalente Areia	≥ 55	56,38	NA	NA

NA = Não Aplicável.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

As massas específicas foram utilizadas para determinação das densidades máximas da mistura. O pó de pedra apresentou uma baixa porosidade e, em relação ao equivalente areia, o agregado atendeu a norma, pois, apresentou valor superior ao mínimo de 55%. De acordo com o índice de absorção, é notório que os agregados graúdos utilizados são pouco porosos. Quanto ao desgaste por abrasão *Los Angeles*, os mesmos apresentaram valores abaixo de 55%, atendendo ao limite estabelecido por norma.

Dessa forma, os agregados foram considerados adequados para uso em misturas asfálticas. Nos trabalhos de Carvalho *et al.* (2021), Porto *et al.* (2018) e Queiroz *et al.* (2018), pode-se verificar que obtiveram resultados semelhantes com os obtidos nesta pesquisa.

4.2 Ligante Asfáltico

Conforme mencionado no Capítulo 3, o ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi fornecido por duas empresas distintas e definidos como Ligante Asfáltico

I e Ligante Asfáltico II. A seguir, apresenta-se os resultados das caracterizações dos ligantes asfálticos.

4.2.1 Ligante Asfáltico I

A Tabela 4.3 apresenta a caracterização física do Ligante Asfáltico I (AMP 55/75- E) bem como as normas referentes a cada ensaio e seus limites.

Tabela 4.3 – Caracterização do Ligante Asfáltico I (AMP 55/75-E)

Característica	Antes RTFOT	Depois RTFOT	Limites	Métodos
Penetração (0,1 mm)	57	47	45 - 70	DNIT - ME (131/2010)
Ponto de Amolecimento (°C)	48,5	65,75	55 (mín)	DNIT - ME (131/2010)
Recuperação Elástica (%)	76	NA	75 (mín)	DNIT - ME (131/2010)
Viscosidade Rotacional 135 °C (CP)	1577,5	2451,3	3000 (máx)	NBR 15184/2004
Viscosidade Rotacional 150 °C (CP)	726,0	1059,0	2000 (máx)	NBR 15184/2004
Viscosidade Rotacional 177 °C (CP)	245,5	325,0	1000 (máx)	NBR 15184/2004
RTFOT - Variação de Massa (%)	NA	0,0205	0,5 (máx)	ASTM D 2872/1997

NA = Não Aplicável

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.3, todos os resultados obtidos nos ensaios, antes e após o envelhecimento do ligante, estão dentro dos limites estabelecidos por suas respectivas normas, viabilizando, assim, o uso do ligante nesta pesquisa. O resultado da variação de massa obtida pelo ensaio de RTFOT está dentro do limite de 0,5% estabelecido pela norma 095/2006 do DNIT,

assim o ligante encontra-se dentro da tolerância de envelhecimento sem interferir na qualidade do pavimento. Silva *et al.* (2019) encontraram a variação de massa pelo ensaio de RTFOT com valor de 0,0704%, o que corrobora com os resultados desta pesquisa.

4.2.2 Ligante Asfáltico II

Para o Ligante Asfáltico II (AMP 55/75), os procedimentos e respectivas normas usadas para avaliar as características físicas e reológicas do ligante asfáltico utilizado são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Caracterização do Ligante Asfáltico II (AMP 55/75)

Característica	Limites	Resultado	Norma
Penetração (mm)	45 – 70	60,7	NBR 6576/2007
Ponto de Amolecimento (°C)	55 (mín)	62,0	NBR 6560/2016
Recuperação Elástica (%)	75 (mín)	86,5	NBR 15086/2022
Viscosidade Rotacional 135 °C (CP)	3000 (máx)	1073,1	NBR 15184/2004
Viscosidade Rotacional 150 °C (CP)	2000 (máx)	146,4	NBR 15184/2004
Viscosidade Rotacional 177 °C (CP)	1000 (máx)	177	NBR 15184/2004
RTFOT - Variação de Massa (%)	0,5 (máx)	0,354	ASTM D 2872/1997

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional foram realizados com amostras de ligante asfáltico, virgem e envelhecidos, pelo procedimento de envelhecimento em curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (*Rolling Thin Oven Test*).

É possível perceber que os resultados para o Ligante Asfáltico II encontram-se dentro dos limites das normas e corrobora com os resultados obtidos para o Ligante Asfáltico I e com os resultados obtidos por Silva *et al.* (2019). Estes resultados viabiliza o uso do mesmo na produção de misturas asfálticas.

4.3 Dosagem

Para a dosagem seguiu-se as especificações da norma americana ASTM D7064/2013 utilizando os Ligantes Asfálticos I e II, bem como os parâmetros e as composições granulométricas, determinados pela norma brasileira DNIT 386/1999.

4.3.1 Composição Granulométrica das misturas I e II

No Brasil, a faixa granulométrica V é mais utilizada. Assim, para composição granulométrica das misturas I e II utilizou-se o enquadramento na faixa V, do DNIT-ME 386/99. As proporções são apresentadas na Tabela 4.5 e a partir destas, foi possível compor a curva granulométrica da mistura, a qual é apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 – Proporção de cada agregado na mistura

Proporções dos Agregados na Mistura CPA	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Pó de Pedra	Filer
	29%	60%	8%	3%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Tabela 4.6 – Porcentagem passando na mistura de projeto

Peneira	Brita 19 mm	Pó de Pedra	Passante em peso
	% Mín	% Máx	%
3/4"	100	100	98,69
1/2"	70	100	78,69
3/8"	50	80	67,18
N° 4	18	30	29,52
N° 10	10	22	11,94
N° 40	6	13	7,92
N° 80	–	–	5,62
N° 200	3	6	3,82

