



Universidade Federal De Campina Grande - UFCG
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECA

**ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE AGREGADO POROSO, SATURADO EM
ÓLEO DE SOJA RESIDUAL, NO REJUVENESCIMENTO DE CAMADAS
POROSAS DE ATRITO**

TALITA MIRANDA DE SOUSA

Campina Grande – Paraíba

2024

TALITA MIRANDA DE SOUSA

**ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE AGREGADO POROSO, SATURADO EM
ÓLEO DE SOJA RESIDUAL, NO REJUVENESCIMENTO DE CAMADAS
POROSAS DE ATRITO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor(a) em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia.

Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Lêda Christiane de F. Lopes Lucena

Campina Grande – Paraíba

2024

S725a

Sousa, Talita Miranda de.

Análise do efeito da adição de agregado poroso, saturado em óleo de soja residual, no rejuvenescimento de camadas porosas de atrito / Talita Miranda de Sousa. – Campina Grande, 2024.

201 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, Profa. Dra. Lêda Christiane de F. Lopes Lucena".

Referências.

1. Camada Porosa de Atrito (CPA). 2. Agentes Rejuvenescedores. 3. Envelhecimento. 4. Vermiculita. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Lucena, Lêda Christiane de F. Lopes. Título.

CDU 625.85(043)

TALITA MIRANDA DE SOUSA

**ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE AGREGADO POROSO, SATURADO EM
ÓLEO DE SOJA RESIDUAL, NO REJUVENESCIMENTO DE CAMADAS
POROSAS DE ATRITO**

Área de Concentração: Geotecnia

Tese defendida e aprovada em: 08 / 08 / 2024

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr. Adriano Elísio de
Figueiredo Lopes Lucena**
Orientador
Universidade Federal de Campina
Grande

**Prof.^a Dr.^a Lêda Christiane de
Figueiredo Lopes Lucena**
Coorientadora
Universidade Federal de Campina
Grande

**Prof. Dr. John Kennedy Guedes
Rodrigues**
Examinador Interno
Universidade Federal de Campina
Grande

**Prof.^a Dr.^a Verônica Teixeira Franco
Castelo Branco**
Examinadora Externa
Universidade Federal do Ceará

**Prof.^a Dr.^a Ana Maria Gonçalves
Duarte Mendonça**
Examinadora Interna
Universidade Federal de Campina
Grande

Prof. Dr. Reuber Arrais Freire
Examinador Externo
Universidade Federal de Pernambuco



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): TALITA MIRANDA DE SOUSA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR.ª LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA – PPGECA/UFCG – COORIENTADORA, DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - PPGECA/UFCG - EXAMINADOR INTERNO, DR.ª ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA - EXAMINADORA INTERNA, DR.ª VERÔNICA TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO - EXAMINADORA EXTERNA, DR. REUBER ARRAIS FREIRE - UFPE – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 23/2024). / TITULO DA TESE: “ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE AGREGADO POROSO, SATURADO EM ÓLEO DE SOJA RESIDUAL, NO REJUVENESCIMENTO DE CAMADAS POROSAS DE ATRITO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, SALA DE VIDEOCONFERÊNCIA, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 08 DE AGOSTO DE 2024**

5.

6.

7.

8.

9.

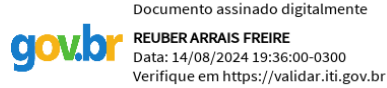
10.

11.

Documento assinado digitalmente
gov.br VERONICA TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCC
Data: 16/08/2024 08:33:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DR.ª VERÔNICA TEIXEIRA FRANCO CASTELO BRANCO - EXAMINADORA EXTERNA

- 12.
- 13.
- 14.
- 15.
- 16.



DR. REUBER ARRAIS FREIRE – EXAMINADOR EXTERNO



Documento assinado eletronicamente por **Talita Miranda de Sousa, Usuário Externo**, em 09/08/2024, às 10:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/08/2024, às 10:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR**, em 09/08/2024, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 09/08/2024, às 10:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 09/08/2024, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA, Usuário Externo**, em 10/08/2024, às 21:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4561236** e o código CRC **A97192E1**.

DEDICATÓRIA

Ao meu amado pai, Cláudio Oliveira, e aos meus queridos avós, Joaquim e Odelita, cujo amor, sabedoria e dedicação incondicionais foram uma luz constante ao longo de minha vida e continuam a inspirar-me. Embora não estejam fisicamente presentes para testemunhar este momento, seu legado e valores permanecem profundamente enraizados em mim. Cada página deste trabalho é uma homenagem ao impacto transformador que vocês tiveram em minha formação, como pessoa e profissional. Vocês serão eternamente lembrados e celebrados em cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por guiar meus passos e iluminar meu caminho ao longo de toda minha vida. A Ele devo toda minha força e perseverança.

Aos meus queridos pais, Elcirene e Cláudio (*in memoriam*), minha gratidão eterna pelo amor incondicional, incontáveis sacrifícios e pelos valores que me ensinaram. Vocês são minha inspiração diária e tudo que alcancei é reflexo do amor e dedicação que sempre me proporcionaram.

Aos meus irmãos, Túlio e Júlio, agradeço a cumplicidade e por serem meu porto seguro. Vocês são minha base sólida.

Ao meu amado noivo, Éltton Sângellys, sou imensamente grata pelo amor, paciência e compreensão demonstrados ao longo dessa jornada desafiadora. Agradeço por sempre acreditar em mim e por ser meu maior apoiador em cada passo desta trajetória.

Ao Prof. Adriano Lucena, meu orientador desde os primeiros passos na graduação até a conclusão deste doutorado, meu muito obrigada. Ao longo dos anos, não apenas compartilhou seu saber acadêmico, mas também guiou meu crescimento profissional, sempre encorajando a excelência e desafiando-me a alcançar novos patamares, sendo fundamental para minha formação como pesquisadora. Sou imensamente grata por sua paciência, apoio e por acreditar em meu potencial desde o início.

Meu muito obrigada à minha coorientadora, Prof. Leda, por ter tido a oportunidade de aprender com uma pesquisadora tão distinta e comprometida. Sua dedicação, profundo conhecimento na área e seu comprometimento com a excelência acadêmica foram verdadeiramente inspiradores ao longo da minha formação. Além de sua orientação acadêmica, sou grato por suas discussões instigantes, que contribuíram significativamente para o desenvolvimento desta pesquisa.

Minha profunda gratidão aos professores Ana Maria, John Kennedy, Verônica Castelo Branco e Reuber Arrais, por suas valiosas contribuições. Vocês foram fundamentais para o aprimoramento deste trabalho, além das suas experiências e conhecimentos enriquecerem significativamente este processo.

Gratidão aos professores Conceição, do Laboratório de Fitoquímica da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), e José George, do Laboratório de Fitossanidade do Semiárido da UFCG, por possibilitarem que a recuperação dos ligantes fosse feita.

Além disso, agradeço ao Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO) da UFCG, e ao Laboratório de Pesquisa de Materiais Multifuncionais e Nanocompósitos (LAMMEN) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), pela realização das espectroscopias no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). O suporte dessas instituições e dos seus respectivos profissionais foram determinantes para a obtenção dos dados e resultados.

Além disso, quero dedicar um agradecimento especial aos meus amigos Luana, Rodrigo, Alana, Priscila, Adileuda, Eugênio e Tatiane. Mesmo que a distância tenha separado nossos caminhos durante parte deste período de estudo, o carinho e a amizade que nos une, permaneceram. As palavras de incentivo e o apoio emocional que vocês me ofereceram foram fundamentais para conclusão desta etapa. Agradeço por entenderem os desafios deste caminho e por continuarem sendo uma fonte constante de alegria, motivação e suporte. Sua amizade é um tesouro que valorizo imensamente.

Aos amigos que o LEP me proporcionou, Osires, Albaniza, Maria Ingridy, Flávia, Rakel, Alcidney, Conrado e Lara, agradeço por toda ajuda e amizade que tornaram o trabalho mais leve e prazeroso. Além disso, gostaria de estender meus agradecimentos aos colaboradores do laboratório, Ladjane, Joseildo, Jadilson e Arthur, pela maneira como cada um contribuiu para a conclusão deste projeto. Suas colaborações foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Minha profunda gratidão à Universidade Federal de Campina Grande, minha casa acadêmica ao longo dos últimos anos. Durante minha jornada acadêmica, desde a graduação até o doutorado, encontrei na UFCG não apenas um ambiente de aprendizado e pesquisa, mas também uma comunidade acolhedora de professores, colegas e funcionários dedicados.

Por fim, expresso minha gratidão às agências de fomento, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo suporte financeiro que viabilizou esta pesquisa.

Cada um de vocês contribuiu de maneira única para o sucesso deste trabalho. Sou profundamente grata por fazerem parte da minha jornada acadêmica e pessoal.

RESUMO

Os alagamentos são eventos comuns em grandes centros urbanos devido à impermeabilização do solo natural por materiais artificiais. A integração da gestão das águas pluviais ao planejamento urbano, com o conceito de cidade-esponja, surge como alternativa para mitigar os impactos desta problemática. Neste contexto, a utilização de misturas asfálticas abertas na composição de pavimentos permeáveis é uma técnica que contribui para essas soluções. No Brasil, este tipo de mistura asfáltica é empregado na produção de revestimentos conhecidos como Camada Porosa de Atrito (CPA) e possui elevada porcentagem de vazios, entre 18% e 25%, que permitem a drenagem da água superficial em dias chuvosos. No entanto, o envelhecimento precoce é uma das principais fontes de problemas encontrados em estruturas de CPA, devido ao seu elevado volume de vazios. Por outro lado, a utilização de agentes rejuvenescedores mostra-se uma alternativa atrativa na reversão do envelhecimento do ligante asfáltico. O objetivo desta pesquisa foi analisar o rejuvenescimento de CPAs por meio da adição de Agregado Poroso Saturado em Óleo de Soja Residual (APSOSR). Para isso, foram realizadas análises químicas e reológicas dos ligantes, extraídos e recuperados, de três variações de CPAs: duas com adição de APSOSR, resultando em 0,5% e 0,7% de óleo de soja residual em relação ao peso da mistura asfáltica, e uma mistura pura. Além disso, verificou-se o comportamento mecânico e funcional dessas misturas, que foram submetidas a protocolos de envelhecimento e envelhecimento/carregamento cíclico. O protocolo de envelhecimento incluiu a combinação de envelhecimento de curto e longo prazo, no qual os corpos de prova compactados foram mantidos em estufa convencional e, em seguida, submetidos à chuva simulada, considerando que os parâmetros que mais interferem no envelhecimento de uma CPA são a temperatura e a umidade. A etapa de carregamento cíclico foi adicionada com o intuito de verificar as possíveis variações na difusão do óleo na mistura quando submetida ao tráfego. A análise química foi realizada para determinar os níveis de oxidação e para identificar, qualitativa e/ou semiquantitativa, a presença de aditivo orgânico nos ligantes. Quanto às propriedades reológicas, estas foram aferidas por meio dos ensaios de *Performance Grade* (PG), *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR), curva mestra e *Linear Amplitude Sweep* (LAS). Em relação à funcionalidade e às propriedades mecânicas, a análise foi baseada nos ensaios de escoamento, volume de vazios, vazios comunicantes, comportamento drenante, permeabilidade, cântabro, resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida e módulo de resiliência. Diante dos resultados, percebeu-se que a adição de óleo, nos teores de 0,5% e 0,7%, mostrou tendências similares, sem diferenças estatisticamente significativas. No entanto, o teor de 0,5% apresentou um desempenho ligeiramente superior, com maior redução nos índices de oxidação em todas as condições analisadas e menor impacto na RT após o envelhecimento. De modo geral, o agregado poroso mostrou-se viável como veículo para agentes rejuvenescedores, oferecendo uma solução para rejuvenescer camadas porosas de atrito sem impactar significativamente as propriedades funcionais e volumétricas da mistura. Contudo, os métodos de extração e recuperação do ligante não proporcionaram resultados consistentes quanto à restauração das propriedades reológicas dos ligantes envelhecidos, não sendo possível atestar a efetiva ação do óleo.

Palavras-chaves: Agentes rejuvenescedores, Envelhecimento, Vermiculita.

ABSTRACT

Floods are common events in large urban centers due to the impermeabilization of natural soil by artificial materials. Integrating stormwater management into urban planning, with the concept of a sponge city, emerges as an alternative to mitigate the impacts of this issue. In this context, the use of open-graded asphalt mixtures in the composition of permeable pavements is a technique that contributes to these solutions. In Brazil, this type of asphalt mixture is used in the production of coatings known as Porous Friction Course (PFC) and has a high percentage of voids, between 18% and 25%, allowing for the drainage of surface water on rainy days. However, premature aging is one of the main issues encountered in PFC structures, due to their high void volume. On the other hand, the use of rejuvenating agents proves to be an attractive alternative in reversing asphalt binder aging. The objective of this research was to analyze the rejuvenation of PFCs through the addition of Porous Aggregate Saturated with Residual Soybean Oil (PASRSO). For this purpose, chemical and rheological analyses of the binders, extracted and recovered, from three variations of PFCs were conducted: two with the addition of PASRSO, resulting in 0.5% and 0.7% residual soybean oil relative to the weight of the asphalt mixture, and one pure mixture. Additionally, the mechanical and functional behavior of these mixtures was examined, which were subjected to aging and aging/cyclic loading protocols. The aging protocol included a combination of short-term and long-term aging, where compacted specimens were kept in a conventional oven and then subjected to simulated rain, considering that the parameters that most influence the aging of PFCs are temperature and humidity. The cyclic loading stage was added to assess potential variations in oil diffusion within the mixture under traffic conditions. Chemical analysis was conducted to determine oxidation levels and to qualitatively and/or semi-quantitatively identify the presence of organic additive in the binders. Regarding rheological properties, these were assessed through Performance Grade (PG), Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), master curve, and Linear Amplitude Sweep (LAS) tests. In terms of functionality and mechanical properties, the analysis was based on rutting tests, void volume, communicating voids, draining behavior, permeability, Cantabro abrasion loss, tensile strength by diametral compression, moisture-induced damage, and resilience modulus. From the results, it was observed that the addition of oil at 0.5% and 0.7% showed similar trends, with no statistically significant differences. However, the 0.5% content showed slightly better performance, with greater reduction in oxidation indices under all analyzed conditions and less impact on RT after aging. Overall, porous aggregate proved feasible as a carrier for rejuvenating agents, offering a solution to rejuvenate porous friction course layers without significantly impacting the functional and volumetric properties of the mixture. However, the methods of binder extraction and recovery did not consistently restore the rheological properties of aged binders, making it difficult to confirm the effective action of the oil.

Keywords: Rejuvenating agents, Aging, Vermiculite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vazões máximas conforme uso e ocupação do solo.....	29
Figura 2 - a) Pavimento drenante; (b) Camada porosa de atrito; (c) Pavimento convencional.....	30
Figura 3 – Tipos de poros.....	31
Figura 4 – Trecho em CPA seguido por treco em CA	40
Figura 5 – Esquema do mecanismo de degradação	41
Figura 6 - Esquema de esforços em pavimentos do tipo CPA	41
Figura 7 - Camada porosa dupla	46
Figura 8 – Índice de envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de usinagem, estoque, transporte, compactação e vida útil da camada asfáltica.....	48
Figura 9 - Esquema do fracionamento SARA.....	50
Figura 10 - Frações SARA de um ligante asfáltico, antes e após envelhecimento de curto prazo (RTFOT)	50
Figura 11 - Espectros de FTIR para amostras de ligante asfáltico modificado com cera	51
Figura 12 - Tipos de cápsulas: a) partículas de areia porosa com revestimento à base de cimento; b) cápsulas de pré-polímero de MMF; c) cápsulas de alginato; d) e e) –fibras de alginato com bolsas contendo rejuvenescedor	56
Figura 13 - Diagrama esquemático da estrutura da vermiculita.	65
Figura 14 - Esquema simplificado do processamento da vermiculita.	65
Figura 15 - Imagens do MEV da vermiculita expandida.	66
Figura 16 - Sequência de atividades realizadas em todas as etapas da pesquisa...	71
Figura 17 – Detalhamento da 1ª etapa da pesquisa.....	72
Figura 18 – Sequência de ensaios para determinação do teor de projeto de ligante, da mistura.....	72
Figura 19 - Etapa de caracterização das misturas	73
Figura 20 – Materiais utilizados na produção do APSOR: a) Vermiculita expandida média e, b) Óleo de soja residual.....	74
Figura 21 - Distribuição granulométrica dos agregados	78
Figura 22 - Distribuição granulométrica da vermiculita	80
Figura 23 – Representação esquemática do método de impregnação.	81

Figura 24 – Vermiculita expandida: a) antes do processo de impregnação e, b) após o processo de impregnação em óleo.....	82
Figura 25 – Processo de saturação da vermiculita expandida	82
Figura 26 – Amostra submetida ao ensaio de calcinação em mufla, a) antes e, b) após.	83
Figura 27 - Curva da composição granulométrica da CPA.	85
Figura 28 – Curva Temperatura versus Viscosidade, para determinação das temperaturas de usinagem e compactação.....	86
Figura 29 – Composição granulométrica testada na Faixa II.....	89
Figura 30 – Nova composição granulométrica Faixa V, com adição da brita 9,5mm.	90
Figura 31 – Curva volume de vazios versus teor de ligante.	95
Figura 32 – Curva da % de desgaste versus teor de ligante.	96
Figura 33 - Curva do escorrimento versus teor de ligante.....	97
Figura 34 – Adição da vermiculita saturada à mistura asfáltica.....	100
Figura 35 – Comparação entre as misturas asfálticas: a) Com APSOR e, b) Sem APSOR.....	100
Figura 36 – Protocolo de envelhecimento combinado entre a) estufa convencional e, b) simulador de chuva	102
Figura 37 – Processo de extração e recuperação do ligante.....	105
Figura 38 – Configuração do aparelho de extração Soxhlet.....	106
Figura 39 - Permeâmetro de parede flexível TRI-Flex 2.....	114
Figura 40 - Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral.....	115
Figura 41 - Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico.	120
Figura 42 - Espectro de FTIR para a amostra de óleo de soja residual.	121
Figura 43 – Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico, extraídas dos corpos de prova.....	123
Figura 44 – Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico recuperado.	123
Figura 45 - Índices de carbonila em função do nível de envelhecimento para os ligantes puros e rejuvenescidos.	127
Figura 46 - Índices de sulfóxido em função do nível de envelhecimento para os ligantes puros e rejuvenescidos.....	127
Figura 47 - Temperaturas superiores de PG	130

Figura 48 - Estimativa das temperaturas de falha	133
Figura 49 - Índice de Envelhecimento	135
Figura 50 - Módulo de Cisalhamento Dinâmico versus Temperatura	136
Figura 51 - Ângulo de Fase versus Temperatura	137
Figura 52 - Compilância não recuperáveis, à 3.200 Pa	138
Figura 53 - Diferença percentual - Jnr, diff	142
Figura 54 - Curvas mestras dos ligantes	144
Figura 55 - Parâmetros "A" e "B" para os ligantes	145
Figura 56 – Curvas de tensão versus deformação dos ligantes recuperados	148
Figura 57 – Estimativa da vida de fadiga dos ligantes recuperados	149
Figura 58 – Resultado do ensaio de escorrimento	152
Figura 59 - Resultado do ensaio de volume de vazios	155
Figura 60 - Resultado do ensaio de vazios comunicantes	160
Figura 61 - Comportamento drenante das misturas envelhecidas	163
Figura 62 – Permeabilidade das misturas, a partir do ensaio de permeabilidade à carga constante	164
Figura 63 – Permeabilidade em função do volume de vazios	166
Figura 64 - Resultado da perda por abrasão	167
Figura 65 - Resultados do ensaio de RT	170
Figura 66 - Resultados do ensaio de Lottman modificado	173
Figura 67 - Resultados de MR	176

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das misturas asfálticas do tipo CPA	42
Tabela 2 - Classificação granulométrica da vermiculita expandida.	67
Tabela 3 - Características físicas e reológicas do AMP 55/75 utilizado na pesquisa.	75
Tabela 4 – Ensaios e resultados da caracterização dos agregados.....	77
Tabela 5 - Quantidade passante acumulada (%)	78
Tabela 6 – Quantidade passante acumulada da vermiculita	79
Tabela 7 - Ensaios e normas utilizadas para dosagem da CPA.....	84
Tabela 8 – Proporção de cada agregado na mistura.....	84
Tabela 9 – Porcentagem passando da mistura de projeto	84
Tabela 10 – TUs e TCs analisadas	87
Tabela 11 – Resultados da primeira rodada de ensaios para dosagem, utilizando o AMP 55/75.....	87
Tabela 12 - Resultados da segunda rodada de ensaios para dosagem, utilizando o AMP 60/85.....	88
Tabela 13 - Resultados da terceira rodada de ensaios para dosagem, utilizando a Faixa II do DNIT 386/99.....	89
Tabela 14 - Resultados da quarta rodada de ensaios para dosagem, para uma nova composição granulométrica.....	91
Tabela 15 - Resultados da quinta rodada de ensaios para dosagem, variando as TU e TC.....	92
Tabela 16 – Parâmetros definidos para caracterização das CPAs.....	99
Tabela 17 – Parâmetros de entrada do carregamento cíclico	104
Tabela 18 – Ensaios base para análise do rejuvenescimento do ligante	104
Tabela 19 – Principais grupos funcionais do ligante asfáltico nos espectros de FTIR	107
Tabela 20 - Classificação de volume de tráfego baseado no valor de Jnr à 3200Pa	110
Tabela 21 – Classificação do FFL (19°C).....	111
Tabela 22 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização, funcional e mecânica, das misturas.	112

Tabela 23 - Índices de oxidação para as amostras de ligante.....	126
Tabela 24 - ANOVA para as temperaturas de PG.....	132
Tabela 25 - Variação das temperaturas de PG e PG contínuo nas amostras dos ligantes.....	133
Tabela 26 - ANOVA para as estimativas de PG contínuo	134
Tabela 27 – ANOVA dos valores de Jnr à 3200 Pa.....	140
Tabela 28 – Classificação dos ligantes quanto ao tipo de tráfego suportado.....	141
Tabela 29 – ANOVA dos valores de Jnr, diff	143
Tabela 30 – ANOVA para o parâmetro “A” dos ligantes recuperados	146
Tabela 31 – ANOVA para o parâmetro “B” dos ligantes recuperados	147
Tabela 32 - Valores estimados para vida de fadiga dos ligantes recuperados.....	150
Tabela 33 - FFL dos ligantes recuperados	151
Tabela 34 – ANOVA para o ensaio de escorrimento.....	153
Tabela 35 - ANOVA para o ensaio de volume de vazios.....	156
Tabela 36 – Resultado das comparações múltiplas entre os VVs das misturas.....	156
Tabela 37 – GMB e GMM das misturas de referência.....	158
Tabela 38 – Aumento de massa médio das amostras submetidas ao simulador de chuva.....	159
Tabela 39 - ANOVA para o ensaio de vazios comunicantes	161
Tabela 40 – Resultado das comparações múltiplas entre os VCs das misturas	162
Tabela 41 – Permeabilidade das misturas, com base na Eq. da Continuidade.....	163
Tabela 42 - ANOVA para o ensaio de cântabro	168
Tabela 43 – Resultado das comparações múltiplas entre as % de desgaste das misturas.....	169
Tabela 44 - ANOVA para o ensaio de resistência à tração	171
Tabela 45 - ANOVA para o ensaio de Lottman	174
Tabela 46 - ANOVA para o ensaio de módulo de resiliência.....	178

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos desenvolvidos no Brasil sobre misturas asfálticas porosas	34
Quadro 2 – Especificações para mistura do tipo CPA, de acordo com DNIT 386/99	43
Quadro 3 – Especificações para mistura do tipo CPA, de acordo com ASTM D7064/21	43
Quadro 4 – Protocolos de envelhecimento em laboratório.....	52
Quadro 5 – Estudos acerca da utilização de óleos em misturas asfálticas.	58
Quadro 6 - Pesquisas relacionadas às possibilidades de aplicações da vermiculita expandida.....	68
Quadro 7 – Análise da granulometria para produção do APSOSR	80
Quadro 8 – Cores e padrões adotados para as misturas e protocolos adotados...	119
Quadro 9 – Comparativo entre o desempenho dos ligantes recuperados das misturas com óleo e dos ligantes recuperados das misturas puras.....	179
Quadro 10 - Comparativo entre o desempenho das misturas com adição do APSOSR e das misturas puras	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Índice de Envelhecimento
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CERTBIO	Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE
CP	Corpo de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DHR	<i>Discovery Hybrid Rheometer</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
FFL	<i>Fator de Fadiga do Ligante</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
LAMMEN	Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LTOA	(Long-Term Oven Ageing)
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
STOA	<i>Short term oven ageing</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>

UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
Vc	Vazios Comunicantes
Vv	Volume de Vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau celsius
cm	Centímetro
cP	Centipoise
D	Diâmetro dos grãos
g	Gramas
Gmb	Massa específica aparente medida (g/cm ³)
Gmm	Densidade máxima medida (g/cm ³)
Hz	Hertz
Kg	Quilograma
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
Nprojeto	Número de giros de projeto no compactador SUPERPAVE
Nmáximo	Número de giros máximo no compactador SUPERPAVE
Ninicial	Número de giros inicial no compactador SUPERPAVE
rpm	Rotação por minuto
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
T°C	Ponto de amolecimento
Jnr	Complância não recuperável
G*	Módulo Complexo de Cisalhamento
s	Segundo
%	Porcentagem
mL	Mililitro
PEN	Penetração
N	Número de ciclos de carregamento que leva a amostra à ruptura
F	Número médio de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga
t	Tonelada
m	Metro
km	Quilômetro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	25
1.1.1	Objetivo Geral	25
1.1.2	Objetivos Específicos	25
1.2	PREMISSAS E HIPÓTESES	26
2.	REVISÃO DA LITERATURA	28
2.1	Problemas associados à impermeabilização do solo	28
2.2	Misturas Asfálticas Porosas	30
2.2.1	Histórico	33
2.3	Camada Porosa de Atrito	39
2.3.1	Normatização	42
2.3.2	Limitações	45
2.4	Envelhecimento do ligante asfáltico	47
2.4.1	Parâmetros utilizados para a análise do envelhecimento	49
2.4.2	Metodologias de envelhecimento em laboratório	52
2.4.3	Técnicas de rejuvenescimento	54
2.4.3.1	Utilização de óleos na pavimentação asfáltica	58
2.4.3.2	Problemática acerca do descarte de óleos de cozinha residuais	62
2.4.3.3	Óleo de soja	63
2.4.3.4	Vermiculita	64
2.5	Considerações Finais	69
3.	METODOLOGIA	71
3.1	Materiais	74
3.1.1	Ligante asfáltico	74
3.1.2	Agregados	74
3.1.3	Agregado poroso saturado em óleo de soja residual (APSOSR)	74
3.2	Métodos	75
3.2.1	Caracterização física e reológica do ligante	75
3.2.2	Caracterização dos agregados	77
3.2.3	Caracterização da vermiculita	79
3.2.4	Produção e caracterização do APSOSR	81
3.2.4.1	Calcinação em mufla	83

3.2.5	Dosagem	83
3.2.5.1	Composição granulométrica da mistura	84
3.2.5.2	Temperaturas de usinagem e compactação	85
3.2.5.3	Moldagem CGS	87
3.2.5.4	Volume de Vazios	93
3.2.5.5	Desgaste por abrasão – Cântabro	95
3.2.5.6	Escorrimento	97
3.2.5.7	Determinação do teor de projeto de ligante e número de giros	98
3.2.6	Incorporação do APSOSR na mistura asfáltica	99
3.2.7	Protocolo de Envelhecimento	100
3.2.8	Protocolo de Envelhecimento e Carregamento Cíclico	103
3.2.9	Análise do envelhecimento dos ligantes recuperados	104
3.2.9.1	Extração e recuperação do ligante	105
3.2.9.2	Análise química	106
3.2.9.3	Análise reológica	108
3.2.9.3.1	Grau de Performance (<i>Performance Grade – PG</i>)	108
3.2.9.3.2	Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (<i>Multiple Stress Creep and Recovery – MSCR</i>)	109
3.2.9.3.3	Varredura de Amplitude Linear (<i>Linear Amplitude Sweep - LAS</i>)	110
3.2.9.3.4	Curva mestra	111
3.2.10	Caracterização funcional e mecânica das misturas	112
3.2.10.1	Vazios comunicantes	112
3.2.10.2	Comportamento drenante	113
3.2.10.3	Permeabilidade	114
3.2.10.4	Resistência à tração por compressão diametral	115
3.2.10.5	Determinação do dano por umidade induzida	115
3.2.10.6	Modulo de resiliência	116
3.2.11	Análise estatística	117
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	119
4.1	Análise química dos ligantes recuperados	120
4.2	Análise reológica dos ligantes recuperados	129
4.2.1	Grau de desempenho – PG	129
4.2.2	Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR	138
4.2.3	Curvas mestras	144

4.2.4	Varredura linear de amplitude de deformação – LAS	145
4.3	Caracterização volumétrica e funcional das misturas	152
4.3.1	Escorrimento	152
4.3.2	Volume de vazios	154
4.3.3	Vazios comunicantes	159
4.3.4	Comportamento drenante.....	162
4.3.5	Permeabilidade	164
4.4	Caracterização mecânica das misturas.....	166
4.4.1	Cântabro.....	166
4.4.2	Resistência à tração.....	170
4.4.3	Dano por umidade induzida	173
4.4.4	Módulo de resiliência	176
4.5	Análise do desempenho dos teores estudados	178
5.	CONCLUSÕES	181
5.1	Considerações finais	181
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	183
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm desempenhado um papel significativo na dinâmica urbana, alterando de maneira profunda e multifacetada a vida nas cidades. Em muitas regiões, observa-se um aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como tempestades severas, ondas de calor prolongadas e enchentes repentinas. Esses fenômenos não afetam apenas a infraestrutura urbana (como estradas, sistemas de água e esgoto, e edifícios), mas também têm impactos diretos na saúde e segurança das pessoas.