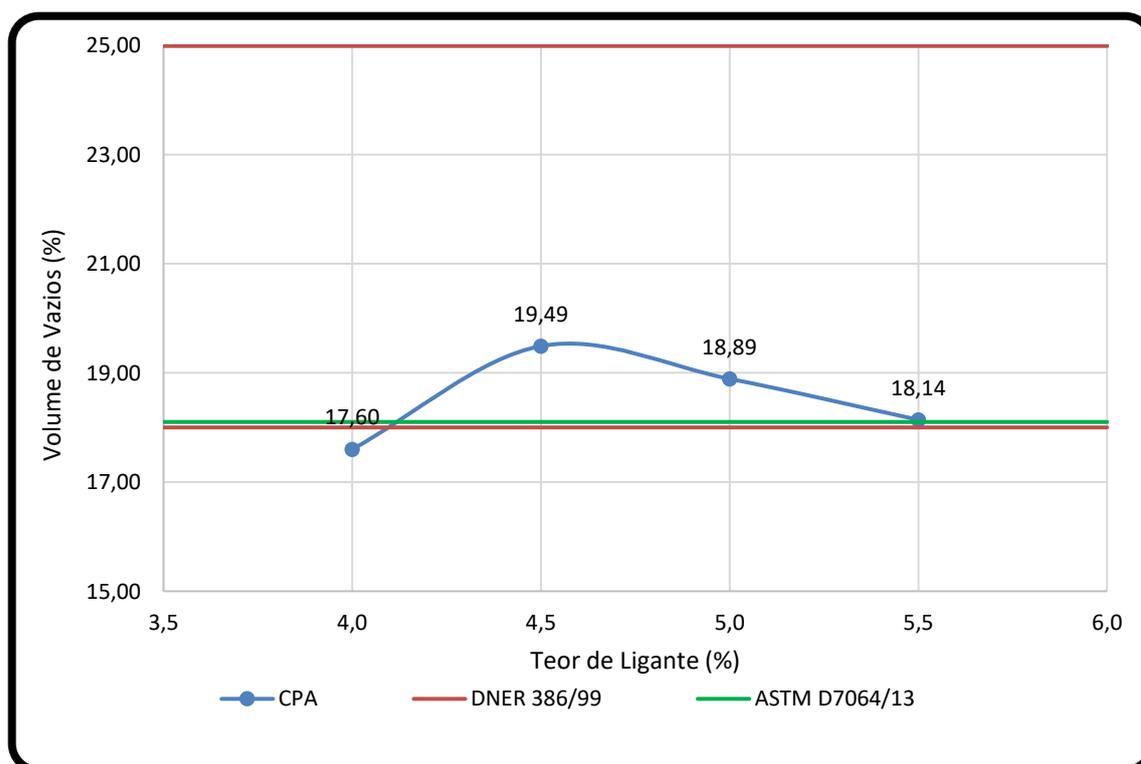
Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

4.3.2 Volumes de vazios

Nesta pesquisa, para determinação do volume de vazios, foram acuradas as densidades aparentes, pela especificação de serviço DNIT 428/2022 e, densidades máximas verificadas por meio do *Rice Test*, regido pela norma DNIT 427/2020. Os ensaios foram realizados em triplicata para cada teor dos ligantes I e II.

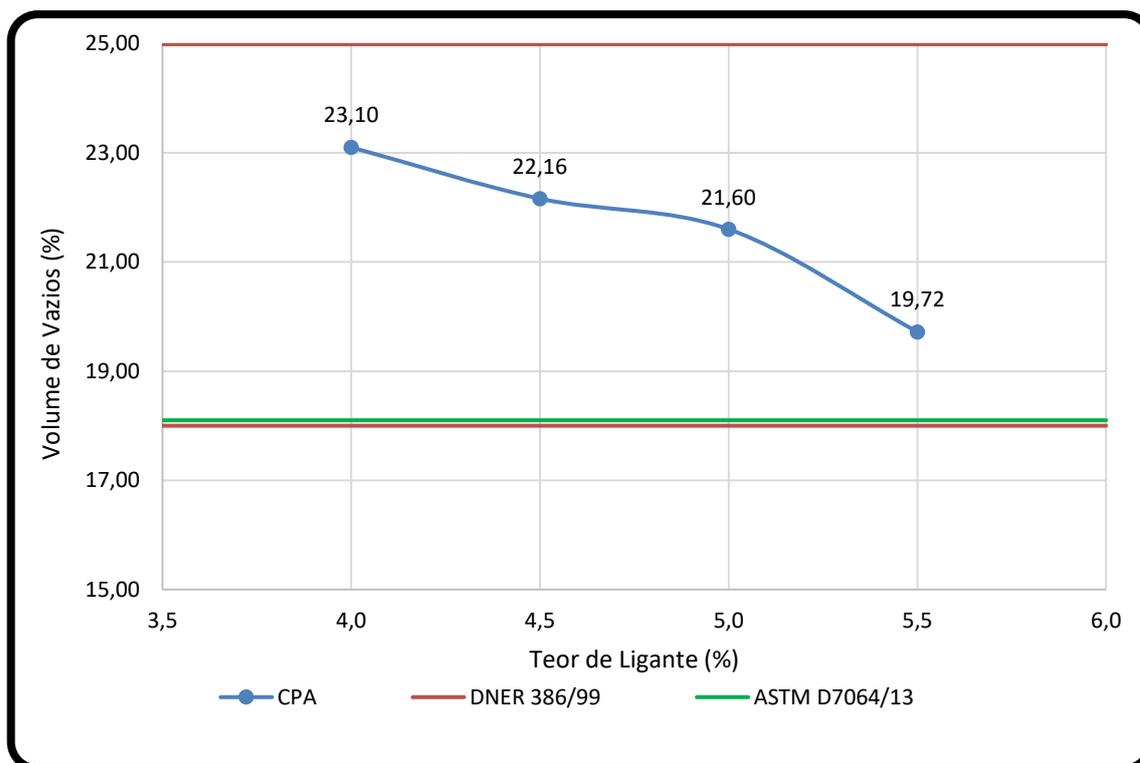
De posse dos resultados de cada ensaio determinou-se o volume de vazios da mistura, por meio da Equação 3.1. Em seguida, foram traçados os gráficos de volume de vazios *versus* teor de ligante I apresentado na Figura 4.2 e volume de vazios *versus* teor de ligante II apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.2 – Curva volume de vazios *versus* teor de ligante I.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Figura 4.3 – Curva volume de vazios versus teor de ligante II.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

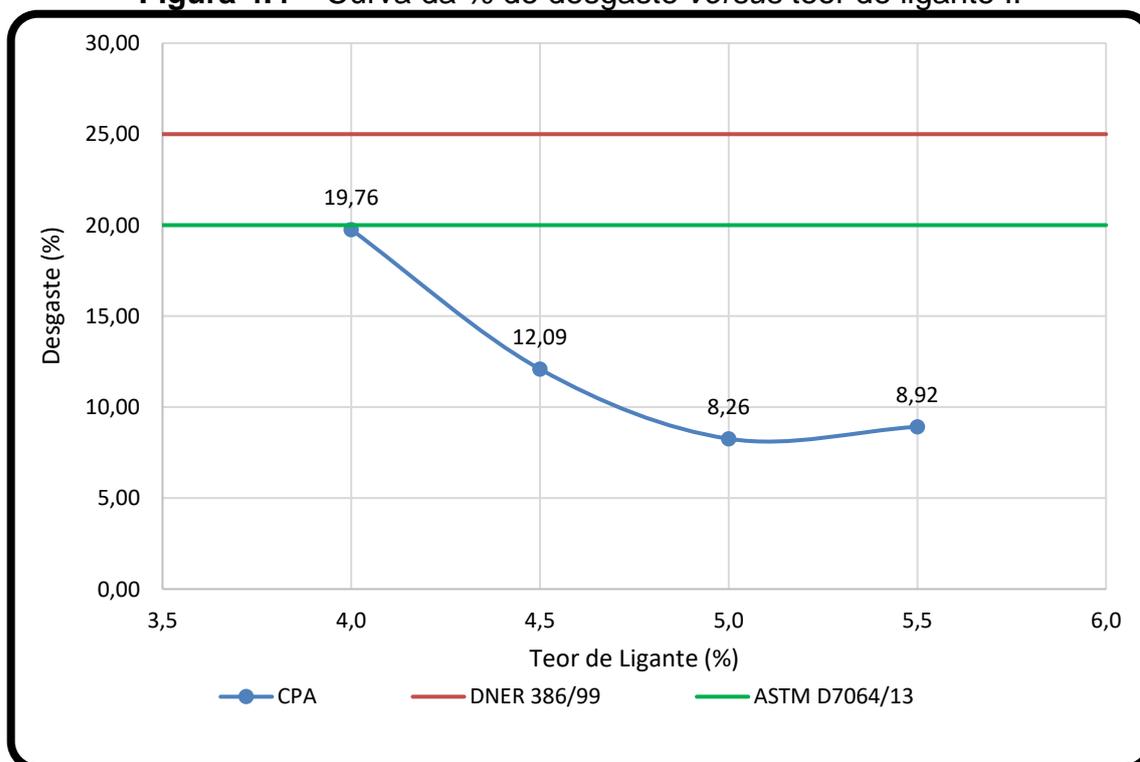
Ao analisar as Figuras 4.2 e 4.3 é possível observar que o ligante I a 4,0% não obedece às normas DNIT-ME 386/99 e ASTM D7064-13, apresentando um volume de vazios abaixo de 18% (limite mínimo). Ao que se refere o ligante II, em todos os teores analisados, apresentam compatibilidade às normas DNIT-ME 386/99 e ASTM D7064-13.

A CPA é uma mistura asfáltica à quente que possui um considerável teor de vazios, entre 18% a 25% DNIT-ME 386/99. Nóbrega (2021) estudou a viabilidade da utilização do compactador giratório SUPERPAVE (CGS) na dosagem das camadas porosas de atrito. Na ocasião, utilizou o mesmo tipo de ligante asfáltico desta pesquisa (AMP 55/75-E) e encontrou os volumes de vazios 22,45%; 17,60%; 19,49%; 18,89%; 18,14% para os teores de ligantes asfálticos de 3,50%; 4,00%; 4,50%; 5,00%; 5,50%, respectivamente. É perceptível que os resultados encontrados nesta pesquisa utilizando o ligante asfáltico I, são os mesmos encontrados por Nóbrega (2021), para os teores de ligantes 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%.

4.3.3 Desgaste por abrasão - Cântabro

De acordo com a especificação 386/99 do DNIT, o ensaio de Cântabro não pode haver uma perda de massa superior a 25%. A porcentagem de desgaste é calculada por meio da Equação 3.2 e os resultados foram utilizados para traçar os gráficos apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5, juntamente com os teores dos ligantes I e II.

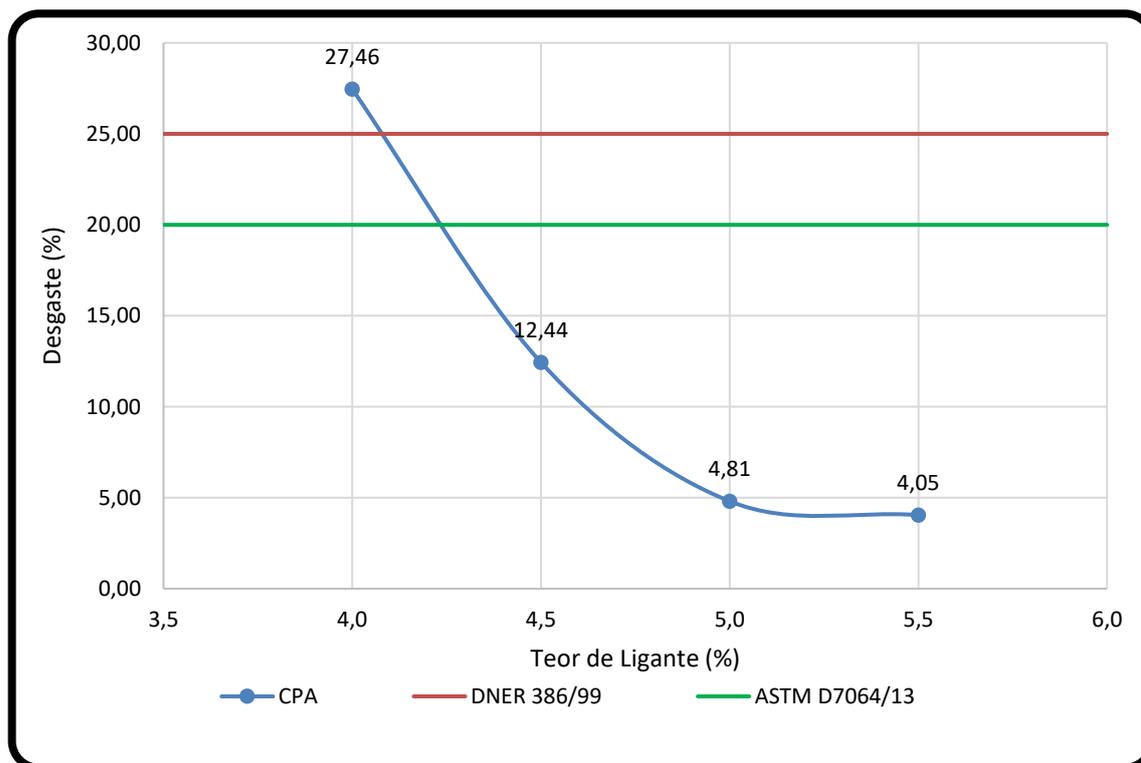
Figura 4.4 – Curva da % de desgaste versus teor de ligante I.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Ao analisar a Figura 4.4, nota-se que todas as misturas do ligante I, apresentaram valores inferiores ao estabelecido como máximos para as normas, com destaque para o teor de 4,0% que apresentou valor próximo ao limite. A mistura com menor porcentagem de desgaste foi a com teor de 5,0% de ligante. Os valores encontrados corroboram com os da pesquisa de Nóbrega (2021), para os teores asfálticos de 4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5%.

Figura 4.5 – Curva da % de desgaste versus teor de ligante II.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Contudo, ao analisar a Figura 4.5, nota-se que o ligante II em seu teor de 4,0%, apresenta valor superior ao estabelecido como máximo para as normas. A mistura com menor porcentagem de desgaste foi a com teor de 5,5% de ligante.