Além disso, as mudanças climáticas têm provocado mudanças nos padrões de uso da terra, incentivando práticas de planejamento urbano mais resilientes e sustentáveis, como o aumento da vegetação urbana, a implementação de telhados verdes e o desenvolvimento de sistemas de transporte mais eficientes e menos dependentes de combustíveis fósseis. A adaptação das cidades às mudanças climáticas não é apenas uma questão de infraestrutura física, mas também envolve políticas públicas, educação ambiental e engajamento comunitário para promover a mitigação dos impactos ambientais e sociais dessas transformações.

Transtornos como perdas materiais, ambientais e humanas, decorrentes dos eventos de inundações urbanas deram início às discussões acerca do conceito de cidade-esponja, que consiste na integração da gestão das águas pluviais com projetos de planejamento urbano. O principal objetivo de uma cidade-esponja se baseia na criação de áreas que possam absorver elevados volumes de água e armazená-las até que possam ser lentamente devolvidas ao meio ambiente (FOGEIRO, 2019).

Dentre as técnicas que podem ser utilizadas na criação de uma cidade-esponja, têm-se a construção de biodepressões e sistemas de biorretenção para deter o escoamento das águas pluviais e permitir a infiltração destas. Além disso, pode ser feito o uso de sistemas de drenagem que direcionam o escoamento, e a aplicação de pavimentos permeáveis, que permitem o aumento da absorção hídrica (GALDINO, 2022).

Os pavimentos permeáveis, quando flexíveis, são compostos de uma mistura asfáltica que apresenta permeabilidade muito superior às misturas asfálticas densas, que são as mais utilizadas atualmente e, quando são empregadas como camada de rolamento são chamadas de Camada Porosa de Atrito (CPA). Este tipo de

revestimento tem finalidade funcional de drenar a água superficial do pavimento e, conseqüentemente, aumentar a aderência pneu-pavimento em dias de chuva, aumentando, assim, a segurança nas rodovias, além de possibilitar a absorção de ruídos oriundos do tráfego.

Por outro lado, este tipo de revestimento está mais suscetível aos agentes que deterioram sua estrutura, como a colmatação dos poros, o escorrimento do ligante, menor resistência mecânica e o desprendimento dos agregados. Devido ao elevado volume de vazios de uma mistura de graduação aberta, ela tende a se tornar vulnerável a ação de fatores externos, como o envelhecimento oxidativo, a radiação ultravioleta (UV) e o condicionamento de água (ZHANG *et al.*, 2021). Assim, o envelhecimento precoce do ligante é uma das fontes dos problemas encontrados em estruturas de camadas porosas de atrito, o que demanda atenção.

A utilização de agentes rejuvenescedores mostra-se uma alternativa atrativa na reversão do envelhecimento do ligante asfáltico. Estes são materiais restauradores de maltenos ou redutores de consistência, que permitem recuperar as propriedades originais do ligante asfáltico, perdidas durante o envelhecimento (GU *et al.*, 2019).

No entanto, por se tratar de um revestimento com elevado volume de vazios, a CPA não pode ser tratada por meio da pulverização direta do rejuvenescedor sobre o pavimento ou a adição do material ao ligante, como comumente ocorre. Isto porque, a pulverização numa superfície com alta porosidade resultará num rápido escoamento deste rejuvenescedor, o que pode se tornar um problema ambiental, já que este material possivelmente chegará à algum manancial como carga poluidora. Quanto à adição direta ao ligante, esta promove a redução da viscosidade e, conseqüentemente, o aumento do escorrimento que é um dos principais problemas decorrentes da utilização da CPA.

Casado *et al.* (2021) investigaram os benefícios do uso do rejuvenescedor encapsulado por meio de agregado poroso, ao invés de adicioná-lo diretamente ao ligante. Os resultados indicaram um potencial de recuperação das propriedades do ligante envelhecido e que o rejuvenescedor é liberado ao longo do tempo dos poros dos agregados, devido à compatibilidade entre o rejuvenescedor e o ligante que o envolve, para compensar o envelhecimento do ligante.

A vermiculita expandida possui alta porosidade e uma grande quantidade de vazios preenchidos por ar, logo, apresenta baixa densidade e grande área de

superfície específica. Estas são características desejáveis para que seus poros possam ser preenchidos de um agente rejuvenescedor, a fim de adicionar este material, de maneira indireta, à mistura asfáltica.

Ji *et al.* (2017) constataram que a adição de óleo de soja permite recuperar as propriedades reológicas de um ligante asfáltico envelhecido, já que foi verificada a redução da rigidez e o aumento da plasticidade do ligante envelhecido, tal qual um rejuvenescedor convencional à base de óleo combustível. Banerji *et al.* (2022) destacam que a estrutura molecular do óleo vegetal residual é comparável ao do ligante asfáltico, logo, este tipo de material apresenta um potencial na recuperação das propriedades perdidas pelo ligante, em decorrência do envelhecimento, durante a vida útil do pavimento.

Diante do exposto, estudou-se a utilização de um agregado poroso saturado em óleo de soja residual (APSOSR) no rejuvenescimento do ligante, a fim de superar um dos entraves ao uso dos pavimentos porosos, que é o desprendimento dos agregados decorrente do envelhecimento precoce. O agregado escolhido com esta finalidade foi a vermiculita, que foi saturada em óleo de soja residual, ao invés da utilização de um rejuvenescedor comercial, com o objetivo de promover um destino ecologicamente correto para esse resíduo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar acerca da capacidade de rejuvenescimento de misturas asfálticas de graduação aberta, do tipo camada porosa de atrito, em decorrência da adição de agregado poroso saturado em óleo de soja residual.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o uso de óleo residual como agente rejuvenescedor do ligante asfáltico envelhecido, recuperado de revestimentos do tipo CPA;
- Avaliar o comportamento reológico do ligante asfáltico rejuvenescido, por meio da adição de APSOSR, em revestimentos do tipo CPA;

- Investigar acerca da difusão do óleo na mistura e sua interação com o ligante asfáltico;
- Avaliar a eficácia do APSOSR na redução dos efeitos combinados da temperatura e umidade, no envelhecimento de revestimentos do tipo CPA, e investigar a influência do carregamento cíclico neste processo;
- Analisar as variações volumétricas e funcionais que a adição do APSOSR ocasiona no revestimento do tipo CPA;
- Verificar as alterações no comportamento mecânico das misturas modificadas com o APSOSR;

1.2 PREMISSAS E HIPÓTESES

Os pavimentos permeáveis são uma das estratégias mais completas para o desenvolvimento de uma cidade-esponja. Logo, ao solucionar os entraves decorrentes da baixa durabilidade da mistura asfáltica porosa, esta poderá ser utilizada largamente.

Para o desenvolvimento desse trabalho, algumas premissas foram adotadas:

- A adição de um agregado poroso, em pequena quantidade, não afetará significativamente as propriedades mecânicas e funcionais da CPA;
- Os efeitos combinados da temperatura e umidade intensificam o processo de envelhecimento e interferem nas propriedades reológicas do ligante e no comportamento mecânico da CPA;
- O uso do solvente na extração do ligante afetará todas as amostras de maneira semelhante, o que permitirá a análise dos resultados sem grandes interferências; e
- O teor ideal de óleo de soja residual e o método adequado de adição resultará em uma mistura envelhecida com propriedades mecânicas parcialmente recuperadas e economicamente viável.

Considerando essas premissas, as hipóteses levantadas são:

- O agregado poroso será capaz de resistir aos processos de usinagem e compactação;
- O mecanismo de liberação do óleo do agregado poroso poderá ocorrer de forma distinta quando se considera apenas o envelhecimento da mistura e quando em conjunto se aplica um ciclo de carregamento, com a finalidade de simular o tráfego;
- A efetividade da interação entre o agente rejuvenescedor e o ligante produzirão alterações nas propriedades reológicas e químicas do ligante envelhecido; e
- A redução de viscosidade do ligante provocada pela liberação do óleo na mistura asfáltica não elevará o escorrimento à valores acima de 0,3%, recomendado por norma, já que este é um parâmetro importante a se considerar na utilização da CPA.

Com a análise adequada dessas variáveis, espera-se que seja possível restaurar parcialmente as propriedades do ligante asfáltico envelhecido e, conseqüentemente, reduzir a desagregação da CPA, aumentando a durabilidade deste tipo de mistura asfáltica. O plano experimental da pesquisa tentará avaliar esses parâmetros quanto as alterações reológicas e químicas do ligante, bem como o desempenho, funcional e mecânico, das misturas asfálticas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são feitas considerações relacionadas às problemáticas decorrentes da impermeabilização do solo, como o conceito de cidade-esponja. Além disso, são explanados conceitos relacionados às misturas asfálticas porosas, com ênfase nas camadas porosas de atrito, de modo a possibilitar uma melhor compreensão do que é e de como surgiu esta técnica, quais as metodologias comumente utilizadas para execução, principais propriedades, bem como, suas limitações, com ênfase na desagregação advinda do envelhecimento do ligante.

Posteriormente, discorreu-se acerca da possibilidade de rejuvenescimento do ligante asfáltico, e as técnicas utilizadas com esta finalidade, além dos parâmetros que precisam ser observados. Foi feita ainda, uma análise entorno da problemática do descarte de óleo vegetal residual e sobre a possibilidade da utilização deste como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas. Por fim, foram elencados alguns pontos sobre o óleo de soja e a vermiculita, que são os principais materiais utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

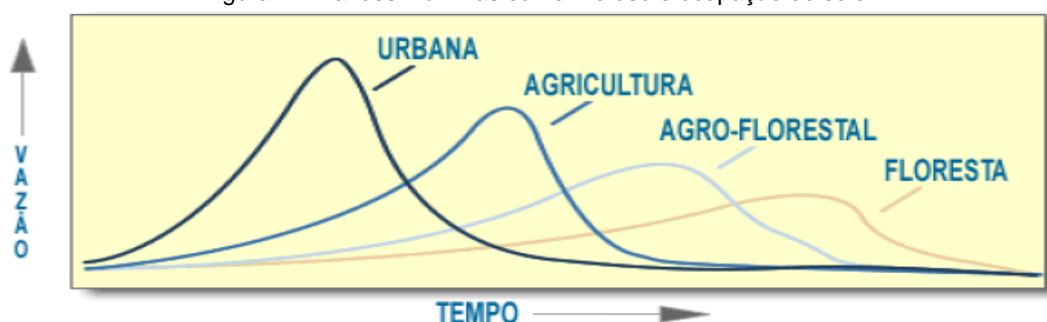
2.1 Problemas associados à impermeabilização do solo

O processo de urbanização traz profundas modificações no uso do solo, como é o caso da pavimentação. Neste processo, o solo natural é recoberto por materiais artificiais que acabam por tornar estas áreas impermeáveis. Por outro lado, países tropicais, como é o caso do Brasil, se caracterizam por fenômeno meteorológico de chuvas de grande intensidade, com grande precipitação em curto intervalo de tempo, característica está mais acentuada em algumas regiões (SCHNEIDER *et al.* 2019). Além destes, diversos lugares no mundo sofrem com a ocorrência de chuvas torrenciais, por exemplo, os EUA e a China.

Outra implicação dessa característica meteorológica, aliada ao revestimento do solo natural, são os alagamentos. Estes são resultantes ou não de problemas de natureza fluvial, causando o acúmulo momentâneo de águas em um determinado local, por conta de seu baixo coeficiente de escoamento superficial, devido às deficiências no sistema de drenagem e depósito inadequado dos resíduos sólidos urbanos (SANTOS, 2010).

Com o crescimento da malha viária em todo o mundo, a impermeabilização do solo fez aumentar a frequência e a intensidade dos eventos de inundação urbana (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH JÚNIOR, 2013). A Figura 1 mostra as diferentes vazões de pico, para diferentes tipos de uso e ocupação do solo, que ilustram que uma região se torna muito mais susceptível a sofrer com transtornos relacionados à eventos de inundação quanto mais urbanizada e impermeável for o seu solo.

Figura 1 – Vazões máximas conforme uso e ocupação do solo.



Fonte: Galdino (2022).

Zhang *et al.* (2018) afirmam que, para resolver os problemas causados pelo aumento das inundações pontuais, o governo chinês propôs a implantação do conceito de *sponge cities* ou cidades-esponja, a fim de promover o desenvolvimento urbano. Fogueiro (2019) discorre sobre o surgimento do conceito, que se deu após graves episódios de inundações, em Pequim, no ano de 2012, e visa integrar a gestão das águas pluviais e projetos de planejamento urbano.

O desenvolvimento de uma cidade-esponja é voltado para o planejamento urbano que tem como base um *design* com elevada permeabilidade, o que inclui corpos d'água como rios, lagos e lagoas, além de equipamentos urbanos de apoio, como espaços verdes, jardins e vias permeáveis. A água da chuva é infiltrada, purificada, armazenada e reutilizada, com fluxos residuais encaminhados através de uma rede de tubulações e estações de bombeamento, para elevar, efetivamente, o padrão de projeto do sistema de drenagem urbana e reduzir o risco de inundação na cidade (WANG *et al.*, 2019).

O objetivo desta iniciativa foi estendido para incorporar uma gama mais ampla de benefícios, além da gestão do risco de inundação, e incluir o planejamento para as mudanças climáticas. Além de servir como solução para as situações de inundação, a implantação de uma cidade-esponja é capaz de promover a mitigação de ilhas de

calor urbano, com a melhoria do microclima e a redução do ruído urbano (GALDINO, 2022).

Sabe-se ainda que, o principal objetivo da pavimentação é garantir a tráfegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. Logo, a fim cumprir essa premissa, a engenharia rodoviária passou a ser demandada por soluções que visem resolver as dificuldades relacionadas ao recobrimento do terreno natural por materiais artificiais, como a utilização de misturas asfálticas porosas. Este tipo de mistura asfáltica, indiretamente, acaba por mitigar problemas para além da segurança viária, como as problemáticas relacionadas às enchentes e ao excesso de ruído urbano.

2.2 Misturas Asfálticas Porosas

Mansour e Putman (2013) definem as misturas asfálticas porosas, ou abertas, como uma mistura de ligante asfáltico, aditivos e uma alta proporção de agregado graúdo, com limitada quantidade de finos, além de apresentar uma elevada quantidade de vazios, o que torna possível a percolação de água. São utilizadas em diversas aplicações na pavimentação desde camadas de rolamento aquelas responsáveis pela captação da água para formação de reservatórios ou recarga de aquíferos (Figura 2) (VIRGILIIS, 2009).

Figura 2 - a) Pavimento drenante; (b) Camada porosa de atrito; (c) Pavimento convencional.



Fonte: Adaptado de Putman e Kline (2012).

Na Figura 2(a) é esboçado o esquema de um pavimento drenante, que consiste numa mistura com um elevado índice de vazios, que a torna permeável à ação das águas de chuva e, conseqüentemente, reduz a espessura da lâmina d'água sobre a superfície (OLIVEIRA, 2003). É importante salientar que esta solução é aplicada na implementação de um pavimento novo, já que toda a estrutura deve ter granulometria

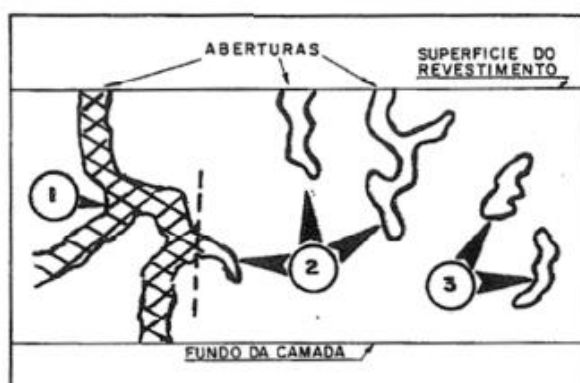
compatível com a drenagem desejada, e esta difere das camadas encontradas num pavimento convencional.

Quando a finalidade é servir como camada de desgaste, a mistura asfáltica porosa recebe o nome de camada porosa de atrito, ou seja, a camada de revestimento é colocada sobre uma estrutura convencional de pavimento formado por misturas asfáltica densa ou sobre o pavimento rígido de concreto de cimento Portland, como esquematizado na Figura 3(b) (PINHEIRO, 2004). Neste caso, a CPA pode ser utilizada tanto na construção de um novo pavimento, como na restauração de um pavimento antigo, sobrepondo a estrutura preexistente.

De acordo com Oliveira (2003), a CPA e o pavimento drenante evoluíram simultaneamente, a primeira seguindo uma tendência americana e o segundo, uma tendência europeia. São dois tipos de misturas asfálticas semelhantes e que desempenham papéis funcionais na estrutura de um pavimento, porém diferem-se na característica da porosidade. O pavimento drenante possui maior quantidade de vazios comunicantes do que a CPA, sendo estes responsáveis pela drenagem das águas, ou seja, o primeiro apresenta maior capacidade drenante.

A permeabilidade do pavimento está diretamente relacionada com a disposição dos vazios no interior da mistura asfáltica. Meurer Filho (2001) classifica os poros presentes na CPA em três tipos, conforme Figura 3. Os poros eficazes são aqueles que permitem a estocagem e drenagem d'água, já os semi-eficazes permitem unicamente a estocagem d'água e os ineficazes não se comunicam entre si, nem com o exterior.

Figura 3 – Tipos de poros



- 1 – Poros eficazes
- 2 – Poros semi-eficazes
- 3 – Poros ineficazes

Fonte: Adaptado de Meurer Filho (2001).

A aplicação deste tipo de material tem a capacidade de reduzir o ruído advindo do rolamento, devido à dissipação da energia das ondas sonoras geradas no contato pneu-pavimento no interior dos vazios interconectados. Com a redução do bombeamento do ar, obtém-se a diminuição do ruído, cuja ordem de grandeza é dependente de fatores tais como o tamanho dos agregados, a espessura da camada e a porcentagem de vazios da mistura (ALVES *et al.*, 2018).

Em relação à segurança há uma melhora no atrito da interface pneu pavimento, em dias chuvosos, se comparadas a estruturas com misturas asfálticas densas e com placas de cimento Portland. Segundo Wurst e Putman (2013), outro benefício da retirada da água sobre o revestimento asfáltico é a diminuição da reflexão das luzes dos veículos na camada pois não há espelhamento, o que ocasiona uma melhor visualização da sinalização horizontal durante a noite.

A vida útil das rodovias revestidas com mistura asfáltica porosa é menor (às vezes, apenas a metade) quando comparada com rodovias revestidas com misturas asfálticas densas. Numa mistura com graduação aberta, o movimento da água durante a drenagem e a ação de agentes externos tornam o pavimento vulnerável devido ao elevado volume de vazios e à fraca resistência de ligação entre o ligante e os agregados (WANG *et al.*, 2018; CHU *et al.*, 2019).

Klenzendorf *et al.* (2011) destacam que um pavimento totalmente poroso apresenta tendência ao surgimento de problemas estruturais. Por esse motivo, o revestimento poroso construído sobre uma camada impermeável seria uma opção mais benéfica já que o pavimento apresenta a capacidade drenante ao mesmo tempo que a sua capacidade estrutural não é afetada.

Chen *et al.* (2017) fizeram uma análise de custos e concluíram que o custo unitário ($\$/m^3$) de um pavimento poroso é cerca de 42% maior do que o custo dos pavimentos tradicionais. Isto ocorre, pois as matérias-primas utilizadas precisam ter uma qualidade superior e os procedimentos de construção são mais rigorosos, a fim de garantir durabilidade ao pavimento.

Rivera *et al.* (2022) destacam que uma das principais limitações na utilização das misturas porosas é sua vida útil reduzida, então, comumente faz-se o emprego de ligantes asfálticos modificados (ligante modificado por polímero regular ou borracha asfáltica), com a finalidade de aumentar a durabilidade. Entretanto, salientaram que esta não tem sido uma alternativa suficiente na obtenção de uma vida útil equivalente

à de um pavimento de mistura densa. Logo, a opção tem sido a utilização de ligantes asfálticos altamente modificados por polímeros (HiMA), que são ligantes modificados com teores de polímero em torno de 7 a 8% do peso total do ligante.

Desta forma, a necessidade de ligantes modificados ou altamente modificados, acabam encarecendo a implantação das misturas porosas. Além disso, Wu *et al.* (2020) enfatizam que para ampliar a vida útil do pavimento poroso é imprescindível a realização de manutenção preventiva, com tempos e métodos adequados de tratamentos, sendo estas com periodicidade superior as feitas em pavimentos convencionais.

2.2.1 Histórico

Na década de 30, com o intuito de resolver problemas de aderência nos pavimentos, nos Estados Unidos (EU) iniciaram-se a os estudos a respeito da utilização de misturas asfálticas porosas, sendo oficialmente denominadas de *Open-Graded Friction Course* (OGFC). Em 1974, com base nas experiências de campo, a *Federal Highway Administration* (FHWA) introduziu uma especificação de serviço que visava a aplicação de OGFC em áreas de tráfego pesado (Takahashi e Partl, 1999). Na atualidade, a OGFC segue sendo comumente utilizada, a exemplo do estado do Oregon em que a mistura se tornou a preferida devido aos bons resultados obtidos desde a década de 1970. Já no estado da Geórgia, a utilização é obrigatória em todas as rodovias interestaduais (KANDHAL, 2002).

Na Europa, a mistura asfáltica porosa é denominada de *Porous Asphalt* (PA) e sua utilização é amplamente difundida em países como Alemanha, Holanda, França, Itália, Reino Unido, Espanha, Suíça e Áustria. O uso de revestimentos com características funcionais nesse continente teve início com a aplicação de pavimentos drenantes, por volta de 1977, sendo a França um dos primeiros países europeus a utilizar. Huurman, Mo e Woldekidan (2011) destacam que, na Holanda o PA é o revestimento padrão da malha viária, totalizando cerca de 80%.

No Brasil, os estudos de misturas de granulometria aberta tiveram início na década de 1960 pela Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG) e tinham como objetivo o aumento da segurança em pistas de pouso e decolagem em aeroportos. Porém, somente na década de 90 a CPA foi implementada depois da pesquisa desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas em Transportes (IPT) sobre

asfalto-polímero, já que também era conhecida por camada drenante com ligantes modificados por polímeros elastoméricos.

De acordo com Araújo (1994), o Aeroporto Internacional Tancredo Neves, em Minas Gerais, foi o primeiro aeroporto no país a utilizar em sua pista uma CPA. Em 1999, na pista principal do Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, foi executado um pavimento superposto e sobre ele foi colocada uma camada de CPA. Já em 2020, o Aeroporto de Congonhas, em São Paulo, teve toda a pista de pouso e decolagem restaurada, com execução de uma nova camada densa, seguida de uma camada de rolamento em CPA (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Existem ainda algumas aplicações experimentais de CPA, como trechos em rodovias da região noroeste do Rio Grande do Sul. O primeiro localiza-se na BR-158, no km 75, próximo a cidade de Boa Vista das Missões e foi executado em 2014. Os outros dois encontram-se na BR-285, sendo um entre os municípios Entre-Ijuís e São Borja, no km 522, executado em 2005 e outro nas proximidades da cidade de Santo Antônio das Missões, no km 617, executado em 2016.

Como a utilização deste tipo de mistura asfáltica ainda é restrita no país, alguns estudos se desenvolveram a fim de ampliar a aplicação e o conhecimento acerca destas. Alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil foram organizados no Quadro 1 em ordem cronológica.

Quadro 1 – Estudos desenvolvidos no Brasil sobre misturas asfálticas porosas

Local	Estudo	Conclusão
Universidade de São Paulo	Campos (1998) analisou o comportamento de um trecho piloto de revestimento poroso com ligante modificado por polímero.	A utilização do ligante modificado melhorou significativamente a durabilidade e a resistência do revestimento poroso, mostrando potencial para aplicações práticas em condições adversas.
Universidade Federal de Santa Catarina	Meurer Filho (2001) fez estudos acerca da granulometria para concretos asfálticos drenantes.	Destacou que a distribuição granulométrica precisa ser projetada de forma a permitir uma boa capacidade de drenagem das águas pluviais através do pavimento, ao mesmo tempo em que mantém as propriedades mecânicas

		necessárias para suportar o tráfego e resistir às condições ambientais.
Universidade de Brasília	Oliveira (2003) realizou o estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas asfálticas drenantes.	As misturas asfálticas drenantes possuem propriedades mecânicas adequadas para suportar cargas de tráfego, além de apresentarem capacidade de drenagem eficiente. Essas características tornam essas misturas adequadas para reduzir problemas de drenagem superficial em pavimentos, melhorando a segurança e prolongando a vida útil da estrutura.
Universidade de São Paulo	Virgiliis (2009) desenvolveu procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias.	Esses pavimentos permitem a infiltração direta da água da chuva no solo, reduzindo significativamente o escoamento superficial e melhorando a qualidade da água que se infiltra.
Universidade de São Paulo	Pinto (2011) analisou o desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano.	Destacou que esses pavimentos contribuem para o controle térmico urbano e podem proporcionar melhorias estéticas e de conforto para pedestres e ciclistas, além de reduzindo problemas de enchentes.
Universidade Federal de Santa Catarina	Knabben (2012) estudou o ruído pneu-pavimento e a absorção sonora em diferentes revestimentos de pavimento, incluindo pavimento drenante e camada porosa de atrito.	A pesquisa ressaltou a importância de considerar esses aspectos na seleção de revestimentos de pavimento, visando não apenas a funcionalidade estrutural, mas também o impacto positivo na qualidade ambiental e no bem-estar das comunidades urbanas.
Universidade Federal da Paraíba	Queiroz e Melo (2015) analisaram as propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas asfálticas porosas	A pesquisa demonstrou que o PET pode melhorar a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas porosas, ao mesmo tempo em que

	com adição de politereftalato de etileno (PET).	mantém ou melhora a capacidade de drenagem desses pavimentos.
Universidade Federal de Santa Maria	Dresch (2016) verificou o comportamento de misturas asfálticas tipo camada porosa de atrito (CPA).	Concluiu-se que as CPA são eficazes na gestão das águas pluviais urbanas, contribuindo para a redução de enchentes e melhorando o conforto acústico em áreas urbanas.
Universidade Federal de Santa Catarina	Garcia (2017) fez a análise da redução da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes em função da redução do volume de vazios.	A pesquisa evidenciou que o controle da compactação e da granulometria das misturas é fundamental para garantir a capacidade de drenagem adequada dos pavimentos.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	Jaques (2018) avaliou a aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA).	A pesquisa confirmou que essas misturas, produzidas em temperaturas mais baixas em comparação com as misturas convencionais, mantêm as propriedades desejáveis de drenagem e redução de ruído pneu-pavimento.
Universidade Federal de Santa Maria	Alves <i>et al.</i> (2018) realizaram um estudo acústico de tráfego rodoviário rodante sobre pavimentos asfálticos com camada porosa de atrito na rodovia BR 158/RS.	Os resultados indicaram que esses pavimentos são eficientes em mitigar o impacto sonoro, proporcionando melhores condições de conforto acústico para áreas urbanas próximas à rodovia.
Universidade do Vale do Taquari	Schneider <i>et al.</i> (2019) analisaram o comportamento hidráulico e mecânico de uma mistura asfáltica aberta enquadrada como camada porosa de atrito.	Percebeu-se que a mistura apresentou comportamento satisfatório tanto do ponto de vista hidráulico quanto mecânico. Além disso, concluiu-se que é uma técnica eficaz na gestão das águas pluviais, permitindo a infiltração e o escoamento controlado da água, o que contribui para a redução de problemas de drenagem superficial e enchentes.