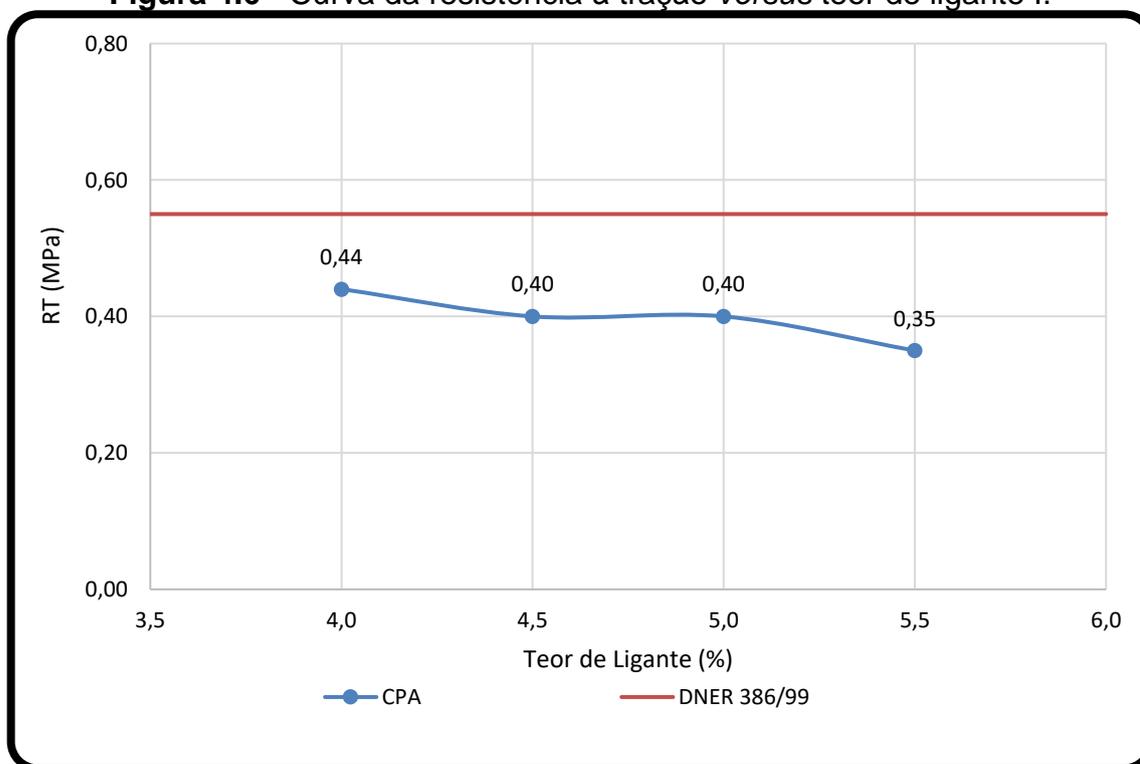
Os ensaios foram realizados em triplicata para cada teor dos ligantes I e II. De forma geral, os resultados obtidos apresentam linearidade para ambos os ligantes I e II. Em outras palavras, quanto maior o teor de ligante, menor tende a ser o desgaste da mistura. Bernucci *et al.* (2022) destaca que o ligante é um material adesivo termoviscoplastico, logo, quanto maior o teor de ligante, mais adesão terá a mistura e mais resistirá ao desgaste.

Dresch (2016) obteve como resultado que o aumento do teor do ligante asfáltico nas misturas CPA, diminui os valores de Cântabro. Tal situação também foi identificada nos resultados desta pesquisa e em Bernucci *et al.* (2022) e Nóbrega (2021).

4.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

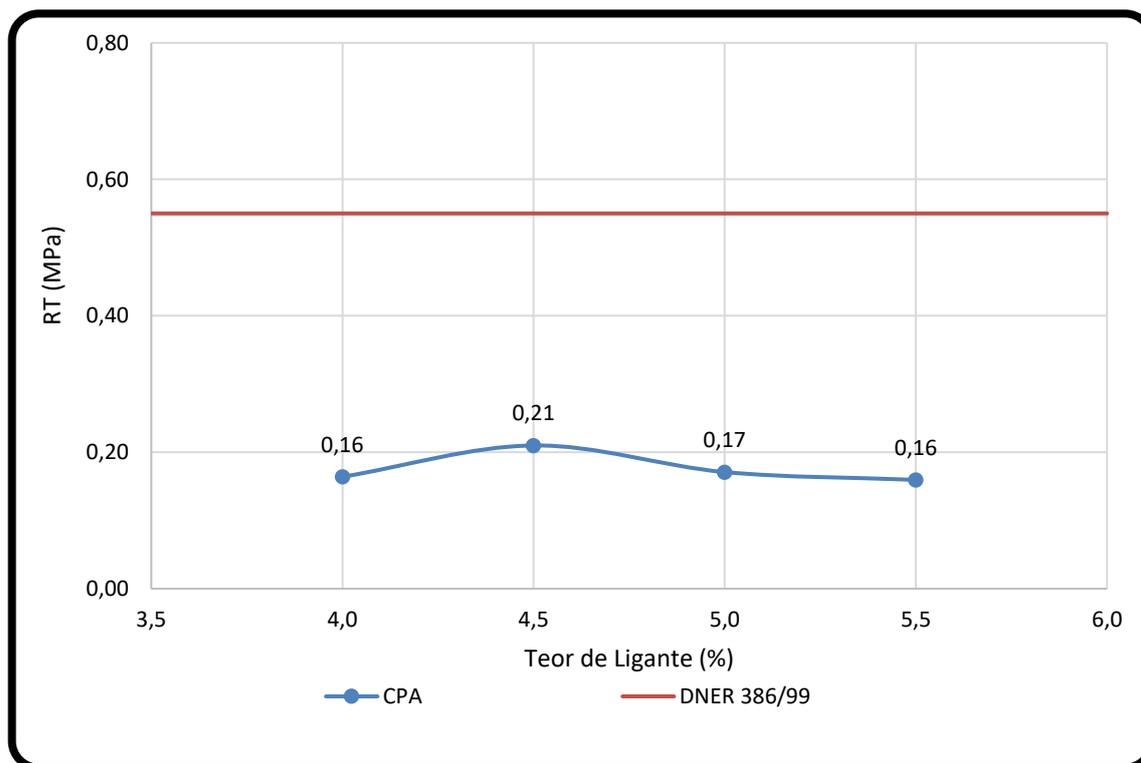
O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado em triplicata para cada teor dos ligantes I e II, segundo as recomendações da DNIT-ME 136/2018. A tensão é calculada por meio da Equação 3.3. Após o cálculo da resistência à tração de todas as misturas, foi traçada a curva apresentada na Figura 4.6 (ligante I) e Figura 4.7 (ligante II).