Universidade Federal de Santa Maria	Alves (2019) estudou o comportamento mecânico, funcional e ambiental de misturas asfálticas porosas.	A pesquisa destacou que essas misturas são eficazes na redução do ruído do tráfego, na melhoria da drenagem superficial e na promoção de condições ambientais mais favoráveis em áreas urbanas.
Universidade Federal do Ceará	Maia <i>et al.</i> (2019) detalharam a 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.	A pesquisa evidenciou que esse tipo de pavimento contribui significativamente para a melhoria da drenagem urbana, reduzindo problemas de enchentes e melhorando a segurança viária em condições de chuva intensa. Além disso, destacaram que o uso dessas tecnologias pode proporcionar benefícios adicionais, como a redução de temperaturas superficiais e a prolongação da vida útil dos pavimentos.
Universidade Federal do Ceará	Alecrim <i>et al.</i> (2022) avaliaram o desempenho acústico e das características de superfície de camada porosa de atrito em meio urbano.	Concluíram que esse tipo de pavimento contribui significativamente para a redução dos níveis de ruído causados pelo tráfego rodoviário, melhorando as condições de conforto acústico para os moradores e usuários das áreas urbanas próximas às vias.

Anterior ao conceito de cidade esponja, Pinto (2011) realizou seus estudos a fim de contribuir com a drenagem urbana, ao trabalhar com pavimentos permeáveis que permitissem mitigar inundações urbanas. Dentre estes pavimentos, foi analisada uma CPA, composta por uma mistura de 20,1% de volume de vazios, com 4,5% de AMP 65/90 e composição granulométrica enquadrada na Faixa Arizona, conforme as especificações AASHTO T-27 e AASHTO T-11. A mistura porosa avaliada apresentou uma capacidade de amortecimento da vazão afluente entre 65% e 85%.

Outros impactos decorrentes do crescimento desordenado das cidades é o aumento do nível do ruído, principalmente em locais de alto volume de tráfego, resultante, em partes, do contato pneu-pavimento. A fim de amenizar mais este efeito

adverso relacionado à impermeabilização do solo, Knabben (2012) objetivou a proposição de um pavimento silencioso, ao avaliar a capacidade de absorção sonora de revestimentos asfálticos tanto do tipo poroso, como drenante.

Knabben (2012) concluiu que as misturas porosas (mistura drenante e camada porosa de atrito) apresentaram coeficiente de absorção sonora superior em comparação às misturas densas. Os resultados mostraram que para a mistura drenante, utilizado 4,2% de ligante asfáltico 50/70 modificado com borracha (15%), diâmetro máximo do agregado de 9,5 mm e, volume de vazios variando entre 22 e 28%, a espessura ideal do revestimento deve ficar entre 4,3 e 4,6 cm. Já para a CPA, com granulometria enquadrada na Faixa V da especificação de serviço DNIT 386/99, com teor de projeto de ligante de 4,3% e, volume de vazios de 21,9%, a espessura ideal deve ser de 4,0 cm. Além disso, os resultados demonstraram que a absorção sonora é dependente do volume de vazios, dos vazios comunicantes e da espessura do material.

Alves *et al.* (2018) também analisaram os efeitos sonoros de uma CPA, desta vez em campo, no km 75 da rodovia BR 158/RS. Observou-se uma redução no nível de pressão sonora de mais de 6 dB (A) no pavimento com CPA em comparação com o pavimento tradicional avaliado.

Apesar dos resultados positivos acerca da funcionalidade da CPA, ainda se nota alguns entraves à sua utilização de forma expressiva, como o envelhecimento precoce, a desagregação e o escorrimento excessivo de ligante. Desta forma, trabalhos como o de Queiroz e Melo (2015) visam elucidar alguns destes, como ao adicionarem 1,0% de PET às misturas asfálticas porosas, conseguiram reduzir o escorrimento do ligante de 0,058% para 0,040%.

Inicialmente, a redução verificada por Queiroz e Melo (2015) pode não parecer significativa, no entanto, é válido destacar que as misturas apresentavam teores de projeto distintos. A mistura modificada com PET tinha um teor de projeto de ligante de 4,2%, contra os 3,7% da mistura com o ligante puro. Logo, se as misturas tivessem os mesmos teores há um indicativo que essa diferença entre os valores de escorrimento seria maior. Logo, observa-se a necessidade de utilizar os mesmos parâmetros num estudo comparativo, a fim de reduzir as variáveis que possam interferir no resultado final, tornando-o tendencioso.

As misturas asfálticas porosas são produzidas à quente, ou seja, necessitam de elevadas temperaturas durante a usinagem e compactação, o que acaba por acrescentar custos à execução do pavimento, além de emitir gases à atmosfera. Com o intuito de reduzir os custos e prejuízos ambientais ao se utilizar este tipo de pavimento, Jaques (2018) verificou a viabilidade de se produzirem camadas porosas de atrito a temperaturas intermediárias, por meio da incorporação de um agente surfactante, o Evotherm™ P-25.

As misturas mornas apresentaram escoamento satisfatório quando comparadas às respectivas misturas de referência e geraram resultados semelhantes no ensaio de perda por abrasão. Em relação ao comportamento mecânico, não houve diferença significativa nos valores medidos de resistência a tração. Logo, concluiu-se que com teor ótimo de ligante de 6%, pode-se dizer que a produção de misturas asfálticas porosas a temperaturas intermediárias é possível e está se torna uma alternativa frente às misturas convencionais usinadas a quente (JAQUES, 2018).

No entanto, vale destacar que para a fabricação de uma CPA é necessário a utilização de teores de ligante em torno de 4%, a fim de elevar o volume vazios. Desta forma, o teor de 6% de ligante indicado por Jaques (2018) pode ser suficiente para reduzir às temperaturas de usinagem e compactação, mas faz se necessário uma análise econômica para entender se essa redução de custos pela diminuição na temperatura seria suficiente para compensar o aumento dos custos ao se utilizar quase 2% de ligante a mais.

2.3 Camada Porosa de Atrito

A CPA é uma mistura asfáltica à quente aberta cuja principal característica é a grande quantidade de vazios. Esta porosidade permite uma alta percolação da água proveniente das chuvas para seu interior, conduzindo-a por meio do caimento transversal da pista até as sarjetas ou acostamentos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

As principais características desse tipo de mistura asfáltica são drenagem eficiente, redução de ruído, além de escoar rapidamente a água da superfície do pavimento, melhorando, significativamente, a capacidade antiderrapante da pista em condições de chuva, e por consequência há um aumento expressivo da segurança viária (TANZADEH *et al.*, 2019; LASTRA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; SHA *et al.*, 2018).

A lâmina d'água sobre o pavimento pode causar acidentes uma vez que provoca derrapagens em virtude dos fenômenos de hidroplanagem e da viscoplanagem, prejudica a visibilidade pela névoa formada atrás dos veículos em movimento e pela reflexão luminosa durante a noite, além de acumular água nas deformações (GUIMARÃES *et al.*, 2013). Existem aspectos da CPA que contribuem para prevenir a ocorrência de hidroplanagem. O primeiro corresponde à capacidade drenante, visto que não há formação de lâmina d'água para impedir o contato entre a superfície do pneu e pavimento. O segundo aspecto está relacionado à macrotextura fornecida pela superfície (KING; HARVEY; COOK, 2007). Na Figura 4, pode se notar a diferença da lâmina d'água formada num pavimento com estrutura convencional e de um pavimento com revestimento do tipo CPA.

Figura 4 – Trecho em CPA seguido por trecho em CA



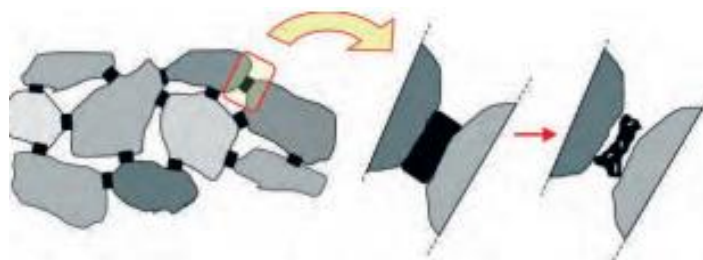
Fonte: Dresch (2016)

O ruído de tráfego constitui, atualmente, um dos problemas ambientais mais relevantes em zonas urbanas. A complexa rede de comunicações viárias se constitui na fonte predominante de perturbação do ruído ambiente. O tráfego de veículos faz parte de um grupo de fatores geradores do ruído urbano (KNABBEN *et al.*, 2016).

Estudos de Knabben *et al.* (2016) e Medeiros (2018) mostram que os níveis de ruído médio, em regiões às margens de vias expressas e de rodovias de tráfego intenso, alcançam cerca de 85 decibéis, e nas fachadas das habitações circunvizinhas é em média 78 decibéis, valores superiores aos 55 decibéis recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS). O excesso de ruído pode provocar doenças ao homem, como pressão alta e insônia, além de diminuir sua produtividade e aumentar o estresse.

As CPAs, geralmente, são executadas na forma de camadas delgadas sobre revestimentos existentes de concreto asfáltico ou cimento Portland, sendo estes os responsáveis pela função estrutural (PINHEIRO, 2004). A elevada porosidade desse tipo de mistura asfáltica a torna mais suscetível ao desgaste, que é a perda progressiva de agregados do revestimento, como se observa no esquema da Figura 5 (LYONS E PUTMAN, 2013).

Figura 5 – Esquema do mecanismo de degradação

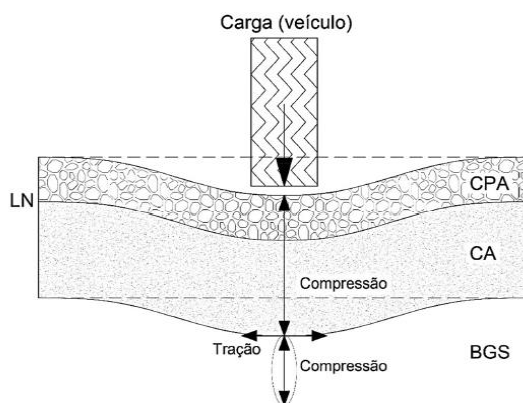


Fonte: Schlangen *et al.* (2017)

A desagregação é iniciada com o envelhecimento do ligante por oxidação e com a variação de temperatura. Posteriormente, há um aumento da rigidez da mistura, contração e microrachaduras, e, conseqüentemente, o rompimento da interface da matriz pétreo e a perda dos agregados para a superfície.

Alves (2019) destaca que para pavimentos com revestimentos convencionais em CA as principais patologias são decorrentes da fadiga dos materiais, já para os revestimentos porosos é importante analisar a região de compressão, como apresentado na Figura 6. Isto deve ocorrer pois, é nesta região que se desenvolve a deformação permanente neste tipo de revestimento, podendo provocar patologias como o afundamento em trilha de roda (ATR).

Figura 6 - Esquema de esforços em pavimentos do tipo CPA



Fonte: Alves (2019)

2.3.1 Normatização

Misturas abertas são especificadas, de acordo com normas próprias do país em que foram desenvolvidas. No Brasil, a CPA é normatizada pela DNIT 386/99 que a define como uma mistura executada a quente, em usina apropriada, composta de agregado graduado, material de enchimento e ligante asfáltico modificado por polímero SBS, esta, também, determina cinco faixas granulométricas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição das misturas asfálticas do tipo CPA

Peneira de malha quadrada		Percentagem passando, em peso (faixas)					Tolerância na curva de projeto (%)
ABNT	Abertura, mm	I	II	III	IV	V	
3/4"	19,0	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,5	100	100	100	100	70-100	± 7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	± 7
Nº 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	± 5
Nº 10	2,0	12-40	5-20	10-18	10-22	10-22	± 5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	± 5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	± 3
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	± 2
Ligante polimerizado solúvel no tricloroetileno, %		4,0 - 6,0					± 0,3

Fonte: DNIT 386/99

De acordo com Tarefder *et al.* (2019), o ligante utilizado deve ter baixa suscetibilidade térmica e alta resistência ao envelhecimento. Em geral, recomenda-se o emprego de asfalto modificado por polímero (AMP) para aumentar a durabilidade e reduzir a desagregação.

A especificação DNIT 129/2011 que trata dos ligantes-polímero elastomérico classifica-os, segundo o ponto de amolecimento e a recuperação elástica a 25 °C, em 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E. Apesar da norma DNIT 386/99 especificar apenas o uso de ligante asfáltico modificado por polímero SBS, Ceratti *et al.*, (2015) destacam que entre os três AMPs disponíveis no mercado brasileiro, o 60/85-E e o 65/90-E são os mais indicados para utilização em misturas do tipo CPA.

Alvarez *et al.* (2008) sustentam a necessidade de rigorosa manutenção das temperaturas no processo de usinagem desse tipo de mistura, devido à utilização de AMP, ligantes cuja viscosidade é mais elevada que a de ligantes convencionais. A norma DNIT 386/99 traz ainda outras especificações para o projeto de misturas do tipo CPA, que podem ser verificadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Especificações para mistura do tipo CPA, de acordo com DNIT 386/99

Propriedades	Limites
Volume de vazios	18% a 25%
Desgaste à Abrasão Los Angeles, Ensaio de Cântabro	Máx. 25%
Resistência à Tração por Compressão Diametral, à 25°C	Mín. 0,55 MPa

Já nos EUA, as misturas abertas são normatizadas pela ASTM D7064/21. Nesta, os parâmetros para dosagem das misturas asfálticas são baseados no volume de vazios, escorrimento, além de apresentar a opção de utilizar os ensaios Cântabro e *Lottman* Modificado, a fim de complementar a análise. Os limites para cada especificação são expostos no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificações para mistura do tipo CPA, de acordo com ASTM D7064/21

Propriedades	Limites
Volume de vazios	Mín. 18%
Escorrimento	Máx. 0,3%
Desgaste à Abrasão Los Angeles – Ensaio de Cântabro (opcional)	Máx. 20%
Dano por Umidade Induzida – <i>Lottman</i> Modificado (opcional)	Mín. 80%

Diferente da norma brasileira, a norma americana não define que se deva utilizar ligante modificado, mas frisa que misturas que utilizam tais ligantes apresentaram desempenho superior. Wurst e Putman (2013) explicam que o emprego de ligante modificado por polímero SBS advém do fato de tal ligante ser o mais utilizado nos Estados Unidos em camadas porosas de atrito.

Além disso, a principal diferença entre a normatização brasileira e a americana consiste na metodologia de dosagem da mistura do tipo CPA. Enquanto a primeira recomenda o emprego do método Marshall, a ASTM D7064/21 consiste em utilizar o

Compactador Giratório Superpave (CGS) para encontrar o teor de projeto de ligante asfáltico baseando-se nas propriedades volumétricas da mistura.

No entanto, ao comparar os Quadros 2 e 3, percebe-se que as diferenças entre as normas não se restringem ao tipo de compactação e ao ligante utilizado, mas, também aos ensaios que norteiam à dosagem. A norma brasileira é baseada no volume de vazios, ensaio de Cântabro e Resistência à Tração, já a americana além dos dois primeiros, exige a realização do ensaio de escorrimento.

Além disso, notam-se diferenças não só nos ensaios descritos em cada norma, mas também nos limites que cada uma das especificações exige, para os ensaios em comum. Enquanto a DNIT 386/99 delimita uma faixa de volume de vazios entre 18% e 25%, a ASTM D7064/21 somente fixa um valor mínimo de vazios em 18%, o que deixa aberta a possibilidade de se produzir misturas com granulometrias ainda mais abertas.

No geral, a ASTM D7064/21 mostra-se mais completa, em comparação à DNIT 386/99, em virtude dos parâmetros indicados na análise da mistura porosa, que contemplam, além do volume de vazios e cântabro, o ensaio de escorrimento e o dano por umidade induzida. Estes podem relevar importantes informações acerca das misturas, como o comportamento durante a fase de usinagem e os efeitos da água de uma mistura com elevada permeabilidade.

Outro ponto que deve se destacar é sobre a atualização das especificações, a última modificação da norma americana ocorreu em 2021, diferente da brasileira que não é atualizada desde 1999. Sabe-se que num espaço de tempo tão grande muitas pesquisas foram desenvolvidas e descobertas foram feitas acerca dos materiais e técnicas de pavimentação, logo uma revisão na especificação brasileira faz se necessária.

Visto que o CGS simula melhor a compactação em campo e os ensaios abordados pela ASTM D7064/21 são uma importante fonte de informações de uma mistura porosa, a dosagem seguindo as recomendações desta provavelmente apresentará um resultado mais fidedigno. No entanto, para dosar uma mistura porosa no Brasil aproveitando as vantagens advindas da utilização do compactador giratório, o ideal seria a realização também dos ensaios exigidos na DNIT 386/99.

2.3.2 Limitações

A camada porosa de atrito traz consigo algumas limitações que afetam seu desempenho e merecem atenção como: o escorrimento do ligante asfáltico, a colmatação dos poros e o desprendimento de agregados. Esta última está intimamente relacionada à oxidação do ligante asfáltico, já que este tipo de mistura apresenta uma alta porosidade, e este é um dos principais fatores relacionados ao envelhecimento do pavimento.

Um dos maiores problemas encontrados na aplicação de CPA é o controle da distribuição de ligante por meio da camada de revestimento. A homogeneidade da mistura fica comprometida devido à baixa quantidade de agregados finos, sendo alto o risco de escorrimento do ligante. Em consequência, tem-se a desagregação da superfície do revestimento causada pelo baixo recobrimento dos agregados. Uma solução empregada para diminuir os efeitos do escorrimento é a adição de fibras orgânicas incorporadas à mistura asfáltica.

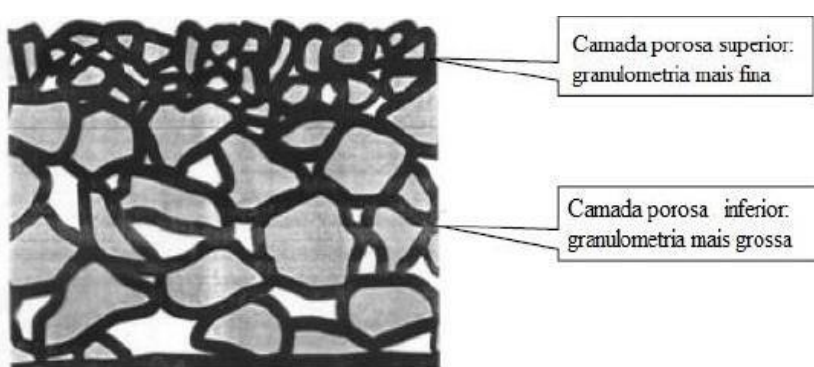
Sharma *et al.* (2023) avaliaram as características de escorrimento de misturas do tipo OGFC modificadas com fibras de bananeira obtida do pseudo-caule residual da bananeira pós-colheita, fibras do bagaço de cana, obtida do pós-residual após a extração do açúcar, uma fibra de celulose comercial. Este estudo utilizou uma combinação de quatro comprimentos diferentes (3, 6, 9 e 12 mm) para as fibras, e três teores (0,15%, 0,30% e 0,45% em peso de agregado seco). Como esperado, o escorrimento do ligante nas misturas OGFC diminuiu com o aumento dos teores de fibras. O melhor desempenho foi apresentado pela fibra de bananeira, no teor de 0,45% e comprimento de 9 mm, seguido pelo bagaço de cana e fibra de celulose.

Putman e Lyons (2015) verificaram que a ocorrência de escorrimento a longo prazo, além de acarretar a perda gradual da permeabilidade, pode criar uma maior probabilidade de desagregação na superfície do revestimento poroso. Isso ocorre, pois, o filme de ligante envolvendo o agregado, ao escorrer, se torna mais fino e oxida em uma maior velocidade tornando-se rígido.

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 deterioração da estrutura. Huber (2000) explica que esse fenômeno faz com que a estrutura perca suas propriedades drenantes e redução de ruídos.

O entupimento dos poros ocorre, principalmente, pelo transporte de partículas de solo trazidos pelos veículos ou pelo escoamento da água das chuvas, porém este pode acontecer devido à deterioração dos materiais, como o mástique, que consiste na combinação do ligante asfáltico com o fíler do agregado mineral (NIELSEN, 2007). Para minimizar a colmatação dos poros da CPA 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 (Figura 7) (HAMZAH e HARDIMAN, 2005).

Figura 7 - Camada porosa dupla



Fonte: Van Bochove (1996)

Outras limitações quanto à utilização da CPA são relativas à vida útil e aos custos quando comparada ao revestimento convencional. Este tipo de revestimento apresenta uma vida útil em torno de 20% menor quando comparado aos revestimentos convencionais. As necessidades construtivas, como a utilização de AMP, agregado de qualidade superior, maior gasto com a sinalização horizontal, já que ocorre a penetração da tinta, e a necessidade de camada de ligação de qualidade superior, tendem a elevar o valor do revestimento poroso à valores próximos do dobro de um revestimento convencional (KING, HARVEY e COOK, 2007; VIRGILIIS 2009).

Os pavimentos porosos estão sujeitos a um envelhecimento mais severo do que revestimento de misturas asfálticas densas, devido sua maior área superficial (JING, 2019). O alto teor de vazio torna as cargas do veículo mais propensas a criar concentração de tensão nas regiões de contato entre os agregados, tornando-os mais propensos à desagregação (XU *et al.*, 2019).

O envelhecimento resulta em um aumento da rigidez da mistura, contração e potencializam o surgimento de micro rachaduras, e conseqüentemente o rompimento

da interface da matriz pétreo e a perda dos agregados para a superfície. A perda progressiva de agregados finalmente resulta em panelas (SCHLANGEN *et al.* 2017). Esses efeitos negativos limitam a vida útil média em cerca de 11 a 12 anos, portanto, manutenção e reconstrução são mais frequentes do que outras estruturas de pavimento (MOLENAAR *et al.*, 2010; ZHANG *et al.*, 2018).

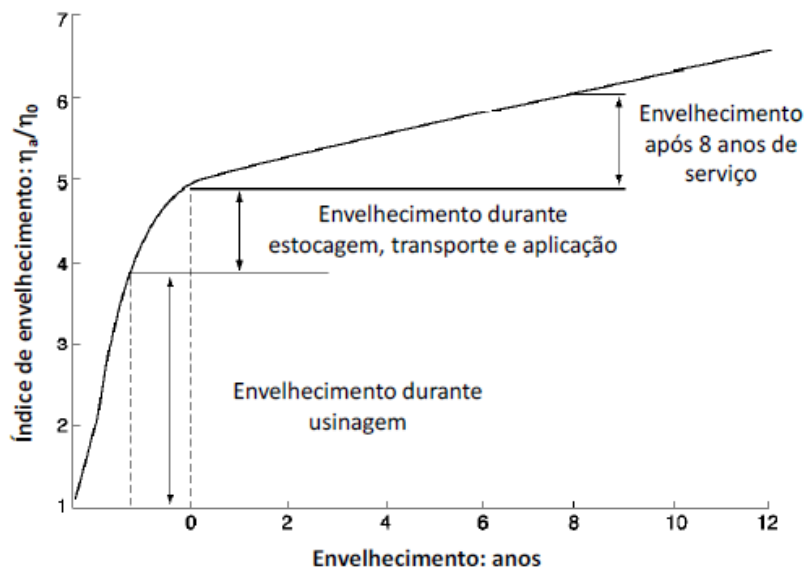
Ante ao apresentado, pavimentos do tipo CPA demandam uma maior manutenção quando comparados aos pavimentos tradicionais, devido as características particulares desse tipo de mistura, como o elevado volume de vazios. O planejamento da manutenção preventiva de pavimentos asfálticos deve incluir ainda, a alteração do balanço químico do ligante asfáltico ao longo de sua vida útil, visto que este provoca o processo de envelhecimento (BROWNRIDGE, 2010).

2.4 Envelhecimento do ligante asfáltico

O ligante asfáltico é um material viscoelástico e suas propriedades físico-químicas, especialmente propriedades termofísicas, influenciarão significativamente o desempenho geral das misturas asfálticas. Quatro fatores estão relacionados com o envelhecimento deste: (1) a volatilidade do componente oleoso; (2) migração de componentes voláteis do ligante para agregados; (3) oxidação química com oxigênio atmosférico; e (4) estruturação molecular produzida por efeitos tixotrópicos (LU e ISACSSON, 2002).

Além disso, ocorre pela combinação da exposição à altas temperaturas, radiação ultravioleta e o contato com o oxigênio e, está intimamente relacionado às mudanças nas propriedades reológicas deste. Logo, o tema se tornou objeto de estudos ao longo das últimas décadas, com o intuito de tentar incluir alguns critérios de controle nas especificações destes materiais (HUNTER; SELF; READ, 2015; NASCIMENTO e FAXINA, 2017). O processo de envelhecimento se divide em três etapas, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Índice de envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de usinagem, estoque, transporte, compactação e vida útil da camada asfáltica



Fonte: Takahashi (2020)

A primeira etapa do envelhecimento ocorre durante o processo de usinagem e representa 60% da oxidação total do ligante. Já a segunda, ocorre durante o transporte, espalhamento e compactação, representando 20% do envelhecimento. Por fim, a vida útil do pavimento é responsável pelos 20% restantes do envelhecimento do ligante.

Por sua natureza orgânica, o ligante é oxidado em contato com o oxigênio, formando compostos polares que tendem a se associar em micelas (HUNTER; SELF; READ, 2015). Santos *et al.* (2015) apontam que o aumento na rigidez das misturas asfálticas, em campo, está associado ao aumento de viscosidade do ligante pelos efeitos do envelhecimento do material, em serviço. Ocorrem processos físico-químicos complexos, principalmente atribuídos à oxidação, volatilização de compostos e polimerização do ligante asfáltico devido à radiação UV (MENAPACE *et al.*, 2018).

O principal mecanismo de defeito superficial, de um revestimento poroso, é a desagregação que inicia com o envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação, exposição à luz UV e variação de temperatura. (SCHLANGEN *et al.*, 2017). Logo, estão sujeitos a um envelhecimento mais severo do que revestimentos compostos por misturas asfálticas densas.

2.4.1 Parâmetros utilizados para a análise do envelhecimento

Acredita-se que existam quatro variáveis principais que contribuem para o processo de envelhecimento: raios ultravioleta, umidade, tempo e temperatura. Esses fatores criam uma mudança na estrutura química e, conseqüentemente, na reologia das substâncias em questão (Uz e Gökalp, 2020).

Ensaio reológico empírico, utilizados por normas brasileiras e internacionais, com intuito de classificar os ligantes asfálticos tem sido utilizados também na análise e quantificação do envelhecimento. Dentre estes, os mais utilizados são: ponto de amolecimento, penetração e viscosidade.

A partir desses, outras considerações acerca do envelhecimento podem ser feitas por meio do índice de susceptibilidade térmica (IST) e do índice de penetração (PI). O IST é obtido por meio dos resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento. Estes índices dão um indicativo da sensibilidade do ligante à mudança de temperatura.

Hesp e Shurvell (2010) destacaram que o PI correlaciona as propriedades do ligante com os problemas observados nos pavimentos. Observaram que, à medida que o ligante envelhece, o PI aumenta, indicando que o material se torna menos fluido, ou seja, mais quebradiço e propenso ao trincamento.

Além dos ensaios empíricos, os ensaios reológicos fundamentais são uma boa fonte de informações acerca do envelhecimento do ligante, já que a análise reológica melhor caracteriza e classifica os ligantes asfálticos. A análise é baseada na mudança nas propriedades viscoelásticas, no módulo complexo de cisalhamento ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ) a temperaturas e frequências de carregamentos desejados.

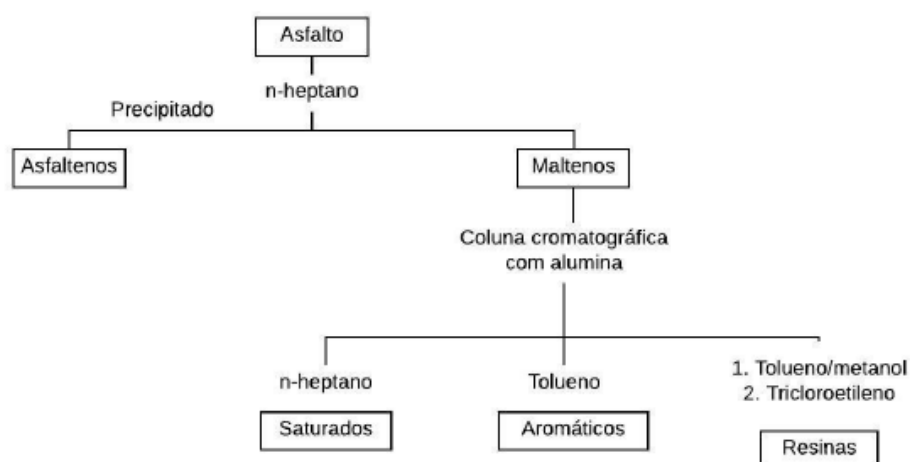
O parâmetro G^* possui uma componente elástica recuperável (G') e uma componente viscosa não recuperável (G''). Em síntese, o módulo G^* pode ser relacionado com a resistência do material em diferentes velocidades de cisalhamento e o ângulo δ fornece informação sobre a razão entre a resposta elástica e viscosa durante o processo de cisalhamento. (MOTTA *et al.*, 1996, LIMA, 2003.).

Feng *et al.* (2013) mostraram que o envelhecimento por UV aumenta a viscosidade e os valores de $|G^*|$. Em paralelo, Kim (2008) indica que elevados valores de $|G^*|$ são favoráveis para a deformação permanente e desfavoráveis para o desempenho quanto ao trincamento térmico.

Durante o envelhecimento do ligante podem ocorrer diversas reações químicas, logo a importância de se analisar, também, quimicamente. Para isso, inúmeras técnicas podem ser empregadas, como o fracionamento SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos) e a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Na análise do comportamento dos ligantes asfálticos, Schmidt (2022) frisa que a observação das frações SARA é a técnica mais conhecida. A metodologia de separação é normatizada pela ASTM 4124-01 e está ilustrada na Figura 9.

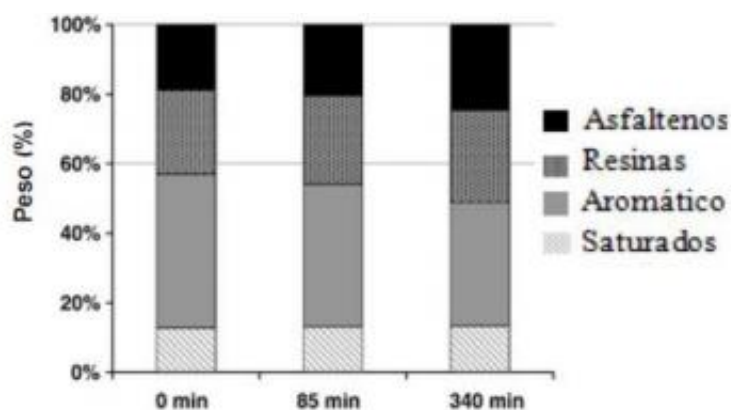
Figura 9 - Esquema do fracionamento SARA



Fonte: Adaptado de Cravo (2016).

Bernucci *et al.* (2022) destaca que durante o envelhecimento do ligante, o conteúdo de asfaltenos aumenta com o passar do tempo, como resultado da oxidação dos maltenos. Nos maltenos, a quantidade de resinas é praticamente mantida, os saturados sofrem pouca alteração e os aromáticos diminuem. Este processo pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Frações SARA de um ligante asfáltico, antes e após envelhecimento de curto prazo (RTFOT)

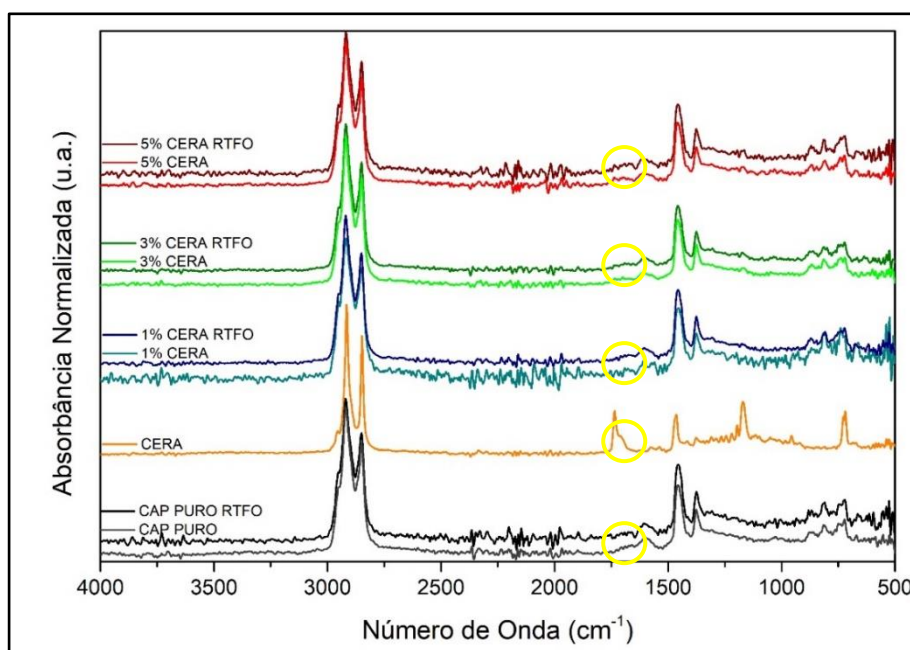


Fonte: Lesueur (2009).

Hunter *et al.* (2015) notaram o aumento da rigidez e da viscosidade do ligante asfáltico com o aumento do teor de asfaltenos decorrente do processo de oxidação. Isto posto, é possível realizar o cálculo da concentração dos grupos funcionais, baseado na comparação das áreas de absorção características, por meio do FTIR.

Quanto a caracterização do ligante, os principais sinais indicativos da sua composição estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos, sendo estas caracterizadas por picos de alta intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3.000 e 2.800 cm^{-1} . Para quantificar o envelhecimento por meio do FTIR, sabe-se que uma substância envelhece mais que a outra quando a área compreendida entre as linhas dos espectros após o envelhecimento é maior que as obtidas antes do envelhecimento representando uma maior oxidação. Na Figura 11 têm-se o exemplo de linhas dos espectros para amostras de ligante rejuvenescido com cera.

Figura 11 - Espectros de FTIR para amostras de ligante asfáltico modificado com cera



Fonte: Sousa *et al.* (2023)

Sousa *et al.* (2023) trabalharam a modificação de misturas asfálticas por meio da adição de cera de abelha. Ao observarem o espectro em torno de 1.735 cm^{-1} , nota-se que não aparecem picos correlacionados com oxidação, indicando que a cera e a mistura cera-ligante sofreram baixa (ou quase nula) oxidação. A partir das linhas dos espectros é possível observar que os ligantes modificados com a cera de abelha

envelheceu menos do que a amostra de ligante puro, ou seja, o aditivo atuou como um antioxidante.

Mouillet (2010) indica as Equações 1 e 2, retiradas do método MLPC N° 69, para o cálculo dos índices de oxidação Carbonilas e Sulfóxidos. Nestas equações, supõe-se que o grupo Metil (CH₃ – em torno de 1375 cm⁻¹) e o grupo Etileno (CH₂ – em torno de 1460 cm⁻¹) são pouco alterados quando o ligante é oxidado. Em compensação, os Sulfóxidos (S=O – em torno de 1030 cm⁻¹) e os grupos Carbonilas (C=O - em torno de 1700 cm⁻¹) aumentam com a oxidação.

$$IC (\%) = 100 \times IC = 100 \times \frac{\text{Área em torno de } 1700\text{cm}^{-1}}{(\text{Área em torno de } 1460\text{cm}^{-1})+(\text{Área em torno de } 1375\text{cm}^{-1})} \quad (1)$$

$$IS (\%) = 100 \times IS = 100 \times \frac{\text{Área em torno de } 1030\text{cm}^{-1}}{(\text{Área em torno de } 1460\text{cm}^{-1})+(\text{Área em torno de } 1375\text{cm}^{-1})} \quad (2)$$

2.4.2 Metodologias de envelhecimento em laboratório

Existem metodologias que simulam em laboratório o envelhecimento, tanto do ligante como das misturas asfálticas, a fim de verificar a influência deste processo nas propriedades do ligante e do pavimento. No Quadro 4 estão descritas brevemente algumas técnicas utilizadas para este fim.

Quadro 4 – Protocolos de envelhecimento em laboratório.

Material	Metodologia	Simulação do envelhecimento
Ligante asfáltico	Rolling Thin Oven Test (RTFOT) – ASTM D2872, AASHTO T240	Ensaio realizado à 163 °C, com a finalidade de simular o envelhecimento à curto prazo.
	Pressure Aging Vessel (PAV) – ASTM D6521	Ensaio realizado entre 90 e 110 °C, com o resíduo do RTFOT, a fim de reproduzir o envelhecimento à longo prazo, equivalente ao tempo de serviço de 5 a 10 anos.
	SUNTEST – Envelhecimento por radiação UV – Cravo (2016)	O ensaio simula a exposição solar, na qual uma camada bem fina de cada amostra de ligante asfáltico com espessura de 0,7 mm é irradiada na região do ultravioleta e visível durante 120 h a 90 °C.

Mistura asfáltica	Short-Term-Oven Aging (STOA) – AASHTO R30	A mistura solta é mantida em estufa por 4 h ± 5 minutos, a uma temperatura de 135 ± 3 °C, simulando o envelhecimento que ocorre durante o período de usinagem, transporte e compactação.
	Long-Term-Oven Aging (LTOA) – AASHTO R30	As amostras são condicionadas, em estufa, à 85 °C por 5 dias, o que simula um envelhecimento de campo entre 5 e 7 anos.
	LTOA – Departamento de Transporte de Wisconsin (WisDOT)	Consiste em envelhecer misturas soltas por 12 horas a 135 °C antes da compactação.

Zhao *et al.* (2019) analisaram correlações entre diferentes condições de envelhecimento em laboratório para o ligante asfáltico e misturas asfálticas. Na ocasião, os ligantes submetidos ao envelhecimento PAV, por 20 horas, apresentam propriedades reológicas equivalentes às misturas asfálticas submetidos ao protocolo de envelhecimento em estufa de longa duração (LTOA). Já os ligantes submetidos ao envelhecimento PAV, por 40 horas, apresentam propriedades reológicas equivalentes às de misturas soltas submetidas ao protocolo LTOA por 12 h a 135 °C.

Takahashi (2020) estudou acerca do envelhecimento em laboratório de dois ligantes convencionais, considerando o envelhecimento termo oxidativo e por radiação UV. Diante dos resultados, notou-se que o envelhecimento pelo SUNTEST é o que resulta numa curva característica de dano mais parecida com o campo após um envelhecimento de 36 meses, quando comparado ao ensaio PAV, indicando a importância da radiação UV no processo de envelhecimento dos ligantes asfálticos.

O envelhecimento de uma mistura asfáltica, em campo, está relacionado à temperatura, ao tempo em serviço do pavimento, ao volume de vazios da mistura, ao tipo e teor de ligante e à absorção de agregados. Por exemplo, agregados com alta absorção podem reter água e outros contaminantes em suas superfícies, que podem comprometer a adesão entre o ligante e os agregados durante o processo de mistura e ao longo da vida útil do pavimento. Logo, tendo em vista que a absorção dos agregados é um fator que influencia o envelhecimento da mistura, ensaios que trabalham somente a oxidação do ligante asfáltico não são representativos o suficiente para prever o desempenho da mistura (BELL e SOSNOVSKE, 1994).

A fim de reproduzir em laboratório o desgaste sofrido pelo pavimento, a norma AASHTO R30 foi publicada e é baseada no condicionamento de misturas asfálticas em estufa, a 135 °C e consiste em duas etapas: envelhecimento à curto prazo e envelhecimento à longo prazo. O primeiro está relacionado à oxidação sofrida no período de usinagem, transporte e compactação da mistura asfáltica. Já o envelhecimento à longo prazo refere-se ao desgaste que o pavimento é submetido durante sua vida útil.

Sanchez *et al.* (2020) estudaram os efeitos combinados de envelhecimento em estufa e umidade nas propriedades viscoelásticas de uma OGFC. O método de condicionamento incluiu o envelhecimento, a curto e longo prazo, da mistura asfáltica solta, e após compactada, as amostras foram submetidas a diferentes ciclos de vapor d'água. Os resultados demonstraram que os efeitos combinados do envelhecimento a longo prazo e dos ciclos de umidade reduziram a energia de fratura e outros parâmetros de fratura da mistura entre 2 e 10 vezes em relação à condição de envelhecimento a curto prazo no estado seco.

2.4.3 Técnicas de rejuvenescimento

Com a finalidade de recuperar propriedades originais do ligante asfáltico, como a viscosidade, faz-se necessário a incorporação de aditivos restauradores de maltenos ou redutores de consistência (GU *et al.*, 2019). Os rejuvenescedores à base de óleo de xisto e à base de alcatrão são os principais produtos disponíveis atualmente no mercado para esta finalidade (SILVA e FARIAS, 2018). Tabaković *et al.* (2016) destacam alguns rejuvenescedores comerciais, sendo estes: Modeseal R20, Reclamite, Paxole 1009, Cyclepave e ACF Iterlene 1000.

Costa (2022) cita que as primeiras experiências realizadas para recuperação das propriedades do ligante envelhecido foram feitas com a utilização dos seguintes aditivos redutores de viscosidade: Óleos de processo industrial, ligantes asfálticos de baixa viscosidade, *Tall oil* refinado, óleos vegetais, graxa vegetal, óleo lubrificante e pasta de óleo. Devido à busca por materiais de fontes renováveis, têm-se investigado a substituição dos agentes rejuvenescedores tradicionais por materiais de origem vegetal e resíduos (ZARGAR *et al.*, 2012).

O tipo e quantidade de aditivo utilizado nas misturas devem ser analisados, antevendo também a temperatura que o pavimento será submetido na vida de serviço.

Sales (2015) ressalta que isto deve ser feito a fim de se evitar problemas com deformação permanente e trincamento por baixas temperaturas, pois a baixa viscosidade e o excesso de aditivo podem enrijecer a mistura.

Substâncias que são utilizados como rejuvenescedores precisam ser altamente aromáticas e apresentar uma composição que aumente o poder peptizador da fração maltenos do ligante asfáltico. Na maioria das vezes, os agentes rejuvenescedores de ligantes asfálticos contêm uma grande quantidade de óleos combustíveis pesados para compensar as frações leves que são perdidas durante o processo de envelhecimento. No entanto, esses rejuvenescedores podem evaporar facilmente quando expostos a altas temperaturas (JI *et al.*, 2017).

Portugal *et al.* (2017) destacam que os óleos vegetais, novos e residuais, são ricos em ácidos graxos não saturados e apresentam resistência à altas temperaturas. Logo, em razão dos mecanismos de envelhecimento e rejuvenescimento do ligante asfáltico, eles podem ser utilizados para a recuperação de ligantes asfálticos envelhecidos. Além disso, não apresentam risco à saúde nem requerem nenhuma medida especial de segurança para o seu manuseio, pois são termicamente estáveis (MICAELO *et al.*, 2016).

Costa (2022) frisa que por ser um componente de uso recente na pavimentação e a sua variedade, não existe um consenso na determinação do teor do rejuvenescedor ou o momento ideal de sua adição. Em relação aos aditivos orgânicos, estes podem ser introduzidos previamente ao ligante asfáltico ou juntamente com este durante a usinagem, reduzindo sua viscosidade. Isso ocorre porque o aditivo é submetido a temperaturas superiores ao seu ponto de amolecimento (CERATTI *et al.*, 2015; SALES, 2015).

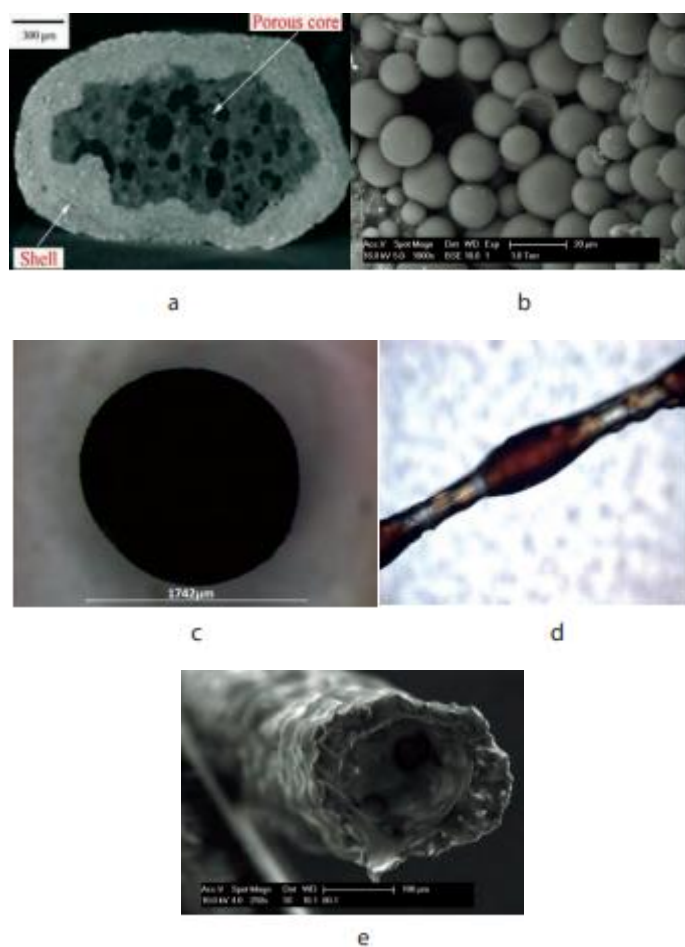
Além de analisar a eficácia dos agentes rejuvenescedores, Costa (2022) teve como um dos objetivos determinar a etapa produtiva na qual deve ser adicionado, sendo estas: adição junto aos agregados, adição junto ao RAP e adição junto ao ligante. Diante dos resultados, não foi possível observar variações significativas entre a adição do agente rejuvenescedor nas diferentes etapas do processo de produção de misturas asfálticas, no entanto, a etapa que apresentou resultados levemente superiores as demais foi a adição diretamente ao ligante.

Outra técnica de aplicação de rejuvenescedores em misturas asfálticas é a pulverização direta na superfície do pavimento. Esta, promove a redução da

viscosidade do ligante envelhecido na superfície da camada de revestimento e diminui a desagregação de partículas, no entanto, o rejuvenescedor não é capaz de penetrar em mais de 20mm na camada tratada (SHEN *et al.*, 2007; BROWNRIDGE, 2010).

Por outro lado, estudos se desenvolveram acerca do encapsulamento de agentes rejuvenescedores, para adição em misturas asfálticas, com a finalidade de que este material seja liberado com o tempo. A adição de cápsulas preenchidas com estas substâncias permite baixar a viscosidade do ligante e estas começam a ser liberadas quando o ligante estiver rígido e quebradiço, difundindo-se e tornando o ligante flexível, o que evitará a desagregação (SCHLANGEN, *et al.* 2017). Existem diferentes métodos estudados (García *et al.* 2010; Su e Schlangen, 2014; Casado *et al.* 2014) para preparar cápsulas, como exemplificado na Figura 12.

Figura 12 - Tipos de cápsulas: a) partículas de areia porosa com revestimento à base de cimento; b) cápsulas de pré-polímero de MMF; c) cápsulas de alginato; d) e e) -fibras de alginato com bolsas contendo rejuvenescedor



Fonte: Schlangen, *et al.* (2017).

Um dos métodos consiste no encapsulamento de rejuvenescedor dentro de um invólucro polimérico, geralmente preparado por polimerização *in situ*, de pré-polímero metanolmelamina-formaldeído (MMF) (SU E SCHLANGEN, 2014). No entanto, a técnica possui a limitação de que o formaldeído em alta concentração pode ser perigoso para a saúde humana.

As cápsulas epóxi, estudadas por García *et al.* (2010) apresentaram-se resistentes o suficiente para sobreviver à mistura e compactação. Por outro lado, o mecanismo de ruptura para liberação do agente rejuvenescedor é difícil controle.

O método desenvolvido por Tabakovic *et al.* (2016), usando fibras de alginato, tem a capacidade de reparar apenas pequenas microfissuras e o conteúdo do rejuvenescedor é muito limitado. Já as cápsulas de alginato de cálcio têm baixa resistência e tendem a liberar o agente rejuvenescedor muito rápido (XU *et al.*, 2018; BAO *et al.*, 2020).

Garcia-Hemández *et al.* (2020) ao estudarem o uso de agentes rejuvenescedores encapsulados em pavimentos porosos apontaram que no meio poroso, o óleo é liberado gradualmente durante a vida útil do revestimento, diferente do que ocorre nas misturas densas, em que o óleo é liberado no momento em que as fissuras começam a aparecer. Isso ocorre, pois grande parte das cápsulas não chegam a se romper, desta forma, o óleo é liberado aos poucos, à medida que estas sofrem pressão decorrente do carregamento.

De acordo com Casado *et al.* (2014) o uso de agregados porosos preenchidos com agentes rejuvenescedores pode melhorar a qualidade das misturas asfálticas ao longo da vida útil. Nos métodos de encapsulamento descritos anteriormente, quando ocorrem danos no pavimento, como trincas e fissuras, estas são responsáveis pelo rompimento das cápsulas e conseqüente liberação do rejuvenescedor, diferente do que ocorre com o agregado poroso, que libera o agente rejuvenescedor sem o rompimento deste (CASADO *et al.*, 2021).

Para que um material possa ser utilizado com a finalidade de produzir cápsulas de rejuvenescedor, ele deve possuir uma grande área superficial e boas propriedades de absorção. Dentre alguns exemplos de agregado poroso que apresentam estas características tem-se a vermiculita expandida, a sepiolita e a perlita.

2.4.3.1 Utilização de óleos na pavimentação asfáltica

Os biorejuvenescedores e rejuvenescedores provenientes da reciclagem de resíduos estão recebendo atenção devido seu desempenho e sustentabilidade. Isso ocorre pois há a reciclagem de produtos que não contêm componentes aromáticos cancerígenos, o que torna seu uso mais seguro e possivelmente mais econômico (JI *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018; JALKH *et al.*, 2018; TAHERKHANI; NOORIAN, 2018; EL-SHORBAGY *et al.*, 2019; SOTOODEH-NIA *et al.*, 2019). Logo, diversas pesquisas se desenvolveram utilizando óleos na recuperação de ligantes asfálticos envelhecidos e, algumas destas pesquisas foram resumidas no Quadro 5.

Quadro 5 – Estudos acerca da utilização de óleos em misturas asfálticas.

Referência	Objetivos	Conclusões
Zargar <i>et al.</i> (2012)	Estudaram a utilização do óleo de cozinha residual, com a finalidade de rejuvenescimento do ligante envelhecido.	Verificou-se que a aplicação do óleo residual como rejuvenescedor do ligante envelhecido é uma solução ambiental e econômica para a reutilização deste resíduo.
Ali <i>et al.</i> (2016)	Avaliaram a capacidade de agentes de reciclagem (óleo naftênico, óleo parafínico, extrato aromático, <i>tall oil</i> e ácido oleico) em restaurar os graus de desempenho de ligantes envelhecidos em baixa e alta temperatura.	Todos os ligantes rejuvenescidos tiveram grau de desempenho inferior do que o ligante de controle. Os agentes de reciclagem também melhoraram, em até 10%, a resistência à fadiga sem influenciar substancialmente o desempenho quanto a deformação permanente.
Ji <i>et al.</i> (2017)	Investigaram a adição de óleo de soja e de milho para recuperar as propriedades reológicas de um ligante asfáltico envelhecido, extraído de RAP (<i>Reclaimed asphalt pavement</i>).	A adição é capaz de reduzir a rigidez e aumentar a plasticidade do ligante envelhecido, tal qual um rejuvenescedor convencional à base de óleo combustível.