Figura 4.6 - Curva da resistência à tração versus teor de ligante I.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

É possível observar nas Figuras 4.6 e 4.7 que os ligantes asfálticos I e II não atenderam os valores mínimos de resistência à tração por compressão diametral, estabelecidos pela norma DNER 386/99.

Figura 4.7 - Curva da resistência à tração *versus* teor de ligante II.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Outros tipos de misturas asfálticas ao considerarem a utilização do mesmo ligante asfáltico (AMP 55/75) apresentaram desempenho de resistência à tração de forma satisfatória, o que apontam o ligante como viável. Dessa forma, não é o ligante asfáltico que está comprometendo o desempenho à resistência a tração, mas talvez o volume de vazios ou a faixa granulométrica escolhida. Tais evidências estão expostas a seguir.

Medeiros (2017) analisou o módulo de resiliência das misturas asfálticas em diferentes temperaturas utilizando CAP 50/70 e AMP 55/75. Na ocasião, foi obtido o valor de 1,60 MPa para resistência a tração do ligante AMP 55/75, bem superior ao estabelecido pela norma DNER 386/99.

Barros *et. al.* (2019) estudaram o desempenho mecânico de misturas asfálticas com adição de óleo de soja utilizando o ligante SBS 55/75 e encontraram a resistência a tração de 1,36 MPa para o ligante puro e variando de 1,2 MPa a 1,44 MPa para o ligante adicionado de soja. Os resultados indicam que todas as misturas atendem à tensão mínima estabelecida pela norma DNER 386/99.

Santos e Fernandes Junior (2020), avaliaram o módulo de resiliência de misturas asfálticas com granulometria defina pela faixa de agregados dominantes para o CAP 30/45. Na ocasião, os pesquisadores encontraram Resistência a Tração variando, em média, de 1,51 MPa a 2,09 MPa.

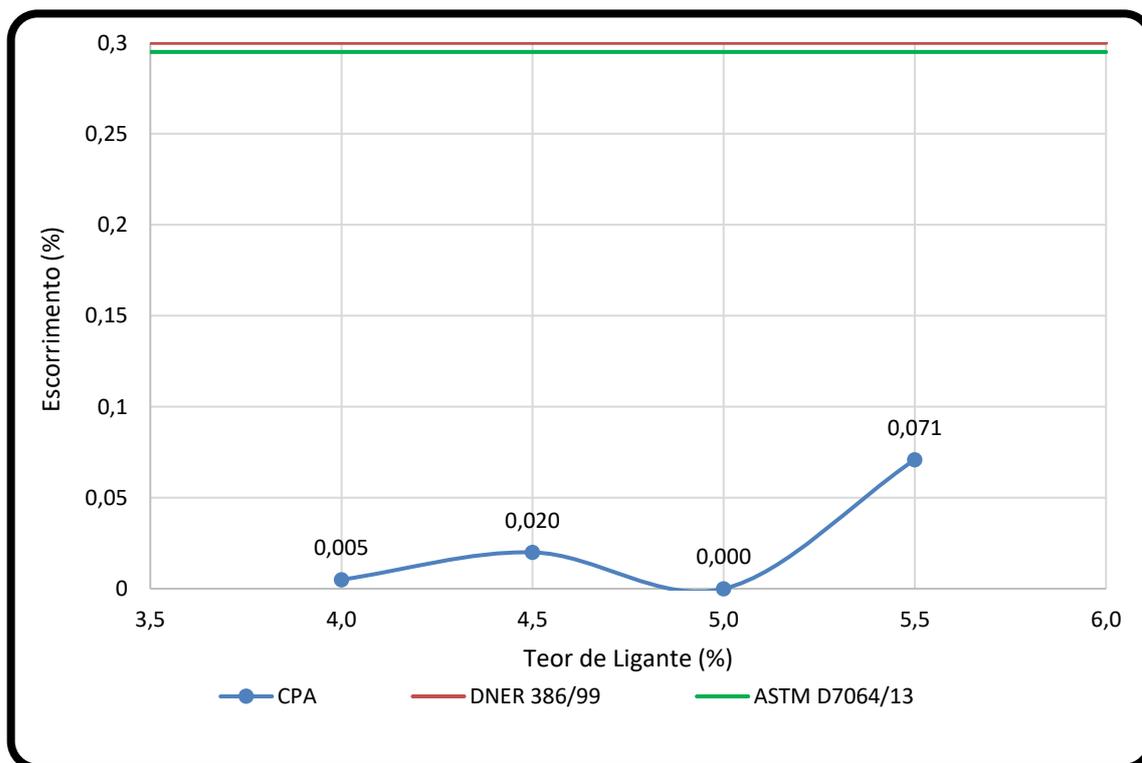
Segundo Santos (2005), o volume de vazios é um parâmetro que varia inversamente ao teor de asfalto, portanto, o comportamento da Resistência a Tração, quando analisado em relação a aumentos de volumes de vazios é contrário ao comportamento quando comparado com o aumento de teor de asfalto.

Diante do exposto, é possível que a gama de valores permitidos pela norma DNIT-ME 386/99, referente a variação de volumes de vazios (entre 18 e 25%), tenha proporcionado que a Resistência a Tração das misturas dos ligantes I e II, não atendessem a condição mínima (0,55 Mpa) exigida pela norma DNER 386/99. Uma mistura asfáltica com volume de vazios menores torna-se mais densa e, conseqüentemente, mais resistente.