Nabizadeh <i>et al.</i> (2017)	Estudaram os efeitos de três agentes de reciclagem (estrato aromático, tall oil e óleo de soja) sobre as características mecânicas das misturas asfálticas contendo alta porcentagem de RAP.	Os resultados mostraram que os agentes de reciclagem aumentaram a ductilidade das misturas de alto teor de RAP, conseqüentemente, ocorrendo uma melhoria na resistência ao trincamento.
Elkashef <i>et al.</i> (2018)	Analisaram um derivado de óleo de soja para rejuvenescer o ligante envelhecido extraído de uma amostra de RAP.	Um estudo das curvas principais de BBR mostra uma melhora de 15% na compliância de fluência do ligante rejuvenescido, indicando a capacidade do ligante de dissipar o carregamento de fadiga térmica.
Al-Sabaei <i>et al.</i> (2019)	Avaliaram o desempenho reológico à altas temperaturas de um bioasfalto borracha.	5% de óleo de palma + 15% de óleo de pirólise de pneus (TPO) apresentou a maior substituição possível para manter o PG 64. Outros estudos foram sugeridos para investigar os efeitos da composição óleo de palma + TPO no desempenho de misturas asfálticas do tipo WMA e SMA.
Zhang <i>et al.</i> (2020)	Analisaram o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com alto teor de RAP, e rejuvenescedores autodesenvolvidos com óleo aromático, plastificante e antideslizante.	A adição de rejuvenescedores melhorou a resistência à fissuração a baixas temperaturas.
Barros (2020)	Analisou a incorporação de agentes rejuvenescedores (óleo de soja e óleo de cozinha residual) encapsulados, com a finalidade de intensificar a	Os resultados demonstraram que as cápsulas possuem propriedades que viabilizam sua adição nas misturas asfálticas. As adições não afetaram consideravelmente o volume de vazios e a resistência à tração, mas, de forma geral,

	autorregeneração natural de misturas asfálticas.	reduziram a resistência ao dano por umidade, o módulo de resiliência, a resistência a deformação permanente e vida de fadiga.
Rafiq <i>et al.</i> (2021)	Estudaram os efeitos do óleo de palma nas propriedades de misturas asfálticas recicladas (RAP).	O óleo de palma proporcionou melhoria significativa na restauração das propriedades de envelhecimento de ligantes e misturas de RAP.
Uchoa <i>et al.</i> (2021)	Avaliaram os efeitos do óleo de palma de base biológica nas propriedades reológicas e mecânicas do ligante.	O óleo de palma de base biológica é um bio-óleo promissor na melhoria das propriedades do bioligante. Os modificadores promoveram mudanças significativas nas propriedades térmicas e microestruturais do ligante.
Costa (2022)	Analisou misturas asfálticas com adição de alto teores de RAP, de diferentes tipos de agentes de reciclagem (ADCAP WM e óleo residual de motor) e em etapas distintas da produção de mistura asfáltica reciclada.	Ao se adicionar óleo residual de motor é possível confeccionar misturas recicladas com adições de 50 e 75% de fresado, desde que a adição do óleo residual seja feita diretamente ao ligante novo. Para o caso de adições de ADCAP WM as mesmas adições podem ser realizadas e as configurações de adição podem ser acrescidas de adição do agente de reciclagem junto ao agregado.
Melo Neto <i>et al.</i> (2022)	Avaliou o uso do ácido graxo da borra do óleo de soja (SSFA) como agente rejuvenescedor para misturas asfálticas recicladas.	Os resultados apontaram efeito rejuvenescedor do SSFA e este foi usado como modificador das misturas asfálticas recicladas com 40% de RAP em teores de 0, 3 e 5%.
Kargari <i>et al.</i> (2022)	Investigaram o efeito das cápsulas de óleo de palma na autorregeneração de misturas asfálticas densas.	As cápsulas de óleo de palma se apresentaram como método promissor no aumento da capacidade regenerativa de misturas asfálticas.

Al-Sabaei *et al.* (2019) avaliaram o desempenho reológico, à altas temperaturas, de bioasfalto borracha, produzido da combinação do ligante

convencional (CAP 50/70) com óleo de palma e óleo de pirólise de pneus. Pelos resultados, notou-se que a composição óleo de palma/TPO tornou o ligante menos sensível ao envelhecimento, além de permitirem a redução de temperaturas de mistura e compactação em 10%.

Rafiq *et al.* (2021) trabalharam com misturas asfálticas recicladas a fim de analisar os efeitos do óleo de palma nas propriedades destas. Constatou-se que a adição de 9,36% de óleo, em relação a massa de ligante, possibilita a utilização de até 76% de RAP (*Reclaimed asphalt pavement*) já que o óleo proporciona melhora nas propriedades microestruturais das misturas, convencional e reciclada.

Uchoa *et al.* (2021) analisaram o comportamento reológico de um ligante modificado com frações provenientes do óleo de palma, sendo: 3% de gordura hidrogenada de óleo de palma (HPF) e 3% de amida de gordura hidrogenada de palma (FAA). Diante dos resultados, percebe-se que a HPF e a FAA agiram como rejuvenescedores do ligante envelhecido, reduzindo a propriedades reológicas como a viscosidade, e conseqüentemente, permitiram a redução das temperaturas de usinagem e compactação. A adição da FAA e da HPF permitiu uma redução da temperatura de mistura em 9 e 7,5 °C, respectivamente, e da temperatura de compactação em 5,5 e 6 °C.

Kargari *et al.* (2022) investigaram o efeito das cápsulas de óleo de palma na autorregeneração de misturas asfálticas densas envelhecidas e não envelhecidas, por meio da associação com a técnica de aquecimento por indução, que utilizou fibras de lã de aço. Os resultados demonstraram um aumento significativo da capacidade de regeneração das misturas asfálticas modificadas com as cápsulas de óleo de palma, sendo este aumento na ordem de 32% para as misturas envelhecidas e 7% para as não envelhecidas.

Portugal *et al.* (2017) trabalharam com o óleo de soja e óleo de milho, nas condições novo e pós-consumo (residual), em teores de 1%, 2% e 3%. Os resultados mostraram que a adição de 1% de óleo de soja e milho (novo e residual) mantém as características físicas e reológicas sem comprometer o desempenho dos ligantes. Além disso, não foi verificada diferença significativa na utilização de óleo novo ou residual.

Barros (2020) ao utilizar óleo de soja e óleo de cozinha residual como agentes rejuvenescedores de misturas asfálticas, produziu três tipos de cápsulas: Tipo 1, Tipo

1 residual e Tipo 2, as duas primeiras contendo o mesmo teor de óleo, porém compostas por óleo de soja e óleo residual, respectivamente, e a terceira possuindo um maior teor de óleo de soja. Ao analisar os níveis de autorregeneração máximos alcançados, os resultados foram de 138%, 193% e 147% para as misturas com cápsulas Tipo 1, Tipo 1 residual e Tipo 2, respectivamente, enquanto para a mistura sem cápsulas esse valor atingiu 52%. Portanto, destaca-se o uso das cápsulas com óleo residual por promover ganhos ambientais ao fornecer um reuso para esse resíduo.

De forma geral, o óleo de cozinha residual oferece propriedades antioxidantes ao ligante envelhecido e, em termos de propriedades químicas, físicas e reológicas, o ligante asfáltico rejuvenescido não apresenta diferenças significativas em relação ao seu equivalente novo (ASLI *et al.*, 2012; AZAGAR *et al.*, 2016; ZARGAR *et al.*, 2012). Logo, a utilização do óleo de soja residual como agente rejuvenecedor de ligantes asfálticos pode ser uma alternativa para a destinação correta do óleo vegetal, sendo assim uma solução ecologicamente adequada para o descarte deste material.

2.4.3.2 Problemática acerca do descarte de óleos de cozinha residuais

Um dos itens de cozinha mais amplamente utilizados é o óleo de cozinha comestível, que pode ser obtido de diversas fontes, animais e vegetais. Em paralelo, o aumento da população tem levado a um aumento na produção de alimentos, e conseqüentemente, elevado a geração de resíduos de óleo de cozinha.

Quando os óleos e gorduras são utilizados, ou seja, são saturados, tornam-se inadequados para novas frituras, pois conferem sabor e odor desagradáveis aos alimentos e apresentam características químicas prejudiciais à saúde humana. Normalmente, os resíduos domésticos e comerciais desses materiais não possuem uma utilização prática e, portanto, são geralmente descartados na rede de esgoto. (SILVA *et al.*, 2007).

A destinação adequada desse óleo residual é uma grande preocupação, pois tem a capacidade de aumentar os problemas ambientais. Nos últimos anos, o óleo de cozinha proveniente de frituras foi elevado ao nível de importante poluente ambiental porque têm o potencial de poluir rios e recursos naturais (BANERJI, *et al.* 2022).

Em geral, o descarte de óleo usado em aterros sanitários ou rios é feito sem que haja algum tratamento (LI *et al.*, 2019). Segundo a SABESP (2017), um litro de óleo é capaz de poluir 25 mil litros de água. Como alternativa para redução da problemáticas decorrente desta prática, a opção é a reutilização ou reciclagem destes resíduos.

Em 2020, durante a campanha "Óleo no Meu Quintal Não", o Ministério do Meio Ambiente do Brasil, divulgou a estimativa de que mais de 1 bilhão de litros de óleo de cozinha são descartados anualmente no país. No entanto, apenas uma pequena parte é reciclada ou reutilizada. De acordo com a Agência Brasil (2019), cerca de 90% do óleo de cozinha é descartado de forma incorreta.

Pode-se aproveitar o óleo residual, oriundo de estabelecimentos gastronômicos, indústrias e residências, para a produção de sabão, biodiesel e outros produtos que são biodegradáveis, como os biolubrificantes (RINALDI *et al.*, 2007). Logo, surgem diversas iniciativas para reaproveitar o óleo pós-fritura, desenvolvidas tanto por órgãos públicos quanto privados. Em comparação com outros componentes de baixa viscosidade, o óleo de cozinha residual apresenta um ponto de fulgor acima de 220°C, o que indica que o uso desse óleo no processo de produção de misturas asfálticas é altamente seguro.

2.4.3.3 Óleo de soja

A soja, leguminosa originária da Ásia Oriental, é cultivada em todo o mundo devido ao seu alto teor de proteínas e lipídios. Enquanto na cultura asiática a soja é usada em alimentos tradicionais como extrato hidrossolúvel de soja e produtos fermentados, no ocidente, a utilização mais comum é em forma de farelo e óleo de soja (MEDIC *et al.*, 2014; BAGALE, 2021).

A soja contém aproximadamente 40% de proteínas e 20% de fração oleosa, rica em ácidos graxos poli-insaturados, além de conter vitaminas. Nas últimas décadas, houve um aumento significativo na produção, atribuído principalmente ao aumento do uso de oleaginosas como fonte importante de proteína vegetal, bem como à sua utilização na produção de biocombustíveis (MEDIC *et al.*, 2014; BAGALE, 2021).

De acordo com o relatório de Perspectivas Agrícolas Mundiais (*World Agricultural Supply and Demand Estimates - WASDE*), do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a produção mundial de soja, na safra

2021/2022, foi de aproximadamente 362,6 milhões de toneladas. Vale ressaltar que a produção de soja é liderada pelo Brasil e pelos Estados Unidos, que juntos são responsáveis por mais de 70% da produção global. Outros grandes produtores incluem a Argentina, China e Índia.

A soja é uma das principais *commodities* agrícolas produzidas no Brasil, sendo um importante produto de exportação para o país. De acordo com o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), divulgado em fevereiro de 2022, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção de soja no Brasil em 2021 atingiu 135,8 milhões de toneladas, um aumento de 9,9% em relação ao ano anterior.

O óleo de soja é um dos principais produtos derivados da soja produzidos no Brasil, com uma grande demanda tanto no mercado interno, quanto externo. Este óleo é rico em antioxidantes, como tocoferóis e tocotrienóis, e é um dos óleos vegetais mais comumente utilizados em frituras domésticas e industriais (CLEMENTE e CAHOON, 2009; KAMISAH *et al.*, 2005).

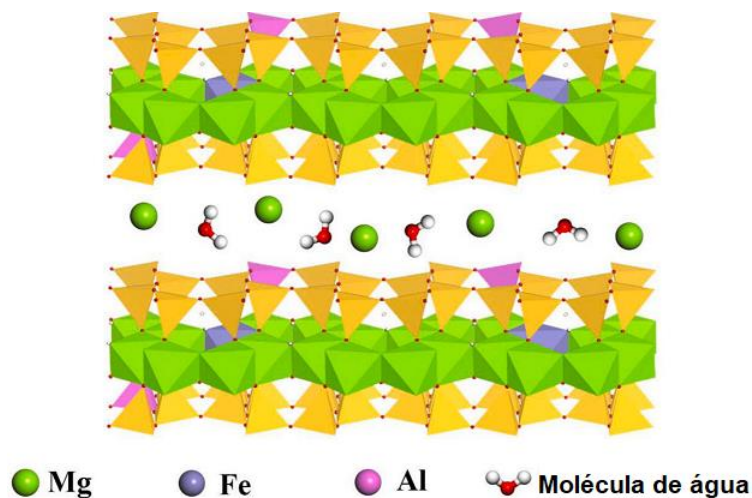
Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de óleo de soja no Brasil, em 2021, foi de cerca de 8,9 milhões de toneladas. Esses números correspondem aos dados de janeiro a novembro de 2021 e foram divulgados pelo MAPA em seu Boletim Mensal de Acompanhamento Econômico, em dezembro de 2021.

Camillo (2012) destaca a demanda do mercado mundial por óleos e gorduras e que apenas três culturas respondem por cerca de 60% desta demanda, sendo a palma de óleo (24%), soja (24%) e a canola (12%). Acerca da produtividade, a soja produz em média 0,46 ton/ha/ano de óleo (CHIA *et al.*, 2009).

2.4.3.4 Vermiculita

A vermiculita é um mineral filossilicato trimórfico, composto de uma estrutura típica de 2:1, que consiste em duas camadas tetraédricas de silicato que envolvem uma camada octaédrica de alumínio, magnésio ou ferro hidratado, como esquematizado na Figura 13. Possui estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal, características que se assemelham as do mineral responsável pela sua origem: a mica (CINTRA, 2013; LI, *et al.* 2021).

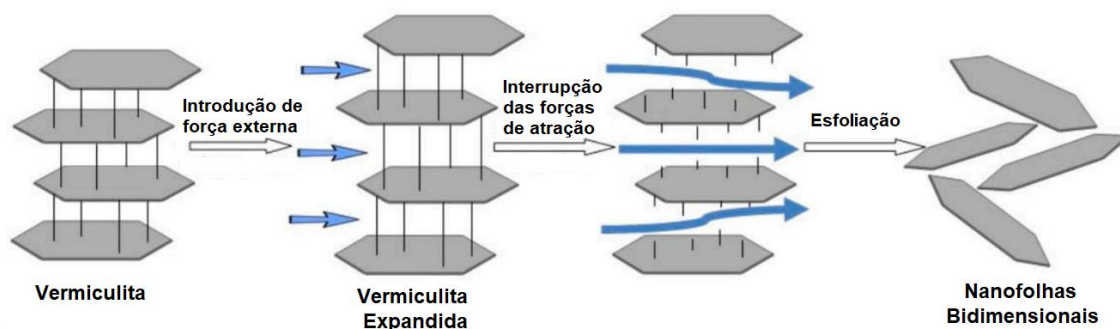
Figura 13 - Diagrama esquemático da estrutura da vermiculita.



Fonte: Adaptado de LI, *et al.* (2021).

Na atualidade existem poucas aplicações diretas da vermiculita *in natura*, logo, o ciclo produtivo envolve a prospecção, a extração, o transporte e processamento (expansão e esfoliação). Na Figura 14 é apresentado um esquema simplificado dos processos de extração e esfoliação da vermiculita.

Figura 14 - Esquema simplificado do processamento da vermiculita.



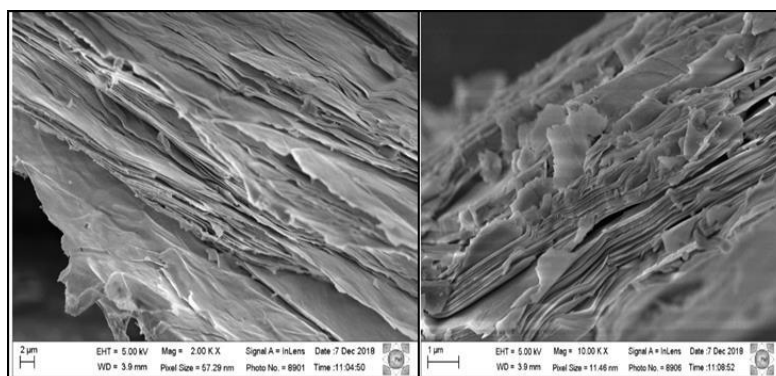
Fonte: Adaptado de LI, *et al.* (2021).

A expansão de volume após o aquecimento é uma característica que permite a formação de um material altamente poroso, que recebe o nome de vermiculita expandida. Posteriormente, este material pode ser esfoliado em nanofolhas bidimensionais que possuem uma área superficial específica maior que a da vermiculita expandida, devida à exposição das superfícies entre as camadas (LI, *et al.* 2021).

A maior parte das aplicações da vermiculita tende a ser na forma expandida. Esta forma é alcançada por meio do aquecimento a temperaturas que podem variar de 800°C a 1000°C, quando ocorre a expansão volumétrica do material - de 200% a 300%, a depender a temperatura final e da taxa de aquecimento ou de 15 a 30 vezes do volume original (PESSATTO, 2005; UGARTE, *et al.* 2008; CINTRA, 2013).

A estrutura formada após o aquecimento possui alta porosidade e uma grande quantidade de vazios preenchidos por ar, como pode ser visto na Figura 15 (KOKSAL *et al.*, 2015). Segundo Nascimento (2021), após a expansão, a massa específica aparente da vermiculita reduz de 640-960 kg/m³ para 56 -192 kg/m³, podendo então ser classificada como agregado leve.

Figura 15 - Imagens do MEV da vermiculita expandida.



Fonte: Guilherme *et al.* (2020).

A água presente entre as camadas da partícula de vermiculita é removida durante o aquecimento, o que resulta na expansão da mesma (GENCEL, *et al.*, 2014). Rashad (2016) destaca que a composição química da vermiculita não muda durante a expansão térmica, ocorre apenas a saída da água ligada às camadas.

Os maiores produtores mundiais de vermiculita são África do Sul, EUA, Brasil e China (TAMURA *et al.* 2015; SWAYZE *et al.* (2018); BARABASZOVA *et al.* 2016; MIAO *et al.* 2014; WAN *et al.* 2019). Estima-se que o Brasil apresenta cerca de 10% das reservas mundiais e possui uma reserva lavrável em torno de 6,3 milhões de toneladas, segundo dados do Sumário Nacional de Produção Mineral, publicado pelo Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2015).

A vermiculita expandida apresenta propriedades como, baixa densidade, baixa condutividade térmica, isolamento térmico, isolamento acústico e grande área de superfície específica. Estas características permitem aplicá-la em diversos campos,

como material de construção, agricultura, acústica, isolantes térmicos, adsorventes, etc. (LI, *et al.* 2021). A depender do tamanho de seus grãos, pode ser utilizada para uma aplicação ou outra. No Brasil, a vermiculita expandida é classificada de acordo com a composição granulométrica, como descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação granulométrica da vermiculita expandida.

Padrão brasileiro	Tamanho (mm)
Média	55 – 95% > 2,4
Fina	65 – 95% > 1,2
Superfina	70 – 95% > 0,6
Micrômetro	80 – 100% > 0,3

Fonte: Reis (2002).

Os grãos mais finos são utilizados na produção de materiais para construção civil, na alimentação para animais e para a produção de fertilizantes. Em paralelo, as partículas mais grossas são usadas para fins de horticultura, germinação de sementes, cultivo, entre outros (NASCIMENTO, 2021).

Na construção civil, a vermiculita expandida é utilizada principalmente na produção de materiais de construção leves. A sua elevada porosidade associada à baixa densidade, concede ao material propriedades isolantes, que é uma particularidade amplamente almejada para a produção de materiais com esta mesma característica. A condutividade térmica está altamente relacionada à porosidade do material, de tal forma que, se a porosidade for alta, a condutividade será baixa. (KOKSAL *et al.*, 2020; BENLI, *et al.*, 2020).

Além disso, as propriedades diversas da vermiculita expandida permitem que pesquisas se desenvolvam a fim de expandir as possibilidades de utilização. Alguns desses trabalhos e campos de aplicações estão descritos na Quadro 6.

Quadro 6 - Pesquisas relacionadas às possibilidades de aplicações da vermiculita expandida.

Aplicações	Trabalhos Relacionados	Descrição
Adsorção ambiental	Johnson e Worrall (2007); Medeiros <i>et al.</i> (2009); Lee (2012); Duman <i>et al.</i> (2015); Zhang <i>et al.</i> (2017).	Devido à forte capacidade de troca iônica e grande área superficial específica da vermiculita expandida, desenvolveram-se muitas pesquisas sobre a adsorção de poluentes na água por esta, que inclui a adsorção de íons de metais pesados, nitrogênio amoniacal, corante, óleo, etc.
Armazenamento de energia	Wen <i>et al.</i> (2016); Zhang <i>et al.</i> (2019).	A vermiculita expandida possui excelentes propriedades físicas e químicas, estrutura porosa, resistência à chama, inércia e baixa densidade, o que a torna uma boa matéria-prima para materiais de mudança de fase.
Retardador de chama	Wang <i>et al.</i> (2016); Wang <i>et al.</i> (2016); Wang e Li (2018); Xia e Wang (2019).	A vermiculita expandida possui altos parâmetros de isolamento térmico, o que a torna útil para a fabricação de diferentes tipos de materiais resistentes ao fogo.

Uma nova possibilidade de aplicação da vermiculita expandida foi explorada por Casado *et al.* (2021) ao utilizarem agregados porosos como veículo carreador de um agente rejuvenescedor comercial, com a finalidade de adicioná-los à mistura asfáltica. Esses agregados possuem um alto teor de poros, tornando-os adequados para uso como material de encapsulamento.

Casado *et al.* (2021) estudaram dois tipos diferentes de agregados porosos, a sepiolita e a vermiculita expandida, com tamanho de partícula e morfologia diferentes. No geral, os resultados da pesquisa indicaram que a vermiculita expandida possui características, como elevada porosidade e baixa densidade, que a torna uma alternativa promissora como material carreador de agentes rejuvenescedores, a fim de reduzir o envelhecimento prematuro de pavimentos asfálticos, melhorando a qualidade do ligante ao longo da vida útil.

2.5 Considerações Finais

No decorrer deste capítulo foram explanadas as principais consequências do recobrimento do solo natural por materiais impermeáveis, como o aumento da probabilidade de alagamentos nas grandes cidades e o excesso de ruído nas áreas urbanas, advindo do contato pneu-pavimento. Além disso, pode-se citar os elevados números de acidentes rodoviários em épocas chuvosas, já que ocorre a formação de uma lâmina d'água sobre a pista, que por consequência, resulta na perda de controle do veículo, resultante da redução na aderência pneu-pavimento.

Por outro lado, grandes cidades já fazem a implantação de projetos que visam amortizar os grandes volumes de chuvas, de forma a reduzir os impactos causados por estas, como é o caso das cidades-esponja. Este conceito tem por objetivo utilizar estratégias que permitam aumentar a permeabilidade do solo, como: parques, pavimentos permeáveis, poços de infiltração e retenção, jardins e plantações de agricultura urbana, paredes e coberturas verdes. Logo, no âmbito da engenharia rodoviária, destaca-se o uso dos pavimentos permeáveis como técnica alternativa para aumento da permeabilidade do solo urbano.

Dentre a diversidade de materiais que existem e podem ser utilizados na pavimentação, as misturas asfálticas porosas são utilizadas com o intuito de promover ao pavimento a capacidade de dar vazão às águas e reduzir os danos que porventura o seu acúmulo venha causar. Este tipo de mistura se caracteriza por seu elevado volume de vazios, e quando tem por objetivo servir como camada de desgaste, é chamada de camada porosa de atrito e não apresenta finalidade estrutural.

Visto que a utilização da CPA pode ser uma alternativa na mitigação dos danos decorrentes do revestimento do solo natural, esta pesquisa tem como alvo elucidar algumas das limitações que ainda existem na utilização desta técnica, como a baixa durabilidade decorrente do envelhecimento precoce do ligante e consequente desagregação. Para isso, optou-se pela análise de uma técnica que permita reduzir o envelhecimento do ligante asfáltico, sem que as características mecânicas e funcionais da mistura sejam afetadas drasticamente.

A alternativa escolhida foi a adição de um agente rejuvenescedor encapsulados às misturas asfálticas porosas, ao invés da adição direta ao ligante, como comumente acontece. Isto ocorreu, pois, a adição direta ao ligante causaria uma redução na viscosidade do ligante e consequentemente, o escorrimento deste tende

a aumentar. A técnica consiste em acrescentar cápsulas ao revestimento, contendo algum material que seja capaz de recuperar as propriedades do ligante envelhecido, ao longo da vida útil do pavimento.

Dentre as diversas metodologias estudadas acerca da encapsulação de agentes rejuvenescedores, como as cápsulas de alginato de cálcio e a utilização de agregados porosos, esta última apresenta um mecanismo mais eficiente de difusão do óleo na CPA. Isto ocorre pois, diferente das outras técnicas, esta não necessita que ocorra o rompimento da cápsula, para que o óleo seja liberado, ele ocorre naturalmente ao longo da vida de serviço do revestimento.

Como a CPA não tem função estrutural, ela tende a não fadigar, ou seja, a ocorrência de trincas não é tão comum. Logo, a utilização de cápsulas que necessitem do surgimento de trincas para seu rompimento se torna inviável neste tipo de mistura asfáltica. Diante disto, optou-se por utilizar a vermiculita, que é um agregado poroso com alto poder de adsorção, como material carreador do agente de rejuvenescimento.

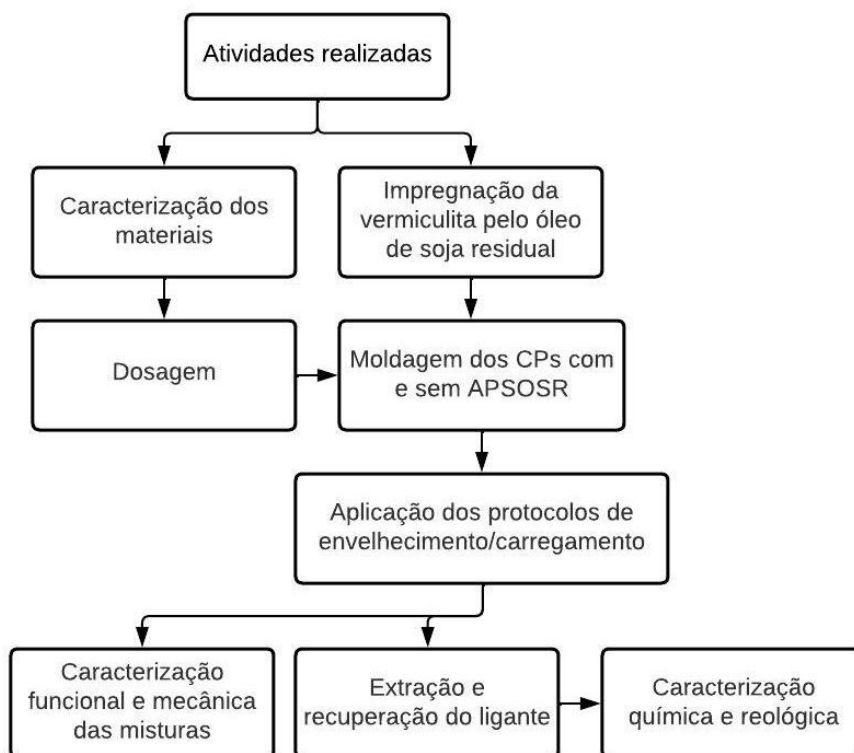
Quanto à definição do agente rejuvenescedor para preenchimento do agregado poroso, foi escolhido um óleo que apresentasse alta produtividade e ao mesmo tempo, possuísse propriedades físicas condizente com a utilização em misturas asfálticas. Logo, optou-se pelo óleo de soja residual, pois além de ser estável em altas temperaturas (até 180°C), que é justamente a faixa de trabalho de misturas asfálticas à quente, esta seria uma solução ecologicamente correta para a problemática do descarte de óleos de cozinha pós-fritura.

Outro ponto que se pode destacar quanto ao óleo vegetal residual é que ele já apresentou bons indicativos na utilização em misturas asfálticas, como os apontados por Portugal *et al.* (2017). Por exemplo, na produção de bioligantes foi observada uma redução na viscosidade, característica fundamental para que um agente encapsulado possa trabalhar no rejuvenescimento do ligante asfáltico.