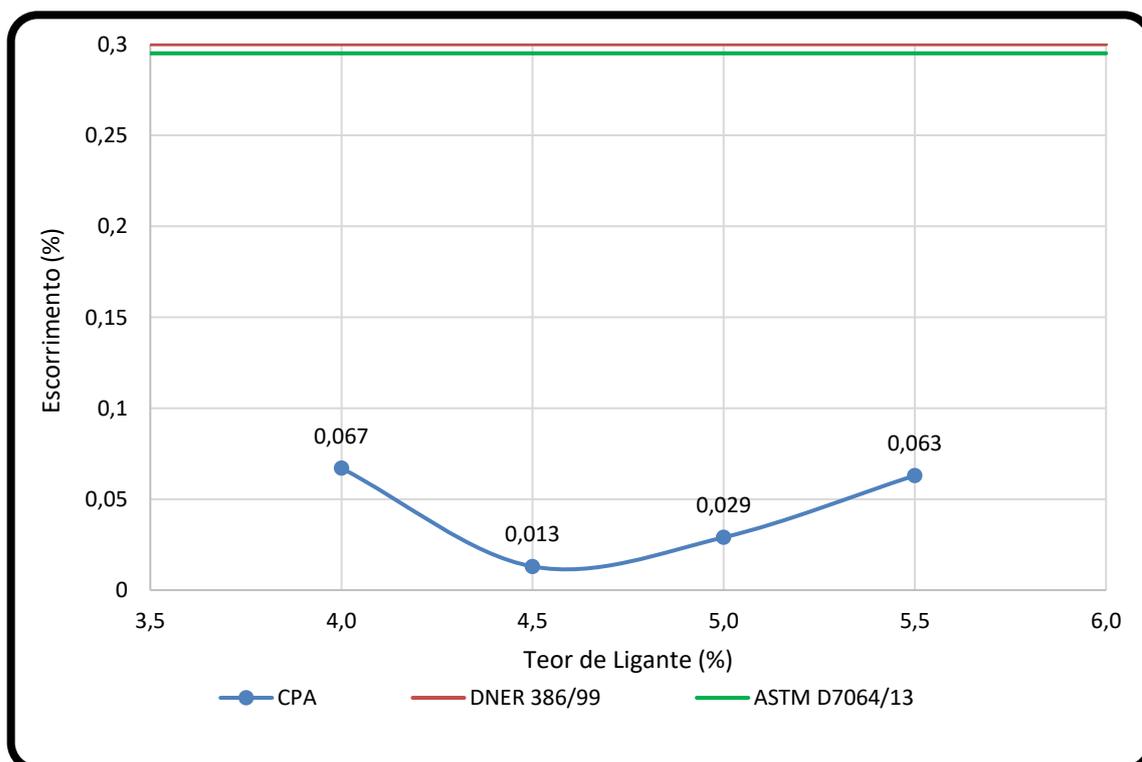
4.3.5 Escorrimento

Para realização do ensaio de escorrimento do ligante foram seguidas as recomendações da ASTM D6390/2017. A porcentagem de escorrimento é determinada por meio da Equação 3.4 e, para atender a norma, não deve ser superior a 0,3% para misturas asfálticas porosas do tipo CPA.

Após o cálculo do escorrimento foi traçada a curva apresentada na Figura 4.8 e Figura 4.9 para os ligantes asfálticos I e II, respectivamente. Os ensaios de escorrimento foram realizados em duplicata para cada teor dos ligantes I e II. Analisando os gráficos das Figuras 4.8 e 4.9, percebe-se que todas as misturas dos ligantes I e II, atenderam a condição de escorrimento inferior a 0,3%.

Figura 4.8 - Curva do escorrimento *versus* teor de ligante I.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Figura 4.9 - Curva do escorrimento *versus* teor de ligante II.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Comumente encontram-se na literatura diversos trabalhos que adicionam materiais fibrosos aos ligantes asfálticos com o intuito de reduzir o escorrimento e, conseqüentemente, atender as recomendações da ASTM D6390/2017 (SILVA *et al.*, 2019; PAZINATTO, 2014; NEVES FILHO, 2004). Contudo, o índice de escorrimento é inversamente proporcional a trabalhabilidade do ligante asfáltico. Nesta pesquisa, verifica-se que não se faz necessário a utilização de materiais fibrosos aos ligantes asfálticos, o que o torna economicamente mais acessível.

4.3.6 Teor de Projeto de Ligante

A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos nesta pesquisa. É possível verificar que os valores destacados na cor vermelha não atenderam as normas.

Diante do exposto, com base nos resultados de volume de vazios, porcentagem de desgaste, resistência à tração e escorrimento, determinou-se o teor de projeto da pesquisa, sendo este 4,5% de ligante, em relação à massa da mistura asfáltica. Ao analisar os resultados, nota-se que para todos os ensaios, o teor de 4,5% de uma forma geral, foi o que apresentou os valores que melhor satisfazem os limites estabelecidos pelas normas, brasileira e americana.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos nesta pesquisa

Ensaio	Teor de Ligante Asfáltico I (%)				Teor de Ligante Asfáltico II (%)			
	4,0	4,5	5,0	5,5	4,0	4,5	5,0	5,5
Volume de Vazios (%)	17,60	19,49	18,89	18,14	23,10	22,16	21,60	19,72
Cântabro (%)	19,76	12,09	8,26	8,92	27,46	12,44	4,81	4,05
Resistência à Tração (Mpa)	0,44	0,40	0,40	0,35	0,16	0,21	0,17	0,16
Escorrimento (%)	0,005	0,020	0,000	0,071	0,067	0,013	0,029	0,063

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas bem como as sugestões para pesquisas futuras que proporcionem a ampliação dos conhecimentos referentes ao tema.

5.1 Conclusões

Esta pesquisa objetivou realizar um estudo teórico-experimental sobre a dosagem da Camada Porosa de Atrito (CPA) mostrando sua eficiência como alternativa sustentável de pavimento em centros urbanos. Percebe-se que a CPA apresenta vantagens que sobressaem em comparação ao asfalto convencional, sobretudo, pela adição de polímero ao ligante e pela porcentagem de vazios, garantida pela granulometria aberta adotada. A CPA facilita as condições de tráfego de veículos, possui uma capacidade elevada de drenagem, redução da lâmina d'água e, conseqüentemente dos borrifos de água, reflexo luminoso e da hidroplanagem.

Por meio da caracterização dos agregados e dos ligantes I e II (AMP 5575), foi possível concluir que:

- A granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizada de acordo com a norma DNIT-ME 083/98 no qual os agregados graúdos utilizados apresentaram uma granulometria uniforme, já o pó de pedra apresentou uma granulometria densa. Dessa forma, os agregados graúdos e miúdos foram considerados adequados para uso em misturas asfálticas;
- Foram utilizados dois ligantes asfálticos nesta pesquisa (CAP AMP 55/75), fornecido por duas empresas distintas que se caracterizou como Ligante Asfáltico I e Ligante Asfáltico II. Todos os resultados obtidos nos ensaios ficaram dentro dos limites estabelecidos por suas respectivas normas, viabilizando assim, o uso dos ligantes nesta pesquisa.

Para a dosagem, seguiu-se as especificações da norma americana ASTM D7064/2013 utilizando os Ligantes Asfálticos I e II, para a mistura asfáltica do tipo

CPA. Ademais, foram analisados os teores de ligante de 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%. Dessa forma, concluiu-se que:

- Os ensaios de volume de vazios mostraram que apenas o ligante I à 4,0% apresentou um volume de vazios abaixo de 18% (limite mínimo), os demais teores do ligante I e o ligante II, em todos os teores analisados, apresentam compatibilidade às normas DNIT-ME 386/99 e ASTM D7064-13;
- O desgaste por abrasão (cântabro) apresentou linearidade para ambos os ligantes I e II. Os resultados se comportaram de acordo com a literatura, quanto maior o teor de ligante, menor tende a ser o desgaste da mistura;
- Os ensaios de escorrimento verificaram-se que todas as misturas dos ligantes I e II, atenderam a condição de escorrimento inferior a 0,3%, atendendo a norma ASTM D6390/2017;
- Para a resistência a tração por compressão diametral verificou-se que todas as misturas dos ligantes I e II, não atenderam a condição mínima exigida pela norma DNER 386/99, que é de 0,55 MPa. Em outras palavras, os ligantes I e II não atendem ao limite da norma para ser utilizada com camada porosa de atrito.