3. METODOLOGIA

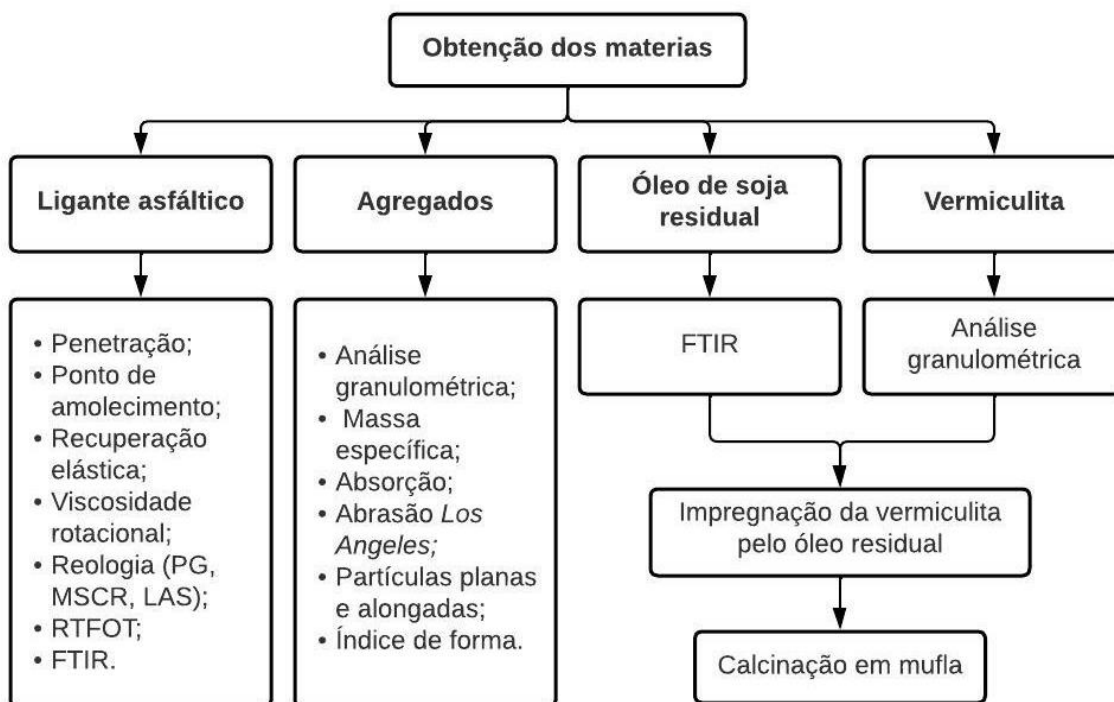
Nesta seção são descritos os materiais utilizados neste estudo bem como, os métodos adotados a fim de atingir os objetivos da pesquisa. Para isso, foi idealizada uma sequência de atividades que foram desenvolvidas de acordo com os órgãos reguladores nacionais e internacionais, como a *American Society for Testing Materials* (ASTM), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). O escopo geral da pesquisa é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Sequência de atividades realizadas em todas as etapas da pesquisa



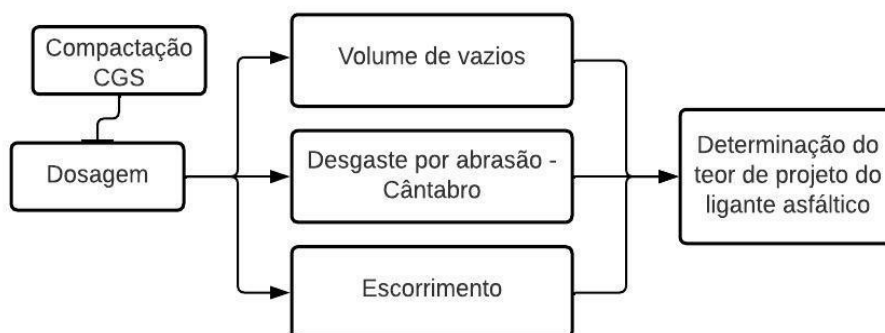
A primeira etapa do trabalho consistiu na caracterização física dos agregados e do ligante, a fim de atestar a viabilidade do uso destes para produção de misturas asfálticas. Além disso, foi realizada caracterização da vermiculita e do óleo residual e, posteriormente, foi feito o processo de saturação, como esquematizado no fluxograma da Figura 17.

Figura 17 – Detalhamento da 1ª etapa da pesquisa



Na segunda fase da pesquisa (Figura 18) foi realizada a dosagem da mistura asfáltica do tipo CPA, com base na especificação americana ASTM D7064/21, que determina o emprego do CGS. No entanto, também foram considerados os parâmetros da norma brasileira DNIT 386/99 a fim de determinar o teor de projeto de ligante.

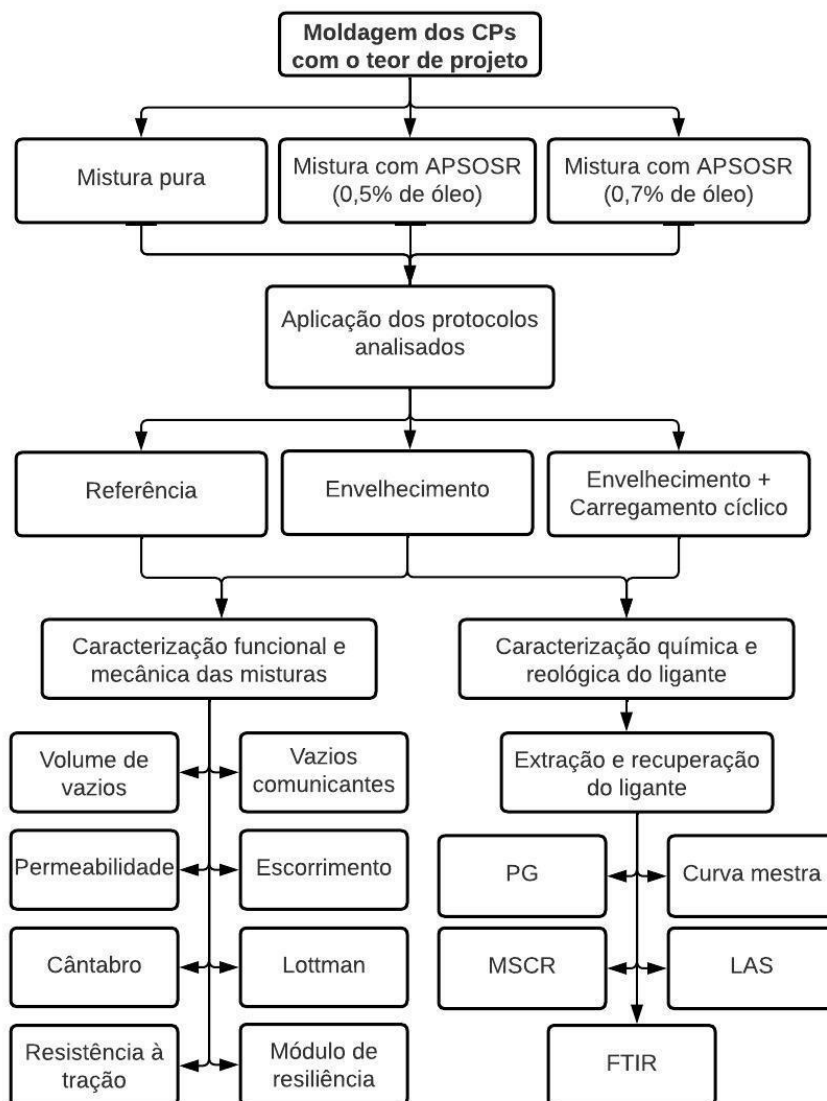
Figura 18 – Sequência de ensaios para determinação do teor de projeto de ligante, da mistura.



Na terceira etapa, delineada na Figura 19, foram moldados corpos de prova provenientes da mistura pura e das misturas modificadas pela adição do APSOSR.

Estes foram utilizados para análise do rejuvenescimento do ligante, bem como para caracterização funcional e mecânica das misturas.

Figura 19 - Etapa de caracterização das misturas



A caracterização funcional e mecânica das misturas asfálticas foi realizada após estas serem trabalhadas em três condições diferentes, sendo estas: mistura de referência, mistura envelhecida e mistura envelhecida com aplicação de um carregamento cíclico. Em paralelo, das misturas submetidas à estas condições, foram extraídos e recuperados os ligantes para análise da capacidade de rejuvenescimento após a incorporação do APSOSR.

3.1 Materiais

3.1.1 Ligante asfáltico

A norma DNIT 386/99 prevê o uso de ligante modificado por polímero, logo, o ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o AMP 55/75, modificado por 3% de polímero *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS) e fornecido pela Installe Engenharia, com sede em Maracanaú, Ceará. O AMP 55/75 foi escolhido, em detrimento aos demais tipos de AMP, por ser o ligante modificado comumente utilizado no nordeste brasileiro.

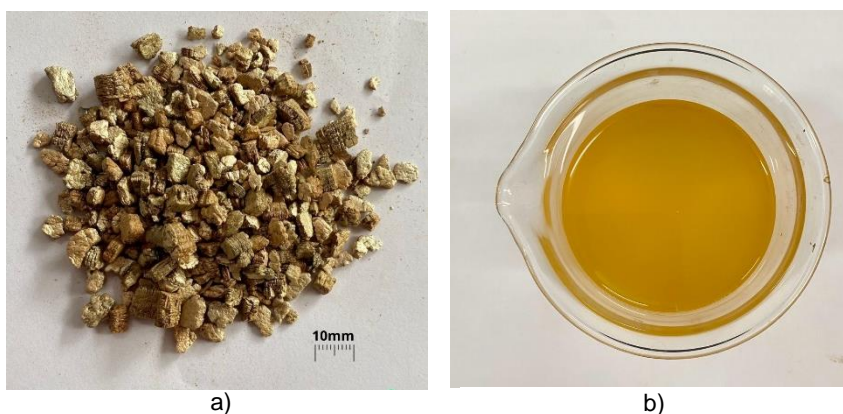
3.1.2 Agregados

Os agregados graníticos utilizados foram: Brita 19 mm, Brita 12,5 mm e Pó de Pedra. Esses foram fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante, oriundos de pedreira própria com sede em Campina Grande – PB. O fíler utilizado nesta pesquisa foi a cal hidratada, proveniente do comércio local.

3.1.3 Agregado poroso saturado em óleo de soja residual (APSOSR)

A vermiculita foi escolhida, como agregado poroso e, para preenchimento dos seus poros, foi selecionado o óleo de soja residual, como agente rejuvenescedor. Estes materiais estão ilustrados na Figura 20.

Figura 20 – Materiais utilizados na produção do APSOR: a) Vermiculita expandida média e, b) Óleo de soja residual.



LI *et al.* (2021) atestaram que a vermiculita possui grande área superficial e boa capacidade de absorção, o que motivou a escolha desta como material carreador do óleo residual. A vermiculita foi adquirida no comércio local, com a classificação comercial de vermiculita expandida média.

A escolha pelo óleo de soja residual foi feita com base em pesquisas anteriores, em que óleos vegetais apresentaram bons resultados na recuperação das propriedades do ligante asfáltico envelhecido, como nos estudos de Rafiq *et al.* (2021), Melo Neto *et al.* (2022) e Torres *et al.* (2024). O óleo residual utilizado foi obtido de frituras domésticas, o qual foi filtrado para remoção de resquícios de resíduos sólidos.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização física e reológica do ligante

Os procedimentos e respectivas normas usadas para avaliar as características físicas e reológicas do ligante asfáltico utilizado são apresentados na Tabela 3. Estes resultados são importantes para verificação da viabilidade do uso do ligante na produção de misturas asfálticas.

Tabela 3 - Características físicas e reológicas do AMP 55/75 utilizado na pesquisa.

Ensaio	Norma	Limite	Resultado	
Ponto de Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	mín. 55	62,0	
Penetração (mm)	ABNT NBR 6576	45-70	60,7	
Recuperação Elástica (%)	ABNT NBR 15086	mín. 75	86,5	
Viscosidade Rotacional				
- Temperatura 135 ° C (cP)	ABNT NBR 15184	máx. 3000	1073,1	
- Temperatura 150 ° C (cP)		máx. 2000	146,4	
- Temperatura 177 ° C (cP)		máx. 1000	177	
RTFOT				
Perda de Massa (%)	ASTM D 2872	máx. 1,0	0,354	
Penetração Retida (%)	ABNT NBR 6576		73,18	
Variação do Ponto de Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	-5 a +7	+3	
Recuperação Elástica Retida (%)	ABNT NBR 15086	mín. 80	80	
PG (°C)	AASHTO M 320	-	76	
MSCR	R _{0,1} (%)	-	61,83	
	R _{3,2} (%)	-	41,26	
	R _{diff} (%)	ASTM	-	33,27
	Jnr _{0,1} (kPa ⁻¹)	D7405:2020	-	0,657
	Jnr _{3,2} (kPa ⁻¹)		-	1,19
	Jnr _{diff} (%)		-	81,60

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

Diante dos resultados observados na Tabela 3, percebe-se que a temperatura de ponto de amolecimento (62 °C) está acima do mínimo exigido (55 °C), indicando uma boa resistência em temperaturas elevadas, o que é positivo para a durabilidade do pavimento. Quanto a variação da temperatura (+3°C) após o envelhecimento, observou-se que está dentro dos limites aceitáveis, entre -5 e +7 °C, logo o ligante apresenta estabilidade térmica, sem grandes mudanças na sua consistência após o envelhecimento.

Em relação ao valor de penetração (60,7mm), este está dentro do intervalo especificado para um AMP 55/75, que é entre 45 e 70 mm, sugerindo uma consistência adequada do ligante para fornecer flexibilidade e resistência ao tráfego. A penetração retida de 73,18% sinaliza que o ligante é capaz de preservar suas propriedades elásticas após o envelhecimento.

A recuperação elástica de 86,5% demonstra que o ligante possui boa capacidade de retornar à sua forma original após deformação, o que é benéfico para evitar rachaduras e deformações permanentes. Essa característica é mantida mesmo após o envelhecimento, com valor de recuperação elástica retida de 80%. Além disso, a baixa perda de massa após o RTFO mostra que o ligante apresenta boa resistência à volatilização dos compostos após o envelhecimento.

A temperatura de PG de 76 °C indica que o ligante pode ser utilizado em regiões com temperaturas até 76°C sem comprometer suas propriedades, o que é apropriado para climas quentes. Já os resultados do MSCR indicam boa resistência a deformações permanentes e boa capacidade de recuperação após aplicação de tensões repetidas.

Por fim, os resultados observados na Tabela 3 mostram que o ligante asfáltico analisado possui boas propriedades reológicas e de resistência ao envelhecimento, bem como adequada elasticidade e estabilidade térmica. Logo, foi possível atestar a viabilidade do uso do ligante asfáltico na produção das misturas asfálticas, já que os limites impostos pelas normativas foram atendidos.

3.2.2 Caracterização dos agregados

Os ensaios realizados para caracterização dos agregados estão listados na Tabela 4, bem como o resultado destes. A caracterização é necessária para verificação da viabilidade do uso destes na produção de misturas asfálticas, além da utilização dos resultados na determinação do teor de projeto de ligante, por meio da dosagem.

Tabela 4 – Ensaio e resultados da caracterização dos agregados

ENSAIOS	NORMA	LIMITES	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm	PÓ DE PEDRA
Massa Específica Real (g/cm ³)	DNIT 195 (1997)	-	2,779	2,771	2,47
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	e	-	2,765	2,740	2,49
Absorção (%)	DNIT 084 (1995)	≤ 2	0,52	0,70	0,70
Equivalente Areia (%)	DNIT 054/97	≥ 55	-	-	56,38
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT 035/98	≤ 55	18,97	22,16	-
Índice de forma	DNIT ME 086/94	≤ 1	1,02	0,65	-
Partículas planas e alongadas	ASTM D 4791/10	-	2,5	1,5	-

As massas específicas foram necessárias para determinação das densidades máximas da mistura. Em relação ao índice de absorção, nota-se que os agregados utilizados são pouco porosos, logo não há nenhuma ressalva ao uso destes. Sabe-se que agregados com alta porosidade, em geral, não devem ser utilizados em misturas asfálticas, pois demandam maior quantidade de ligante e apresentam porosidade variável para diferentes amostras.

Quanto ao desgaste por abrasão *Los Angeles*, os agregados apresentaram valores abaixo de 55%, atendendo ao limite estabelecido por norma. Em relação ao equivalente areia, o pó de pedra apresentou valor superior ao estabelecido por norma, que é de no mínimo 55%. Logo, todos os agregados foram considerados adequados para uso em misturas asfálticas.

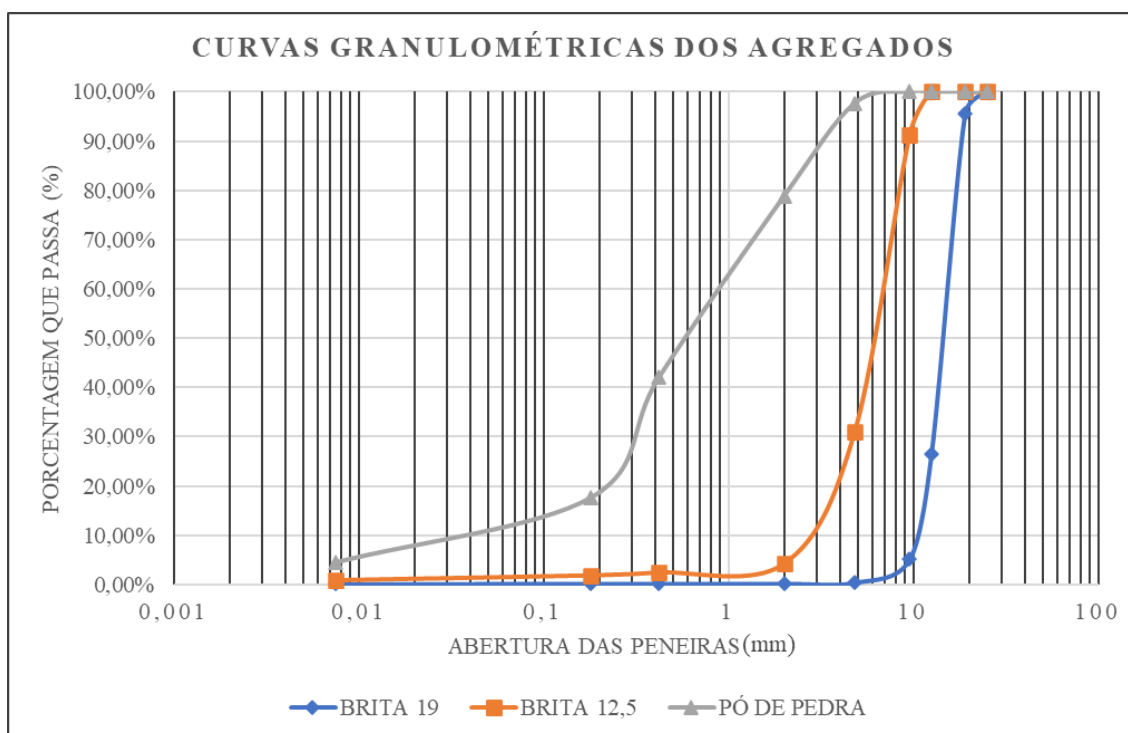
O ensaio de granulometria dos agregados utilizados foi realizado segundo a norma DNIT-ME 083/98, com peneiras de malhas de abertura 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm, 19,1mm e 25,4mm. A Tabela 5 e a

Figura 21 mostram, a quantidade passante e as curvas granulométricas de cada agregado, respectivamente.

Tabela 5 - 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	0,420	0,2	2,5	42,0
Nº 80	0,180	0,2	1,9	17,7
Nº 200	0,074	0,2	0,9	4,5

Figura 21 - Distribuição granulométrica dos agregados



Observa-se que os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa apresentam uma granulometria uniforme, já o pó de pedra apresentou uma granulometria densa. A graduação desses agregados é o que ditará sua presença, em maior ou menor quantidade, na composição da curva granulométrica da mistura, a fim de que esta se encaixe na faixa escolhida para a pesquisa.

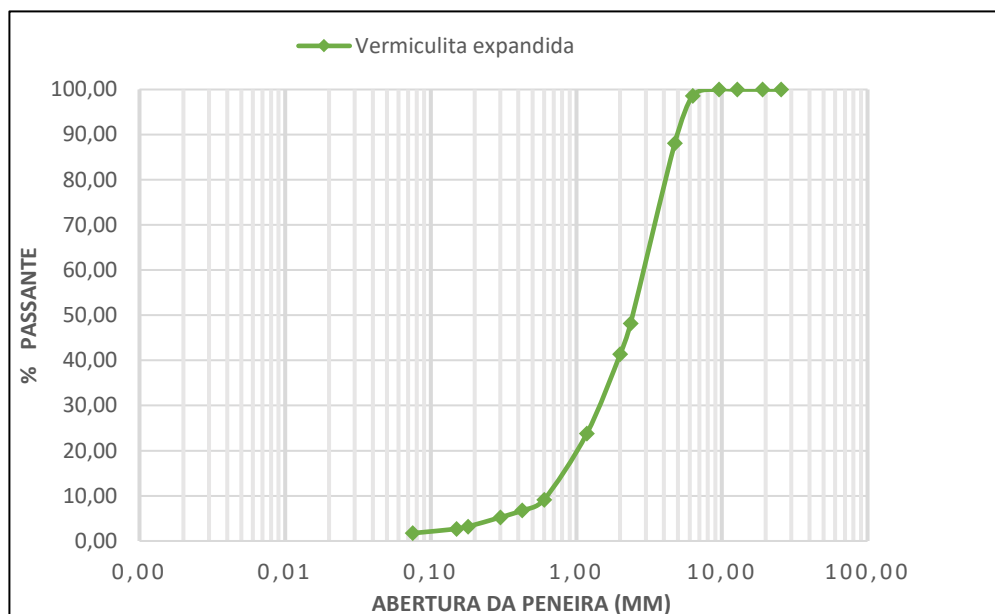
3.2.3 Caracterização da vermiculita

A distribuição granulométrica da vermiculita foi realizada de acordo com a DNIT-ME 083/98, na qual foi calculada a porcentagem que passa em cada peneira. O resultado está apresentado na Tabela 6 e a curva granulométrica pode ser observada na Figura 22.

Tabela 6 – Quantidade passante acumulada da vermiculita

PENEIRA	DIÂMETRO (mm)	% PASSANTE
1"	25,40	100,0
3/4"	19,10	100,0
1/2"	12,70	100,0
3/8"	9,50	100,0
1/4"	6,30	98,60
Nº 4	4,80	88,13
Nº 8	2,36	48,21
Nº 10	2,00	41,35
Nº 16	1,18	23,77
Nº 30	0,60	9,15
Nº 40	0,42	6,77
Nº 50	0,30	5,22
Nº 80	0,18	3,19
Nº 100	0,15	2,67
Nº 200	0,074	1,72

Figura 22 - Distribuição granulométrica da vermiculita



Feita a análise granulométrica da vermiculita expandida, nota-se sua graduação uniforme. Além disso, com base nesta distribuição, algumas análises foram realizadas a fim de definir a melhor granulometria para a produção do APSOSR e, as conclusões estão apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Análise da granulometria para produção do APSOSR

Granulometria analisada	Conclusão
Material <i>in natura</i>	Grande variedade de tamanho das partículas.
Material passante na #10	Quantidade significativa de partículas finas, 41,35% passante na #10
Material retido na #10	Algumas partículas com tamanhos visivelmente maiores que a maioria, em torno de 12% do material fica retido #4.
Material passante na #4 e retido na #8	Maior parcela do material, cerca de 40%, por se tratar de uma vermiculita expandida média.

Com base nas ponderações feitas acerca da granulometria da vermiculita, optou-se por produzir o APSOSR com o material passante na peneira n°4 e retido na n°8. Isto porque, a maior parte do material apresenta essa granulometria, o que torna mais viável o processo de preparação das cápsulas, numa possível situação de produção em larga escala.

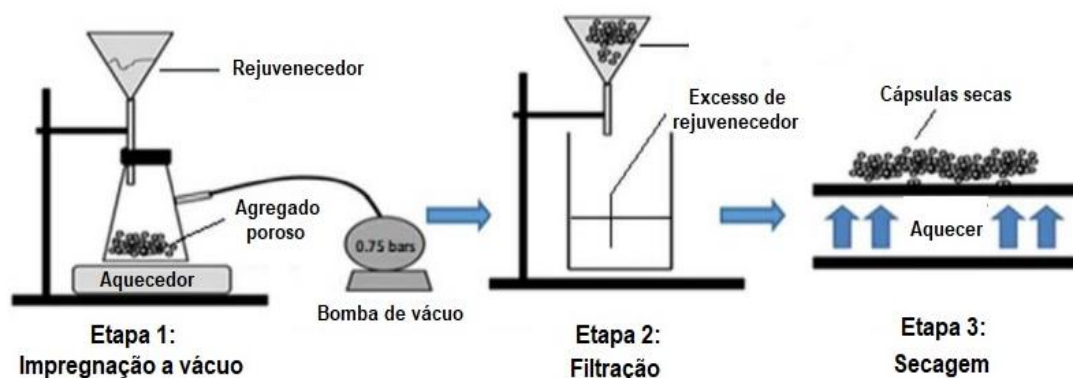
Além disso, restringir a uma pequena faixa granulométrica, permite que se tenha um material de tamanho uniforme. Outro fator observado, é que a CPA apresenta

elevado volume de vazios, logo, acredita-se que partículas com dimensões maiores ou menores possam interferir mais significativamente na volumetria da mistura. As partículas menores poderiam preencher os vazios da mistura, reduzindo sua porosidade, bem como as partículas maiores poderiam elevar esse volume de vazios.

3.2.4 Produção e caracterização do APSOSR

O processo de impregnação da vermiculita foi baseado nos procedimentos descritos por Casado *et al.* (2021) e esquematizado na Figura 23.

Figura 23 – Representação esquemática do método de impregnação.



Fonte: Adaptado de Casado *et al.* (2021).

O agregado poroso foi aquecido a 80°C por 8 h para remover o teor de umidade e o óleo vegetal residual foi aquecido a 100°C por 2 h, tempo suficiente para reduzir sua viscosidade, o que facilita sua penetração nos vazios de ar do agregado. Em seguida, 100 g do agregado poroso foram colocados em um frasco, que foi conectado a uma bomba de vácuo. O rejuvenecedor foi então adicionado até que o agregado poroso estivesse totalmente submerso.

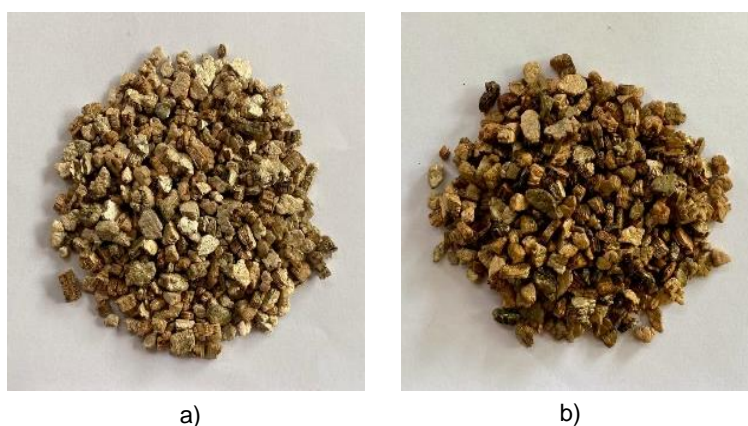
A mistura – rejuvenecedor e agregado – foi mantida aquecida a 100°C durante todo o processo, pois esta temperatura é ideal para a penetração do rejuvenecedor nos vazios do agregado poroso, conforme recomendação de Casado *et al.* (2021). Após a cobertura do agregado poroso com rejuvenecedor, foi aplicado vácuo por aproximadamente 60 minutos à 0,74 atm para retirar o ar. Esta metodologia pode ser observada na Figura 25.

Figura 25 – Processo de saturação da vermiculita expandida



Esse processo continuou enquanto as bolhas de ar continuassem aparecendo sob vácuo. Posteriormente, o vácuo foi liberado e o frasco voltou à pressão ambiente. Qualquer excesso de rejuvenescedor foi recuperado por filtração e o APSOSR foi seco em estufa até peso constante. Na Figura 24 é exposta a vermiculita, antes e após o processo de impregnação.

Figura 24 – Vermiculita expandida: a) antes do processo de impregnação e, b) após o processo de impregnação em óleo.



Após a saturação, o agregado poroso foi armazenado à temperatura ambiente por até dois meses, sem que fossem observadas alterações visuais. É importante destacar que se optou por não realizar uma nova análise granulométrica na vermiculita saturada com o óleo de soja, visto que visualmente não foi constatada variações na granulometria no material.

3.2.4.1 Calcinação em mufla

O método de calcinação em mufla permitiu verificar a eficiência de impregnação da vermiculita. A técnica consistiu em pesar uma pequena amostra e então submetê-la a um aumento progressivo de temperatura, neste caso, 800°C, a uma taxa constante de 10°C/min. Na Figura 26 nota-se a diferença de tonalidade da amostra, antes e após o processo de calcinação em mufla, resultante da degradação do óleo.

Figura 26 – Amostra submetida ao ensaio de calcinação em mufla, a) antes e, b) após.



Dado que o óleo é totalmente degradado termicamente nas condições do ensaio, devido à sua natureza orgânica, o resíduo obtido foi pesado e a diferença do peso inicial indica a quantidade de rejuvenescedor que estava aderida dentro dos poros do agregado. Logo, a eficiência de impregnação aferida foi de 81,3%, ou seja, da massa total de vermiculita saturada em óleo de soja residual, 81,3% correspondem a presença de óleo nos poros do agregado poroso.

Outra conclusão que é possível tirar a partir da calcinação em mufla, com o emprego de temperaturas de até 800°C, é acerca da viabilidade da utilização do APSOSR em elevadas temperaturas, como é o caso das temperaturas empregadas na produção da mistura asfáltica. Ao analisar visualmente a amostra, antes e após o procedimento, é possível assegurar que ao incorporar a vermiculita saturada à mistura asfáltica, em altas temperaturas, não há degradações térmicas, em sua estrutura, capazes de comprometer sua funcionalidade.

3.2.5 Dosagem

Com a finalidade de determinar o teor projeto do ligante para a mistura asfáltica do tipo CPA foi realizada a dosagem seguindo as especificações da norma americana ASTM D7064/21. Ao mesmo tempo, 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 7.

Tabela 7 - Ensaios e normas utilizadas para dosagem da CPA

ENSAIOS	MÉTODOS
Volume de vazios	DNIT- ME 427/2020 e 428/2022
Desgaste por abrasão – Cântabro	DNIT-ME 383/1999
Escorrimento	ASTM D6390/2017

3.2.5.1 Composição granulométrica da mistura

Para composição granulométrica da mistura a ser estudada, analisou-se a distribuição dos grãos dos agregados e o então foi feito o enquadramento na faixa V, do DNIT-ES 386/99. A escolha por esta faixa se deu pois, dentre as faixas granulométricas, esta é a mais comumente utilizada no Brasil. As proporções são apresentadas na Tabela 8, e a partir destas, foi possível compor a curva granulométrica da mistura, a qual é apresentada na

Tabela 9 e na Figura 27, respectivamente. Esta composição foi utilizada tanto para a mistura pura, sem adição da vermiculita saturada com óleo de soja residual, como para as misturas modificadas.

Tabela 8 – Proporção de cada agregado na mistura

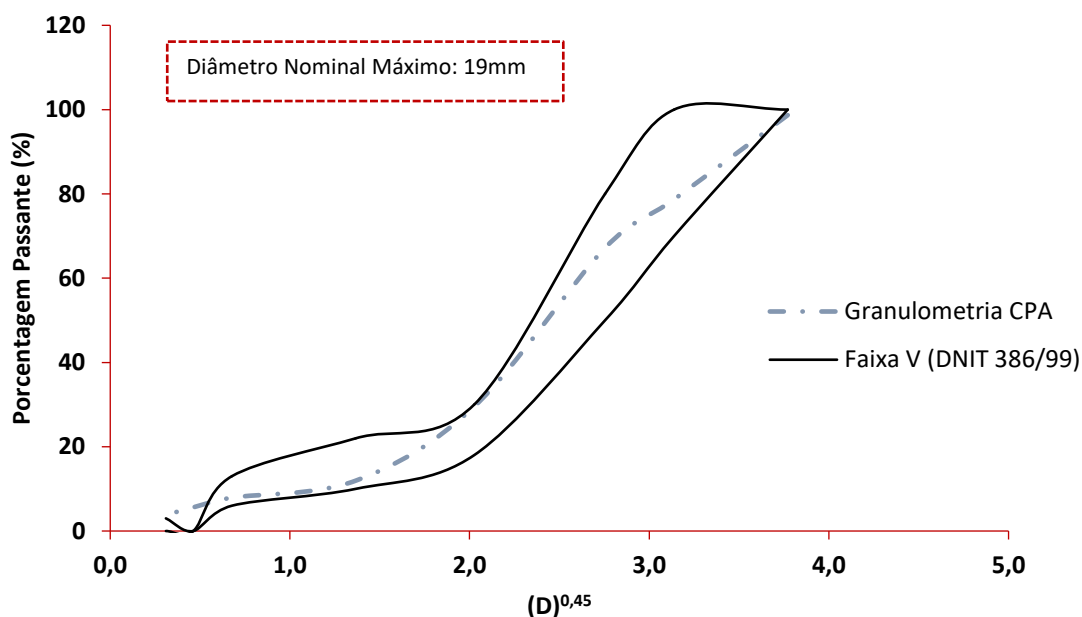
PROPORÇÕES DOS AGREGADOS NA MISTURA CPA	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm	PÓ DE PEDRA	FÍLER
	29%	60%	8%	3%

Tabela 9 – Porcentagem passando da mistura de projeto

PENEIRA	ESPECIFICAÇÃO		% PASSANTE EM PESO
	DNIT – FAIXA V		
	% Mín.	% Máx.	
3/4"	100	100	98,69

1/2"	70	100	78,69
3/8"	50	80	67,18
Nº 4	18	30	29,52
Nº 10	10	22	11,94
Nº 40	6	13	7,92
Nº 80	-	-	5,62
Nº 200	3	6	3,82

Figura 27 - Curva da composição granulométrica da CPA.

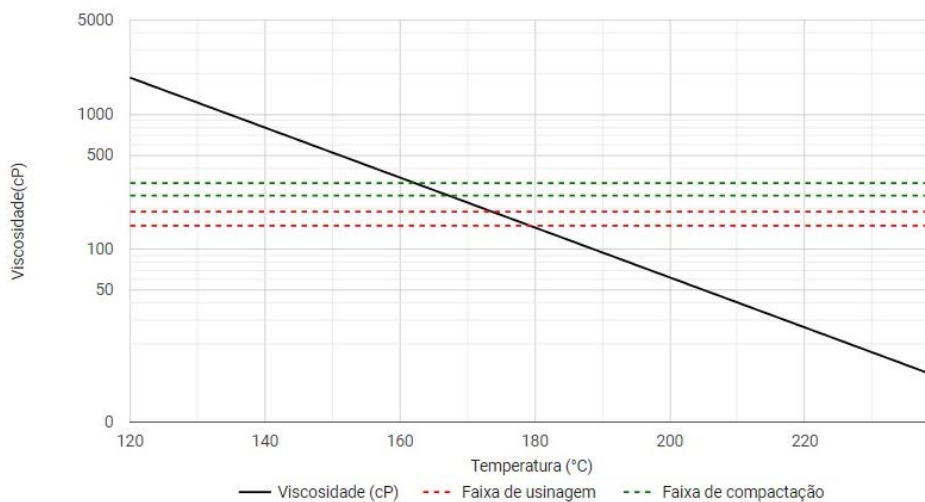


3.2.5.2 Temperaturas de usinagem e compactação

Definir as temperaturas de usinagem e compactação é de extrema importância nas pesquisas sobre misturas asfálticas a fim de evitar a oxidação do ligante por processamento em temperaturas superiores as suportadas. Nesta pesquisa, as temperaturas de mistura e compactação foram definidas por dois métodos distintos, com a finalidade de escolher o que melhor se adequa as misturas do tipo CPA.

A primeira metodologia consiste em determinar graficamente as temperaturas de usinagem e compactação, conforme mostrado na Figura 28. Para a primeira, o ligante deve ter uma viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, já para se definir a segunda, o ligante deve apresentar viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s.

Figura 28 – Curva Temperatura *versus* Viscosidade, para determinação das temperaturas de usinagem e compactação.



Temperatura de compactação máxima (°C): 167,25
 Temperatura de compactação média (°C): 164,73
 Temperatura de compactação mínima (°C): 162,21

Temperatura de usinagem máxima (°C): 179,24
 Temperatura de usinagem média (°C): 176,46
 Temperatura de usinagem mínima (°C): 173,69

Com base na curva de Temperatura *versus* Viscosidade, da Figura 28, a temperatura de usinagem foi de 176°C, e a de compactação 165°C. Esse método é utilizado para ligantes virgens, no entanto, não é a mais adequada para ligantes modificados. Apesar disto, Domingos *et al.* (2012) afirmam que a aplicação das faixas de viscosidade tradicionais é uma simplificação que também tem sido utilizada para determinar a temperatura de usinagem (TU) e temperatura de compactação (TC) de ligantes modificados.

A segunda metodologia aplicada é baseada no teor de polímero presente no ligante asfáltico. A norma DNIT-ME 385/99 indica que a temperatura de usinagem deva ser de 150°C acrescida de 3°C para cada 1% de polímero e a temperatura de compactação sendo de 140°C mais 3°C para cada 1% de polímero. O AMP 55/75 utilizado na pesquisa possui 3% de polímero SBS, logo a temperatura de usinagem é de 159°C e a de compactação 149°C.

Na Tabela 10 estão resumidas as temperaturas utilizadas na pesquisa. A definição do método que melhor se adequa à produção de misturas do tipo CPA e, conseqüentemente, as TU e TC, foram feitos a partir dos resultados dos ensaios de volume de vazios e RT, e que serão descritos no tópico 3.2.5.3, visto que estes permitem caracterizar o comportamento volumétrico e mecânico da mistura.

Tabela 10 – TUs e TCs analisadas

Método	TU (°C)	TC (°C)
Curva Temperatura x Viscosidade	176	165
% de Polímero (DNIT-ME 385/99)	159	149

3.2.5.3 Moldagem CGS

Inicialmente, além dos ensaios citados na Tabela 7, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral é um dos parâmetros utilizados para a definição do teor de projeto do ligante, já que é um dos requisitos impostos pela norma DNIT-ES 386/99. Desta forma, 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 D7064/21, a compactação deve ser realizada no CGS, com 50 giros, pressão aproximada de 600 kPa e ângulo de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$. Os corpos de prova foram moldados e os resultados estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados da primeira rodada de ensaios para dosagem, utilizando o AMP 55/75.

Parâmetro	Limites		Teor de ligante asfáltico			
	ASTM D7064/21	DNIT-ES 386/99	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%
Volume de vazios (%)	Mín. 18	18-25	23,10	22,16	21,60	19,72
Cântabro (%)	Máx. 20	Máx. 25	27,46	12,44	4,81	4,05
RT (MPa)	-	0,55	0,20	0,25	0,20	0,19
Escorrimento (%)	0,3	0,3	0,067	0,013	0,029	0,063
TU/TC (°C)	-	-	176 / 165			
Nº de giros (CGS)	50	-	50			
Ligante asfáltico	-	-	AMP 55/75			
Faixa granulométrica	-	-	DNIT-ES 386/99 – Faixa V			

Pelos resultados encontrados, nenhum dos teores conseguiu atender todos os limites para que pudesse ser definido como teor de projeto. Além disso, o resultado do RT se destacou negativamente, já que nenhum dos teores conseguiu se aproximar do limite estabelecido pela norma DNIT-ES 386/99, que é de 0,55 MPa.

Diante do resultado insatisfatório, analisou-se as possíveis causas para a baixa resistência da mistura e alternativas para sanar o problema. A primeira alternativa considerada foi a inadequação do AMP 55/75 para utilização neste tipo de mistura asfáltica.

A norma DNIT 386/99 especifica apenas o uso de ligante asfáltico modificado por polímero SBS. No entanto, Ceratti *et al.* (2015) destaca que entre os três tipos de AMPs disponíveis no mercado, o 60/85 e o 65/90 são os mais indicados para utilização em misturas do tipo CPA.

A partir disso, um novo ligante foi adquirido, desta vez um AMP 60/85. Então, uma nova rodada de corpos de provas foi moldada com a mesma composição granulométrica, porém com a utilização deste outro ligante. É importante ressaltar que as temperaturas, de usinagem e compactação, utilizadas nesta etapa foram definidas em função do teor de polímero do ligante, que é de 4%. Então, a TU determinada foi de 162°C e a TC de 152°C.

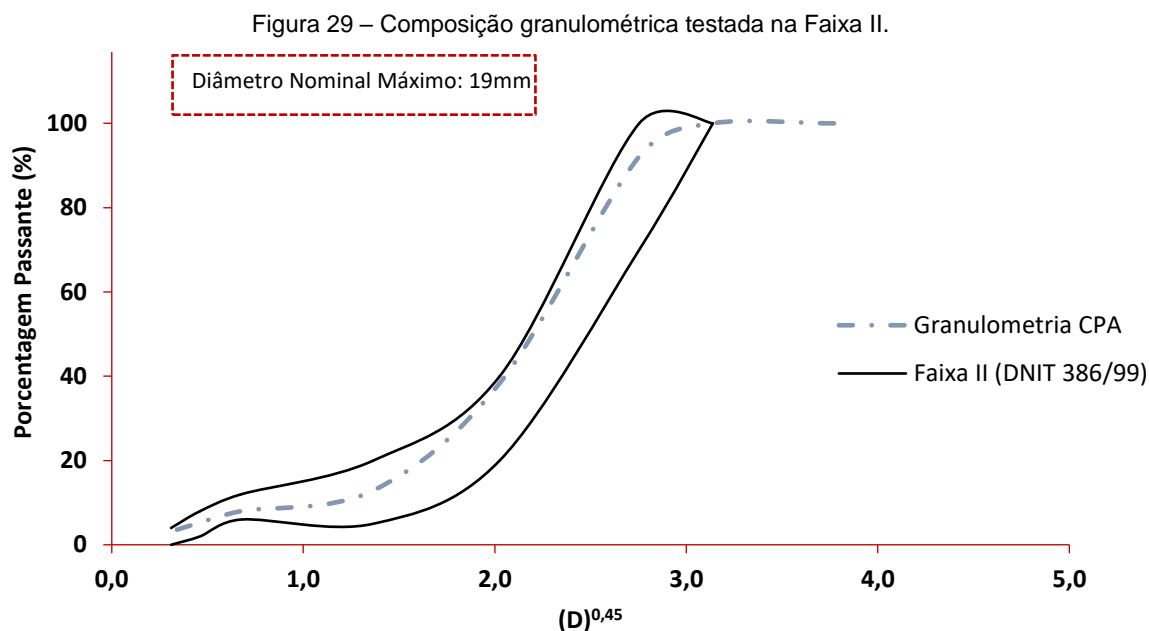
Diante da limitação do material e como se tratava de um teste, o ensaio de cântabro não foi realizado e trabalhou-se somente com dois teores de projeto, a fim de entender o comportamento da mistura com o AMP 60/85. Os resultados encontrados podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados da segunda rodada de ensaios para dosagem, utilizando o AMP 60/85.

Parâmetro	Limites		Teor de ligante asfáltico	
	ASTM D7064/21	DNIT-ES 386/99	4,0%	4,5%
Volume de vazios (%)	Mín. 18	18-25	20,56	20,15
RT (MPa)	-	0,55	0,31	0,30
Escorrimento (%)	0,3	0,3	0,029	0,000
TU/TC (°C)	-	-	162 / 152	
N° de giros (CGS)	50	-	50	
Ligante asfáltico	-	-	AMP 60/85	
Faixa granulométrica	-	-	DNIT-ES 386/99 – Faixa V	

Apesar dos valores de RT serem ligeiramente superiores aos valores encontrados anteriormente, estes continuaram insatisfatórios, distando dos 0,55 MPa definido pela norma do DNIT. Então, a segunda hipótese considerada para explicar

este comportamento, seria o esqueleto pétreo da mistura asfáltica. Com isso, decidiu-se alterar a faixa granulométrica escolhida, que passou da Faixa V para a Faixa II, da norma DNIT-ES 386/99. A composição granulométrica da Faixa II pode ser observada na Figura 29.



Novos corpos de prova foram moldados, somente para o teor de 4,5% de ligante asfáltico, a fim de realizar o ensaio de RT e comparar com o resultado encontrado anteriormente. O resultado e os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados da terceira rodada de ensaios para dosagem, utilizando a Faixa II do DNIT 386/99.

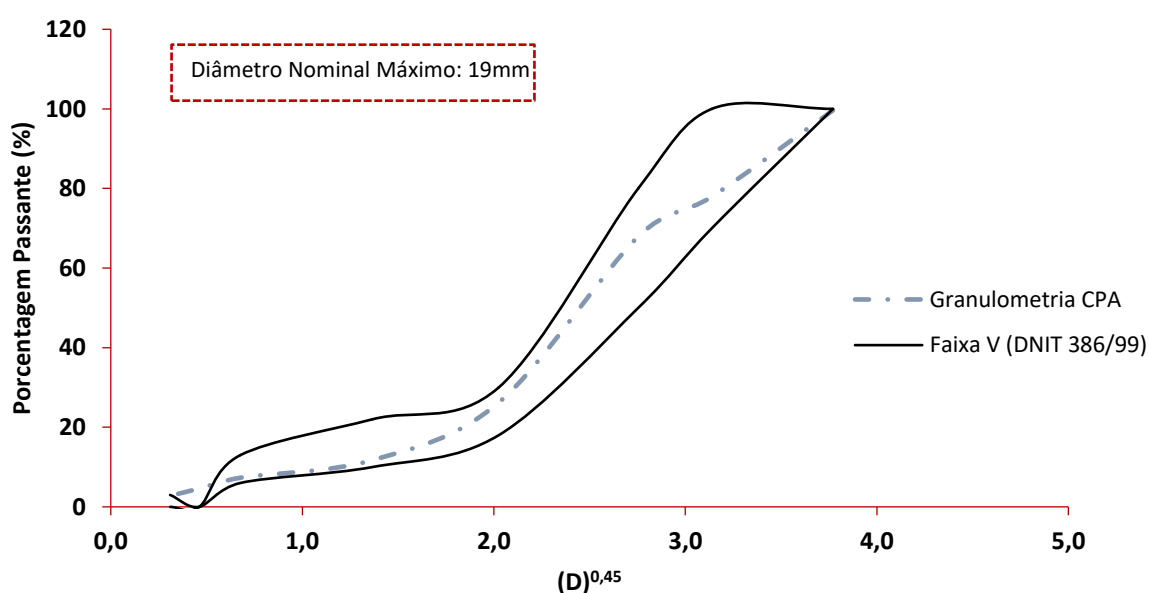
Parâmetro	Limites		Teor de ligante asfáltico
	ASTM D7064/21	DNIT-ES 386/99	4,5%
RT (MPa)	-	0,55	0,37
TU/TC (°C)	-	-	162 / 152
Nº de giros (CGS)	50	-	50
Ligante asfáltico	-	-	AMP 60/85
Faixa granulométrica	-	-	DNIT-ES 386/99 – Faixa II

Mais uma vez, o resultado não foi o esperado e o baixo valor de resistência a tração não foi solucionado com a alteração da faixa granulométrica. Por esse motivo, foi feita análise de alguns trabalhos da literatura sobre misturas abertas realizados em

outros laboratórios de pesquisa, buscando compreender os motivos do não atendimento dos limites dos parâmetros especificados nas normas.

Um dos trabalhos analisados foi o de Motta *et al.* (2010), no qual foram investigadas misturas asfálticas compactadas pelos métodos Marshall e Superpave, com variação do número de giros (50 e 100) e de golpes (50 e 75). Com isso, optou-se por testar a variação no número de giros e, em paralelo, foi composta uma nova curva granulométrica, com a adição de um novo material (brita 9,5mm). Essa nova composição granulométrica pode ser vista na Figura 30.

Figura 30 – Nova composição granulométrica Faixa V, com adição da brita 9,5mm.



Em virtude dos resultados alcançados, optou-se por permanecer com a Faixa V, já que há mais resultados para esta faixa, para se comparar, do que com a Faixa II, que também não apresentou um valor de RT satisfatório. Os resultados obtidos nesta fase estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados da quarta rodada de ensaios para dosagem, para uma nova composição granulométrica.

Parâmetro	Limites		Composição granulométrica		
	ASTM D7064/21	DNIT-ES 386/99	Original	Nova curva (adição de brita 9,5mm)	Nova curva (adição de brita 9,5mm)
Volume de vazios (%)	Mín. 18	18-25	20,42	-	-
RT (MPa)	-	0,55	0,41	0,38	0,35
TU/TC (°C)	-	-	162 / 152		
Nº de giros (CGS)	50	-	100	100	75
Ligante asfáltico	-	-	4,5% - AMP 60/85		
Faixa granulométrica	-	-	DNIT-ES 386/99 – Faixa V		

Ao observar os resultados desta nova tentativa, nota-se a adição da brita 9,5mm não propiciou um aumento de resistência, corroborando com a análise anterior de que o problema não se encontra no esqueleto pétreo na mistura. Em relação ao número de giros, ao se comparar a composição granulométrica original com os dados obtidos para 50 giros, nas mesmas condições, percebe-se um aumento de RT da ordem de 0,11 MPa.

Apesar da especificação ASTM D7064/21 recomendar 50 giros para a compactação de misturas porosas, essa especificação também assegura que a compactação nessas misturas asfálticas pode ser realizada com outras formas de compactação, desde que esta forneça densidade compactada semelhante. Com isto, é importante ressaltar que, com a utilização do AMP 60/85, mesmo dobrando o número de giros, o volume de vazios não sofreu alterações significativas.

Outros trabalhos também tiveram dificuldades de atingir o valor estabelecido por norma para a resistência a tração, como é o caso de Pinheiro (2004), Motta *et al.* (2010), Jaques (2018) e Alecrim (2021). Pinheiro (2004) utilizou asfalto modificado por borracha, e produziu duas misturas com 6,00% de teor de ligante e volume de vazios de 19,5% e 20,8%. Os CPs foram moldados com compactador giratório, empregando 50 giros e os resultados de RT foram 0,45 MPa e 0,42 MPa, respectivamente.

Dentre as misturas produzidas por Motta *et al.* (2010), o valor máximo de RT atingido foi de 0,42 MPa (para o teor de 4,5% de ligante e para a compactação Marshall com 50 golpes). Jaques (2018), ao analisar a viabilidade técnica de se produzirem misturas do tipo CPA a temperaturas intermediárias, realizou o ensaio de

RT e, com a utilização do ligante AMP 60/85 atingiu os valores máximos de 0,44 MPa e 0,39 MPa, para a mistura quente e para a mistura morna, respectivamente.

Alecrim (2021) ao analisar a incorporação de 15% de fresado em revestimentos do tipo CPA, obteve valores de RT da ordem de 0,47 Mpa, tanto para a mistura de referência, como para a mistura modificada pelo RAP. Além disso, pode-se observar resultados superiores, em termos de RT, para as misturas asfálticas oriundas da usinagem e compactadas em laboratório, em relação àquelas misturadas e compactadas em laboratório, o que pode ser um indicativo de que o processo de mistura em usina seja mais eficiente.

Diante dos resultados insatisfatórios utilizando o AMP 60/85 e por dispor de uma quantidade pequena de material, optou-se por seguir utilizando o AMP 55/75. No entanto, ainda buscando minimizar a problemática da baixa resistência da mistura, novos testes foram feitos, desta vez variando as temperaturas de usinagem e compactação e, o método de compactação.

Os dois pares de temperaturas testados foram baseados nos métodos descritos no tópico 3.2.5.2. Em paralelo, ainda com base nos resultados de Motta *et al.* (2010) testou-se a utilização do compactador Marshall em comparação ao CGS. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados da quinta rodada de ensaios para dosagem, variando as TU e TC.

Parâmetro	Limites		TU/TC (°C)		
	ASTM D7064/21	DNIT-ES 386/99	159/149	176/165	
Metodologia de compactação	-	-	CGS	CGS	Marshall
RT (MPa)	-	0,55	0,37	0,41	0,41
Volume de vazios (%)	Mín. 18	18-25	19,2	19,1	18,8
Nº de giros/golpes	50	-	100	100	75
Ligante asfáltico	-	-	4,5% - AMP 55/75		
Faixa granulométrica	-	-	DNIT-ES 386/99 – Faixa V		

Ao se comparar os valores de RT obtidos para os pares de TU e TC, nota-se que para um aumento de 17°C e 16°C nas temperaturas de usinagem e compactação, respectivamente, houve apenas um acréscimo de, aproximadamente, 10% no valor

de RT. Por esse motivo, foi feita a escolha por seguir utilizando as temperaturas de 159°C e 149°C, de usinagem e compactação, respectivamente, já que não se justifica o gasto energético para um incremento de resistência pouco significativo. Além do fato de que, o método para a obtenção das temperaturas de usinagem e compactação em função do teor de polímero é o mais indicado para utilização em ligantes modificados.

Outra conclusão explanada por Motta *et al.* (2010) foi que, no caso de misturas abertas, o número de giros utilizado no CGS não corresponde ao mesmo número de golpes da compactação Marshall, como ocorre nas misturas densas. Este fato pode ser observado também nesta pesquisa, já que a mistura compactada com 100 giros no CGS apresentou o mesmo valor de RT, de 041 Mpa, da mistura compactada com 75 golpes no compactador Marshall.

O insucesso desta pesquisa em atender ao limite mínimo de 0,55 MPa, imposto pela DNIT-ES 386/99 e os demais trabalhos que tiveram a mesma dificuldade, dá indicativos da necessidade de revisão da norma, já que esta não sofre alterações há 24 anos. Vale salientar que o valor de 0,55 MPa é muito otimista para uma mistura asfáltica que apresenta volume de vazios entre 18% e 25%, já que para uma mistura densa, de 4% de vazios, esse limite mínimo é de apenas 0,65 MPa.

Ressalta-se que a metodologia de dosagem da ASTM D7064/21, não estabelece um valor mínimo de resistência à tração para as misturas já que esse parâmetro não é levado em consideração no método de dosagem. Ante ao exposto, decidiu-se seguir a pesquisa, porém, sem considerar o ensaio de RT na dosagem. Este foi considerado apenas na caracterização mecânica das misturas analisadas.

Além disso, com o intuito de minimizar ao máximo a baixa resistência, toda a dosagem foi realizada com 50 e 100 giros, para que ao final fosse escolhida a melhor metodologia a ser seguida. Justifica-se a análise dos 100 giros em decorrência da possibilidade de uma maior densificação da mistura e, conseqüentemente, um aumento da resistência. Já os 50 giros foram analisados por ser a recomendação da norma ASTM D7064/21.

3.2.5.4 Volume de Vazios

De acordo com a DNIT-ES 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 e em pesa-submerso em água, à 25°C, e obtém-se o peso submerso. De posse desses dados, foi possível calcular a densidade aparente das misturas com volume de vazios superiores à 10%.

Para determinar a densidade máxima das misturas foram realizados os *Rices Tests* 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 foram levadas ao agitador mecânico para retirada do ar contido e então, pesadas submersas. Estes pesos permitiram o cálculo da densidade máxima da mistura.