5.2 Considerações para Trabalhos Futuros

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar análise microestrutural dos materiais da mistura asfáltica;
- Analisar ligantes de outras fontes bem como realizar a dosagem com outros valores de teor de ligante.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais Asfálticos - Determinação da penetração de materiais betuminosos sólidos e semi-sólidos, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Ligantes Asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais Betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro de comentos asfálticos modificados por polímeros elastoméricos ou borracha. São Paulo, 2022.

AIREY, Gordon D. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 16, n. 8, p. 473-487, dez. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618\(02\)00103-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618(02)00103-4).

ALVAREZ, Alex E.; MARTIN, Amy Epps; ESTAKHRI, Cindy. Drainability of Permeable Friction Course Mixtures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 556-564, jun. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000053](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000053).

AMORIM, A. G. **Análise de uma mistura asfáltica reciclada com ácido graxo da borra do óleo de soja**. 2022. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2022.

ANUPAM, K.; SRIRANGAM, S. K.; VARVERI, A.; KASBERGEN, C.; SCARPAS, A.. Microstructural Analysis of Porous Asphalt Concrete Mix Subjected to Rolling Truck Tire Loads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 2575, n. 1, p. 113-122, jan. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2575-12>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7064**: Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design. West Conshohocken, 2013.

AWWAD, M. T.; SHBEEB, L. The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures. **American Journal of Applied Sciences**, v. 4, n. 6, p. 390-396, 2007.

BARRETO, R. C. P. e RIBEIRO, A. J. M. Logística no Brasil: Uma análise do panorama dos modais rodoviários e ferroviários no cenário nacional demonstrando as vantagens e desvantagens das referidas modalidades. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**. v. 5, n. 3, p. 145-176, 2020.

BARRETT, M. E. Effects of a Permeable Friction Course on Highway Runoff. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 134, p. 646-651, 2008.

BARROS, A. G.; LUCENA, L. C.; SILVÉRIO, L. C.; COSTA, D. B.; ZIEGLER, C. R.; PATRICIO, J. D. **Desempenho mecânico de misturas asfáltica com adição de óleo de soja**. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú – SC, 2019.

BENEDETTO, A.; UMILIACO, A. Evaluation of Hydraulic Permeability of Open-Graded Asphalt Mixes Using a Full Numerical Simulation. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 599-606, abr. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000865](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000865).

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras e Abeda, 2022.

CARVALHO, F. S. S.; LUCENA, A. E. F. L.; MELO NETO, O. M.; PORTO, T. R.; PORTO, T. M. R. Analysis of mechanical parameters of asphalt mixtures with addition of metal oxides. **Revista Matéria**, v. 26, n. 03, jun. 2021.

CHEN, J., LI, H., HUANG, X. e WU, J. Permeability Loss of Open-Graded Friction Course Mixtures due to Deformation-Related and Particle-Related Clogging: Understanding from a Laboratory Investigation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, V. 27, Nº 11, p.1-7. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ES 386**: Pavimento – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito: Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1999.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT-ME 131**: 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-ME 136: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2018.

DRESCH, F. **Comportamento de misturas asfálticas tipo camada porosa de atrito (CPA).** 2016. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

DUARTE, E. V. N.; RODRIGUES, J. K. G. R.; MENDONÇA, A. M. G. D.; MELO NETO, O. M.; COSTA, D. B.; LIMA, R. K. B. Rheological Properties of Asphalt Binder Modified With Reactive/Non-Reactive Polymer and Polyphosphoric Acid. **Transportation Research Record.** v. 2677, n. 3, p. 1567-1578, 2023.

FERREIRA, W. L. G., CASTELO BRANCO, V. T. F. e SILVA FILHO, F. **Simulação numérica do fluxo d'água em pavimentos flexíveis compostos por diferentes misturas asfálticas.** In: XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (2014). Curitiba/PR – Brasil.

GARCIA, E. S. H. **Análise da redução da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes em função da redução do volume de vazios.** 2017. 171 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

GHAUCH, Ziad G.; OZER, Hasan; AL-QADI, Imad L.. Micromechanical finite element modeling of moisture damage in bituminous composite materials. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 80, p. 9-17, abr. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.118>.

HAMZAH, Meor Othman; HARDIMAN. CHARACTERIZATION OF THE CLOGGING BEHAVIOUR OF DOUBLE LAYER POROUS ASPHALT. **Journal Of The Eastern Asia Society For Transportation Studies**, [S.L.], v. 6, p. 968-980, 2005. Eastern Asia Society for Transportation Studies. <http://dx.doi.org/10.11175/easts.6.968>.

HAMZAH, Meor Othman; HASAN, Mohd Rosli Mohd; VEN, Martin van de. Permeability loss in porous asphalt due to binder creep. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 30, p. 10-15, maio 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.038>.

HUBER G. **Performance survey on open-graded friction course mixes.** NCHRP Synthesis of Highway Practice 284. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C.; 2000.

JACQUES, G. E. **Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA).** 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

KANDHAL, P. S. **Design, construction and maintenance of open-graded asphalt friction courses.** Information Series 115. National Asphalt Pavement Association. Lanham, MD, 2002.

KRINGOS, N.; SCARPAS, A.. Raveling of Asphaltic Mixes Due to Water Damage. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 1929, n. 1, p. 79-87, jan. 2005. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0361198105192900110>.

LAGOS-VARAS, M.; MOVILLA-QUESADA, D.; RAPOSEIRAS, A.C.; ARENAS, J.P.; CALZADA-PÉREZ, M.A.; VEGA-ZAMANILLO, A.; LASTRA-GONZÁLEZ, P. Influence of limestone filler on the rheological properties of bituminous mastics through susceptibility master curves. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 231, p. 117126, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117126>.

LIAO, Gongyun; SAKHAEIFAR, Maryam S.; HEITZMAN, Michael; WEST, Randy; WALLER, Brian; WANG, Shengyue; DING, Yangmin. The effects of pavement surface characteristics on tire/pavement noise. **Applied Acoustics**, [S.L.], v. 76, p. 14-23, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.07.012>.

LOPES, Letícia Nunes; FARIAS, Márcio Muniz de; MELLO, Luiz Guilherme Rodrigues de. Fatigue tests and damage analyses in modified binders and gap-graded asphalt mixtures with Reacted and Activated Rubber – RAR. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 22, n. 7, p. 1616-1636, 9 jan. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2019.1710553>.

LYONS, Kimberly R.; PUTMAN, Bradley J.. Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 49, p. 772-780, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.076>.

MANRIQUE-SANCHEZ, Laura; CARO, Silvia; ARÁMBULA-MERCADO, Edith. Numerical modelling of ravelling in porous friction courses (PFC). **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 668-689, 29 dez. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1269661>.

MANSOUR, Talat N.; PUTMAN, Bradley J.. Influence of Aggregate Gradation on the Performance Properties of Porous Asphalt Mixtures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 281-288, fev. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000602](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000602).

MARTIN, William D.; PUTMAN, Bradley J.; NEPTUNE, Andrew I.. Influence of Aggregate Gradation on Clogging Characteristics of Porous Asphalt Mixtures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 26, n. 7, p. 1-7, jul. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000975](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000975).

MEDEIROS, F. F. **Análise do módulo de resiliência das misturas asfálticas em diferentes temperaturas**. 2017. 46 f. TCC (Graduação), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**, Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MELO NETO, Osires de Medeiros; SILVA, Ingridy Minervina; LUCENA, Leda Christiane de Figueiredo Lopes; LUCENA, Luciana de Figueiredo Lopes; MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte; LIMA, Robson Kel Batista de. Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 349, p. 128728, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128728>.

MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte; MELO NETO, Osires de Medeiros; RODRIGUES, John Kennedy Guedes; SILVANI, Carina; LIMA, Robson Kel Batista de. Physicochemical and rheological effects of the incorporation of micronized polyethylene terephthalate in asphalt binder. **Petroleum Science And Technology**, [S.L.], v. 40, n. 7, p. 822-838, 8 fev. 2022. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10916466.2021.2007124>.

MESQUITA, Lígia. Crise revela dependência de transporte rodoviário que é 'mais barato e dá voto'. BBC Brasil, 24 Mai. 2018. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-44247460>>. Acesso em: 14/05/2023.

MOGHADDAM, Taher Baghaee; KARIM, Mohamed Rehan; SYAMMAUN, Tamalkhani. Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 34, p. 236-242, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054>.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha**. 2004. 80 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

NÓBREGA, E. R. **Utilização do computador giratório SUPERPAVE (cgs) na dosagem de misturas asfálticas do tipo camada porosa de atrito (CPA)**. 2021. TCC (Graduação), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

PAZINATTO, J. A. M. **Estudo comparativo de misturas asfálticas tipo SMA efetuadas com asfalto modificado por polímero e asfalto modificado por borracha**. 2014. 61 f. TCC (Graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

PINHEIRO, J. H. M.. **Incorporação De Borracha De Pneu Em Misturas Asfálticas De Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

POLACCO, Giovanni; STASTNA, Jiri; BIONDI, Dario; ANTONELLI, Federico; VLACHOVICOVA, Zora; ZANZOTTO, Ludovit. Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 280, n. 2, p. 366-373, dez. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.043>.

PORTO, T. R.; LUCENA, A. E. F. L.; GUERRA, T. D.; PORTO, T. M. R.; SILVA, R. L.; ZIEGLER, C. R. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com adição de óxido de ferro**. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, Gramado – RS, 2018.

PUTMAN, Bradley J.; KLINE, Laura C.. Comparison of Mix Design Methods for Porous Asphalt Mixtures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 24, n. 11, p. 1359-1367, nov. 2012. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000529](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000529).

QUEIROZ, R. F. R.; CARVALHO, J. R.; DUARTE, E. V. N.; RODRIGUES, J. K. G. **Estudo da fadiga em mistura asfáltica por meio do ensaio de fadiga à tração direta uniaxial cíclico**. V CONAPESC, 2018.

RASMUSSEN, R. O., BERNHARD, R. J., SANDBERG, U., e MUN, E. P. **The Little Book of Quieter Pavements**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2007.

SANGITA; KHAN, Tabrez Alam; SABINA; SHARMA, D.K.. Effect of waste polymer modifier on the properties of bituminous concrete mixes. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 25, n. 10, p. 3841-3848, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.003>.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. 2005. 123 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANTOS, E. F.; FERNANDES JUNIOR, J. L. **Avaliação do módulo de resiliência de misturas asfálticas com granulometria definida pela faixa de agregados dominantes**. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2020.

SILVA, Conrado Cesar Vitorino Pereira da; MELO NETO, Osires de Medeiros; RODRIGUES, John Kennedy Guedes; MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte; ARRUDA, Sonaly Mendes; LIMA, Robson Kel Batista de. Evaluation of the rheological effect of asphalt binder modification using Linum usitatissimum oil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 1-12, 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0138>.

SILVA, Y. M.; LUCENA, L. C. F. L.; BARROS, A. G.; COSTA, D. B.; MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação de misturas asfálticas melhoradas com fibra de coco.** 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú – SC, 2019.

SOUSA, T. M. **Estudo de misturas asfálticas mornas modificadas com adição da cera de abelha.** 2020. 107 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

SRIRANGAM, Santosh K.; ANUPAM, Kumar; KASBERGEN, Cor; SCARPAS, Athanasios; CERREZO, Veronique. Study of Influence of Operating Parameters on Braking Friction and Rolling Resistance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 2525, n. 1, p. 79-90, jan. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2525-09>.

SURESHA, S. N., GEORGE, V. e A. U. R. SHANKAR. **Effect of aggregate gradations on properties of porous friction course mixes.** *Materials and Structures*, V. 43, p. 789- 801, 2010.

SURESHA, S. N.; GEORGE, Varghese; SHANKAR, A. U. Ravi. Effect of aggregate gradations on properties of porous friction course mixes. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 43, n. 6, p. 789-801, 15 set. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-009-9548-1>.

UNDERWOOD, B. Shane; KIM, Y. Richard. Effect of volumetric factors on the mechanical behavior of asphalt fine aggregate matrix and the relationship to asphalt mixture properties. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 49, p. 672-681, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.045>.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte e meio ambiente: conceitos e informações para análise de impactos.** 1ª Ed. São Paulo: ANNABLUME, 2008.

WANG, Chonghui; WANG, Hainian; OESER, Markus; HASAN, Mohd Rosli Mohd. Investigation on the morphological and mineralogical properties of coarse aggregates under VSI crushing operation. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 22, n. 12, p. 1611-1624, 22 jan. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2020.1714043>.

WURST, James E.; PUTMAN, Bradley J.. Laboratory Evaluation of Warm-Mix Open Graded Friction Course Mixtures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 403-410, mar. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000611](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000611).

ZHANG, Jun; ALVAREZ, Alex E.; LEE, Sang Ick; TORRES, Angela; WALUBITA, Lubinda F. Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 44, p. 391-398, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.013>.

ZHANG, Xuefei; ZHANG, Kun; WU, Chaofan; LIU, Kefei; JIANG, Kang. Preparation of bio-oil and its application in asphalt modification and rejuvenation: a review of the properties, practical application and life cycle assessment. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 262, p. 120528, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120528>.