De posse dos resultados de cada ensaio foi possível determinar o volume de vazios da mistura, por meio da Equação 3. A partir disto foi traçado o gráfico de volume de vazios *versus* teor de ligante apresentado na Figura 31, para os corpos de prova moldados com 50 e 100 giros.

$$V_v(\%) = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad (3)$$

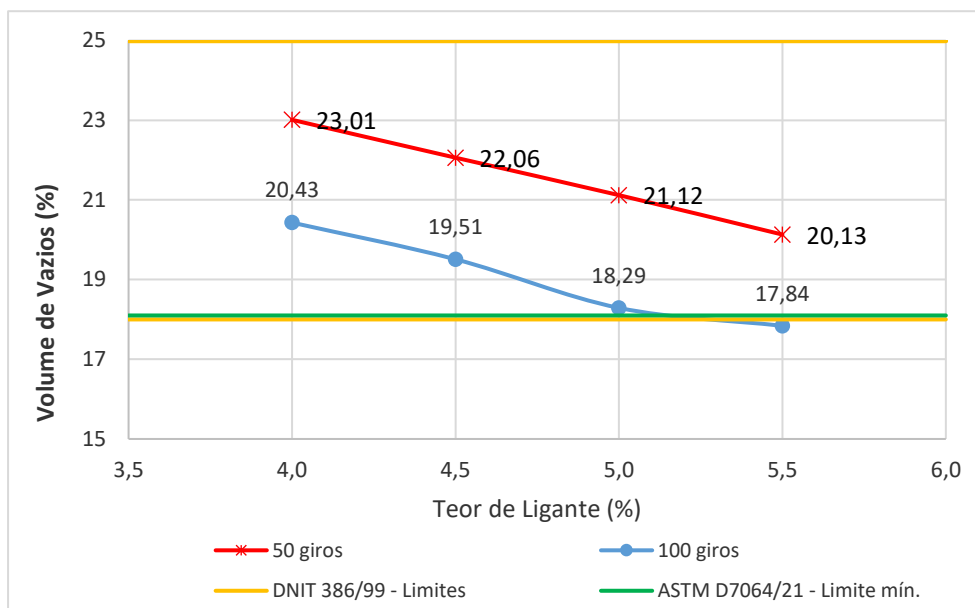
Onde:

Vv: índice de vazios (%);

Gmb: densidade aparente da mistura compactada;

Gmm: densidade máxima medida da mistura.

Figura 31 – Curva volume de vazios versus teor de ligante.



Ao analisar a Figura 31, nota-se que todas as misturas apresentaram volumes de vazios dentro dos limites estabelecidos pelas normas DNIT-ES 386/99 e ASTM D7064/21, com exceção do teor de 5,5% da mistura compactada com 100 giros, porém, ainda assim, o valor encontrado foi próximo do limite mínimo. Para as duas energias de compactação, 50 giros e 100 giros, a CPA apresentou a mesma tendência de redução de vazios, com a diminuição de, aproximadamente, 1% de volume de vazios com o aumento de 0,5% no teor de ligante da mistura.

3.2.5.5 Desgaste por abrasão – Cântabro

Segundo a especificação 386/99 do DNIT, o ensaio de Cântabro é um dos parâmetros importantes analisados para as misturas asfálticas do tipo CPA. 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 à 30 r.p.m e, temperatura de 25°C. Após este processo, o corpo de prova foi retirado e pesado novamente.

A porcentagem de desgaste foi calculada por meio da Equação 4 e os resultados foram utilizados para traçar o gráfico apresentado na Figura 32, juntamente com os teores de projeto.

$$A = \left(\frac{P - P'}{P} \right) \times 100 \quad (4)$$

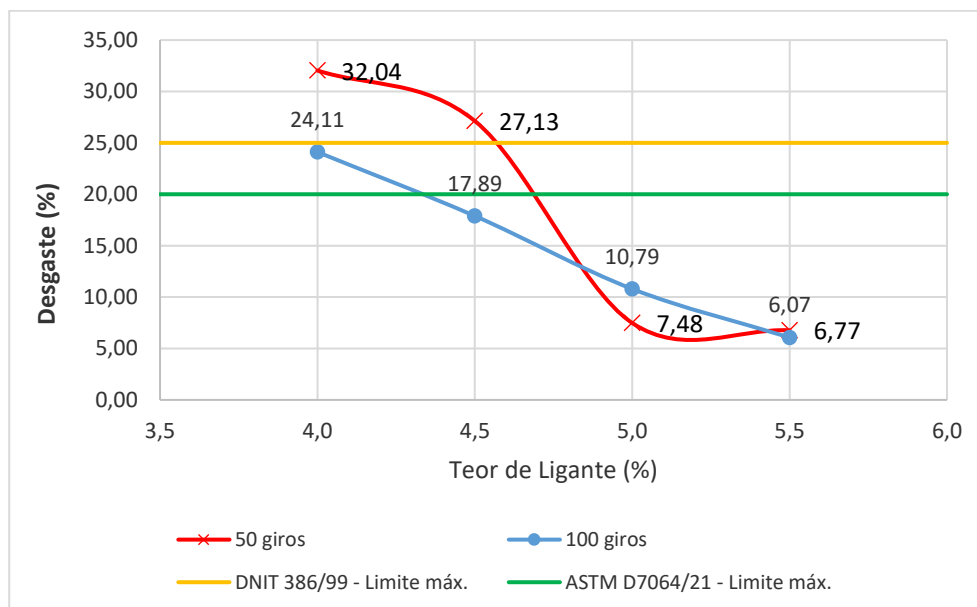
Onde:

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.

Figura 32 – Curva da % de desgaste versus teor de ligante.



Segundo a especificação 386 do DNIT, o limite máximo de desgaste pelo ensaio de cântabro para uma mistura CPA é de 25%, enquanto para a norma americana D7064 o limite aceitável é de 20%. Ao analisar a mistura compactada com 100 giros, nota-se que todos os teores apresentaram valores inferiores ao estabelecido como máximo para a norma brasileira, no entanto, o teor de 4,0% apresentou valor próximo ao limite. Quanto ao limite da norma americana, o teor de 4,0% apresentou um desgaste superior ao permitido e para o teor de 4,5% de ligante, o desgaste se aproximou deste mesmo limite.

Os resultados obtidos apresentam tendência à linearidade, ou seja, quanto maior o teor de ligante, menor tende a ser o desgaste da mistura. Como o ligante asfáltico é um material adesivo termoviscoplastico, já era esperado que um maior teor de ligante resultasse em maior adesão na mistura e maior resistência ao desgaste.

3.2.5.6 Escorrimento

Para realização do ensaio de escorrimento do ligante foram seguidas as recomendações da ASTM D6390/2017. Esta especifica que o ensaio deve ser realizado com no mínimo duas amostras de $1200 \pm 200\text{g}$, não compactadas, que devem ser acomodadas sem perturbação em um cesto com dimensões padronizadas e levadas à estufa durante o período de $1\text{h} \pm 5\text{ min}$, 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 5, e não deve ser superior a 0,3% para misturas asfálticas porosas do tipo CPA. Na Figura 33 foi traçada a curva de escorrimento com a variação do teor de ligante.

$$\text{Escorrimento (\%)} = \frac{(D-C)}{(B-A)} * 100 \quad (5)$$

Onde:

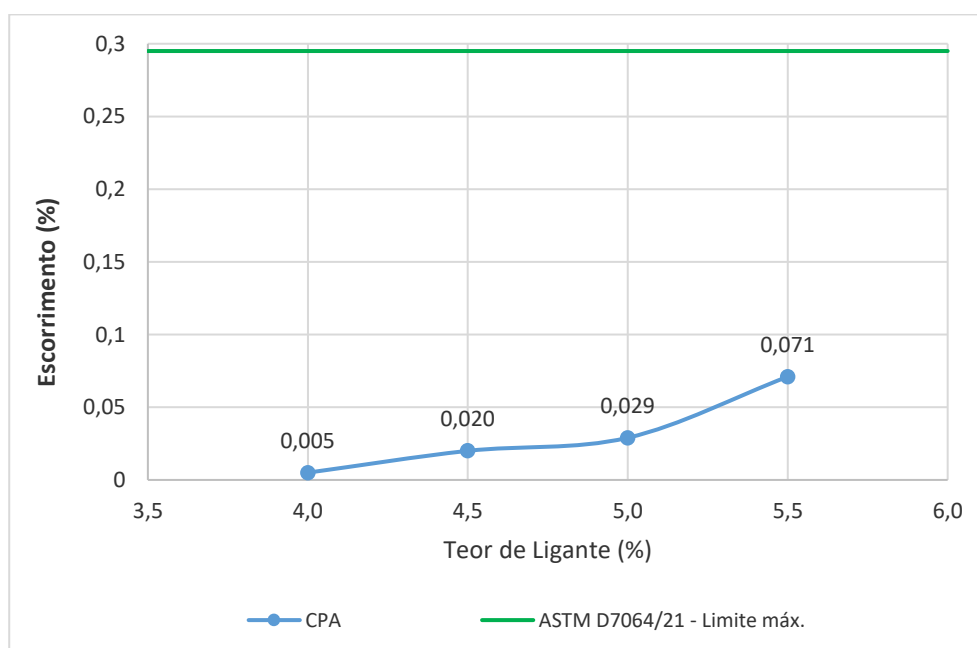
A: Peso do cesto vazio;

B: Peso do cesto contendo a amostra;

C: Massa do prato;

D: Massa do prato contendo o material resultante do escorrimento.

Figura 33 - Curva do escorrimento *versus* teor de ligante.



Como para este ensaio não há a compactação da amostra, ele foi realizado somente uma vez, para cada teor de ligante. Todos os teores apresentaram valores de escorrimento inferiores ao limite máximo, que é de 0,3%, estabelecido nas normas, brasileira e americana.

3.2.5.7 Determinação do teor de projeto de ligante e número de giros

O teor de projeto de ligante asfáltico foi determinado com base nas curvas de volume de vazios, porcentagem de desgaste e escorrimento. Além disso, a comparação entre os resultados para 50 e 100 giros, permitiu que se determinasse também a energia de compactação que foi empregada na compactação dos corpos de prova, no decorrer da pesquisa. Logo, optou-se pela utilização de 100 giros na compactação dos corpos de prova para caracterização mecânica da mistura. Esta decisão foi tomada, também, com base nos testes realizados anteriormente à dosagem definitiva, nos quais a alteração do número de giros de 50 para 100, conseguiu promover, ainda que não o suficiente, um aumento na resistência da mistura.

Desta forma, ao analisar os resultados da mistura compactada com 100 giros, nota-se que para todos os ensaios, o teor de 4,5% foi o que apresentou os valores que melhor satisfazem os limites estabelecidos pelas normas, brasileira e americana. Vale lembrar que o intuito da dosagem é encontrar o menor teor de ligante, que satisfaça os requisitos de qualidade da mistura asfáltica, tornando a mistura menos onerosa.

Na Tabela 16 foram reunidas todas as definições feitas a partir dos testes realizados e da dosagem. Estes parâmetros serão utilizados na produção dos corpos de prova para caracterização das misturas, tanto pura, como daquelas acrescidas da vermiculita saturada em óleo de soja residual.

Tabela 16 – Parâmetros definidos para caracterização das CPAs

Parâmetros	Definições
Faixa granulométrica	DNIT-ES 386/99 – Faixa V
Composição granulométrica	Brita 19mm – 29% Brita 12,5mm – 60% Pó de pedra – 8% Fíler (cal) – 3%
Ligante asfáltico	4,5% – AMP 55/75
Metodologia de compactação	CGS – 100 giros
TU e TC	159°C e 149°C

3.2.6 Incorporação do APSOSR na mistura asfáltica

A vermiculita saturada foi adicionada à massa asfáltica como aditivo, o que significa que não foi considerada na massa total da mistura asfáltica. A quantidade de APSOSR incorporadas à mistura foi definida com base na eficiência de impregnação alcançada no processo de saturação e quantificada pelo ensaio de calcinação em mufla, que foi de 81,3%.

O objetivo era que a mistura analisada apresentasse um teor final de 0,7% de óleo, em relação ao peso da massa asfáltica total. Essa porcentagem apresentou bons resultados ao ser trabalhada por Casado *et al.* (2021) no estudo do potencial do uso de agregados porosos como veículo para rejuvenescedores comerciais de ligantes asfálticos. O teor de 0,7% de óleo, em relação ao peso da massa asfáltica, corresponde à 8,8g de vermiculita saturada em óleo, para um corpo de prova de 1020g, que foi a massa definida para que os corpos de prova apresentassem dimensões aproximadas de 100 x 63,5mm.

Todavia, com o intuito de entender melhor o comportamento do APSOSR na mistura asfáltica, definiu-se mais um teor de adição de óleo para ser analisado. Desta vez, o objetivo foi que mistura apresentasse um teor final de 0,5% de óleo, em peso da massa asfáltica total, correspondente à 6,3g de vermiculita saturada em óleo, para um corpo de prova de 1020g.

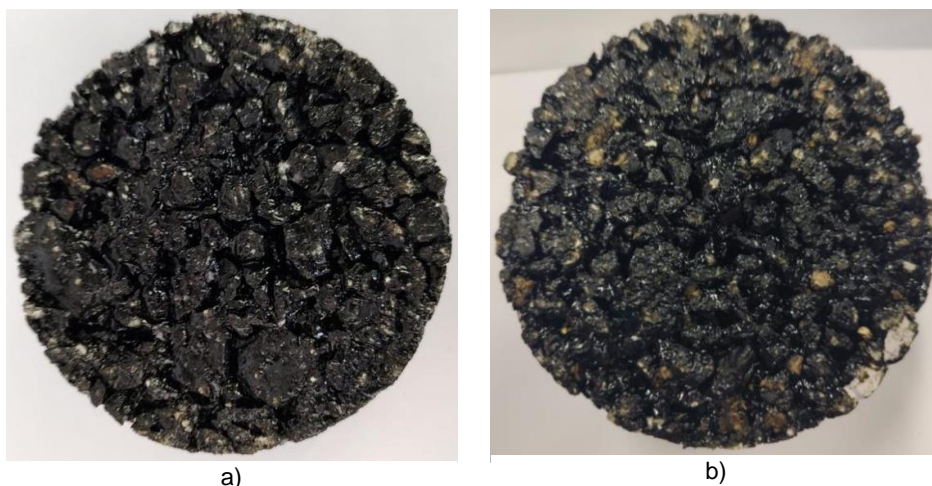
A adição do APSOSR à mistura asfáltica ocorreu durante a usinagem, após a mistura dos agregados e do ligante asfáltico, como pode ser observado na Figura 34. Em seguida, a mistura foi novamente revolvida, a fim de distribuir a vermiculita saturada por toda a massa asfáltica.

Figura 34 – Adição da vermiculita saturada à mistura asfáltica



Com a finalidade de simular o envelhecimento de curto prazo, o material permaneceu em estufa por 4 horas. Então, as misturas foram compactadas no CGS, não diferindo do processo utilizado para compactar as misturas asfálticas puras. Na Figura 35 pode-se observar a aparência dos corpos-de-prova, com e sem APSOSR.

Figura 35 – Comparação entre as misturas asfálticas: a) Com APSOR e, b) Sem APSOR.



3.2.7 Protocolo de Envelhecimento

O protocolo padrão AASHTO R-30 desenvolvido dentro do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) consiste na aplicação de um envelhecimento de curto

prazo, seguido de um envelhecimento prolongado. O primeiro é aplicado na mistura solta por 4 horas, à 135°C. Em seguida, esta mistura é compactada e mantida em estufa, por 5 dias, à 85°C.

Em busca de um protocolo que melhor representasse o envelhecimento que ocorre nas misturas porosas, nesta pesquisa, as recomendações da R30 sofreram algumas modificações. As misturas soltas foram mantidas por 3 horas, à 135°C, e posteriormente, foram mantidas por mais uma hora na temperatura de compactação, que era de 149°C, totalizando as 4 horas. Essa variação foi realizada com a finalidade de atender também a metodologia Superpave, normatizada pela AASHTO D6925 (2015), que prevê que a mistura seja mantida por 2 horas na temperatura de compactação, a fim de simular o envelhecimento de curto prazo.

Quanto ao envelhecimento de longo prazo, optou-se pela combinação dos parâmetros que possivelmente mais interferem no envelhecimento de uma CPA, que são a temperatura e a umidade. Para isso, os corpos de prova compactados foram mantidos em estufa convencional e, em seguida, submetidos à simulação de chuva.

Em relação à temperatura e ao tempo de exposição em estufa, a metodologia seguida foi a recomendada pela norma ASTM D7064/2021, para análise do efeito do envelhecimento acelerado, em laboratório, na resistência à abrasão das misturas porosas. Apesar do procedimento ser descrito especificamente para verificação do desgaste por abrasão, estendeu-se o método para as demais análises realizadas nesta pesquisa. O processo consistiu em manter os corpos de prova em estufa, por sete dias, à 60°C, como pode ser visto na Figura 36(a).

A segunda etapa do envelhecimento de longo prazo foi a exposição dos corpos de prova à pluviosidade, como pode ser observado na Figura 36(b). Para isto, utilizou-se o simulador de chuva do Laboratório de Hidráulica, da UFCG.

Figura 36 – Protocolo de envelhecimento combinado entre a) estufa convencional e, b) simulador de chuva



Os parâmetros seguidos foram os descritos por Silva Lopes *et al.* (2023), em que se analisou diferentes protocolos de envelhecimento para ligantes e misturas asfálticas densas. Para isto, o simulador foi calibrado com uma vazão de 8 l/min, considerando a média de chuva dos últimos oito anos, na cidade de Campina Grande, que foi de 500 mm/ano e, para um tempo de retorno de 12 meses. As amostras foram submetidas a pluviosidade durante cinco horas. Este tempo é correspondente a intensidade de chuva (mm/h) detectada no simulador em função da vazão e do tempo retorno adotados.

Após decorridas as cinco horas, os corpos de prova foram retirados e imediatamente pesados, a fim de verificar a água armazenada nos vazios, já que estes também foram pesados antes processo de simulação de chuva. As pesagens seguiram durante tempos pré-estabelecidos, até sete dias, com o intuito de verificar o comportamento drenante da mistura.

É importante frisar que após a aplicação completa do protocolo de envelhecimento, os corpos de prova só foram submetidos aos ensaios de caracterização, mecânica e funcional, entre sete e dez dias depois. Este período foi adotado para que houvesse tempo para que o APSOSR agisse sobre as propriedades do ligante envelhecido, bem como para que a água absorvida fosse drenada, evitando interferências nos resultados dos ensaios.

3.2.8 Protocolo de Envelhecimento e Carregamento Cíclico

Para esta etapa da pesquisa, todo o protocolo de envelhecimento descrito no tópico 3.2.7 foi repetido. No entanto, adicionalmente, após os corpos de prova serem submetidos à chuva simulada e, decorrido o período definido para que a água absorvida fosse drenada, estes receberam a ação de um carregamento cíclico. O intuito deste passo adicional foi analisar as possíveis variações da difusão do óleo na mistura, quando submetida ao tráfego.

A trinca por fadiga é um dos principais padrões de desgaste do pavimento asfáltico. A falha por fadiga pode ser causada por muitos fatores, como má qualidade de construção, projeto estrutural inadequado, carga de tráfego, temperatura, etc., ou o efeito combinado desses fatores (Zhang *et al.*, 2021; Shi *et al.*, 2021). Logo, com o objetivo de simular o efeito do tráfego sobre o pavimento e a sua contribuição para liberação do óleo das cápsulas, foi aplicado um carregamento cíclico nos corpos de prova, com base no procedimento de vida de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, regido pela norma DNIT - ME 183/2018.

A metodologia adotada foi adaptada do procedimento descrito por Arruda (2021), que avaliou a autorregeneração de misturas asfálticas verificando a diferença na vida de fadiga antes e após um período de repouso prolongado. Para induzir o surgimento de microtrincas no revestimento, naquele estudo foi determinado o número de ciclos correspondentes à ruptura dos corpos de prova no ensaio de fadiga. Este valor foi então utilizado para calcular os números de ciclos correspondentes a 25%, 50% e 75% dessa vida de fadiga.

A norma DNIT - ME 183/2018 prevê a obtenção da vida de fadiga pela aplicação de quatro níveis de tensões, variando de 5% a 40% da resistência a tração. No entanto, com a finalidade de obter a situação mais desfavorável, o ensaio foi realizado somente para o nível de tensão de 40% da RT, da mesma forma que Mullapudi *et al.* (2020). O número de ciclos foi determinado para as misturas de referência.

A CPA não tem função estrutural, logo, é um revestimento que não tende a fadigar. Assim, na aplicação do carregamento, optou-se por utilizar o menor número de ciclos proposto por Arruda (2021), que corresponde à 25% da vida de fadiga da mistura. Os parâmetros utilizados para aplicação do carregamento nos corpos de prova, estão descritos na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros de entrada do carregamento cíclico

Mistura	Carga (N)	Nº de ciclos	25% do Nº de ciclos
Pura	1418	39111	9778
0,5% de óleo	1912	4611	1153
0,7% de óleo	1682	2998	750

A aplicação da tensão foi feita utilizando a prensa UTM-25 da IPC Global®, em pulsos haversine de 1Hz e o ensaio foi conduzido com parada programada ao atingir 25% do número de ciclos relativo à vida de fadiga determinada para aquele tipo de mistura. Após a aplicação do carregamento, os corpos de prova passaram por um período de descanso para que o óleo contido nos poros da vermiculita pudesse se difundir na mistura asfáltica. Este período foi o mesmo tempo adotado no protocolo de envelhecimento, entre sete e dez dias.

3.2.9 Análise do envelhecimento dos ligantes recuperados

O envelhecimento dos ligantes asfálticos manifesta-se pela alteração das suas propriedades reológicas. Logo, para quantificar o possível efeito do rejuvenescedor sobre a oxidação do ligante, as misturas asfálticas foram submetidas aos protocolos de envelhecimento ou combinação de envelhecimento e carregamento e, posteriormente, o ligante foi extraído e recuperado para que a análise fosse feita. Os ensaios que serviram como base para quantificar o potencial da vermiculita saturada no rejuvenescimento do ligante estão descritos na Tabela 18.

Tabela 18 – Ensaio base para análise do rejuvenescimento do ligante

Ensaio	Norma
Grau de desempenho – PG	ASTM D 6373/16
Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR	ASTM D 7405/15
Varredura de amplitude linear - LAS	AASHTO TP 101/14
Curva mestra	-
FTIR	-

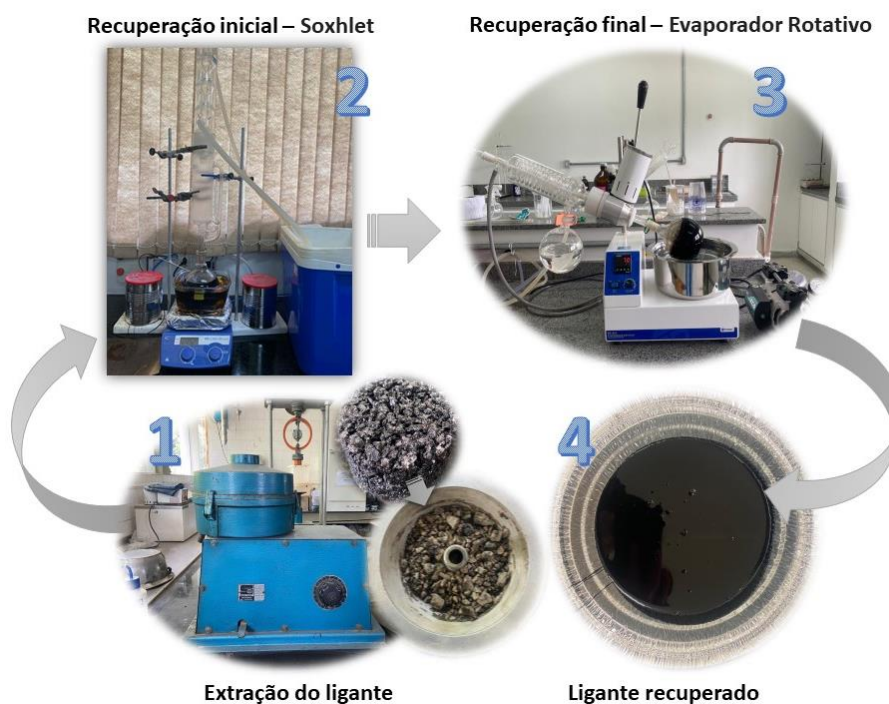
Embora o processo de extração com solvente possa afetar ligeiramente os resultados, há uma tendência consistente ao se comparar os resultados, já que todas as amostras, com e sem o APSOSR, foram submetidas ao mesmo procedimento.

3.2.9.1 Extração e recuperação do ligante

A extração do ligante dos corpos de prova seguiu o procedimento descrito pela norma DNIT-ME 053/94, que se baseia na centrifugação com uso do Rotarex. Para cada mistura, foram utilizados três corpos de prova, resultando em, aproximadamente, 1500ml de solução de ligante dissolvido em percloroetileno.

Para que o processo de recuperação fosse mais ágil, este foi dividido em duas etapas. Inicialmente, para que houvesse uma redução mais rápida do volume da solução, parte do solvente foi retirada com a utilização de um Soxhlet. Posteriormente, o volume restante da solução foi transferido para o evaporador rotativo, na tentativa de retirar completamente o solvente do ligante asfáltico. A Figura 37 ilustra a metodologia, de extração e recuperação do ligante, utilizada nesta pesquisa.

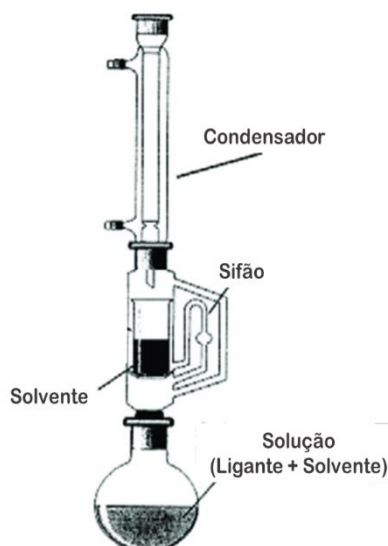
Figura 37 – Processo de extração e recuperação do ligante



Devido a capacidade do balão utilizado no evaporador rotativo, optou-se por fazer uma recuperação prévia do solvente com a utilização de um Soxhlet, ilustrado na Figura 38. A metodologia consistiu na imersão parcial de um balão volumétrico, contendo a solução que será recuperada, em um banho de óleo vegetal aquecido. Com esta etapa inicial, foi possível reduzir o volume da solução de 1500ml para 300ml,

aproximadamente, o que permitiu que o procedimento no evaporador rotativo fosse realizado de uma única vez.

Figura 38 – Configuração do aparelho de extração Soxhlet



Fonte: Adaptado de Bhargav *et al.* (2018).

A temperatura do banho foi determinada com base na temperatura de ebulição do percloroetileno, que é de 121,1 °C, logo, a temperatura utilizada foi de 130 °C, o que possibilitou que a solução entrasse em ebulição e o solvente fosse evaporado. Além disso, observou-se ainda que esta temperatura está abaixo da faixa de trabalho dos ligantes, reduzindo os riscos de envelhecimento por oxidação e, da temperatura de ebulição do óleo de soja, que é de 226 °C.

A segunda etapa de recuperação do ligante foi realizada em um Evaporador Rotativo Tecnal TE-211, com bomba de vácuo, no Laboratório de Fitoquímica, do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde (CCBS), da UEPB. A solução resultante do procedimento com o Soxhlet foi transferida para um balão rotativo que foi parcialmente imerso em um banho aquecido com a aplicação de um vácuo de 760 mmHg. A temperatura inicial do banho foi de 50 °C, com aumento gradativo até atingir 70 °C. Após um período de 2 horas, observou-se que não havia mais condensação de solvente no balão volumétrico e o procedimento foi encerrado.

3.2.9.2 Análise química

A análise química dos ligantes, virgem e recuperados, foram realizadas por meio da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, do inglês *Fourier*

Transformed Infra Red (FTIR). Esta é uma técnica analítica que se baseia na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}) e permite analisar os diferentes tipos de ligações e funções químicas nas moléculas contidas nas amostras, em especial moléculas orgânicas, apresentando picos relacionados a vibrações (estiramentos e deformações).

Além disso, o FTIR por refletância total atenuada (FTIR ATR) foi aplicado para analisar o óleo residual e o solvente utilizado. O processo de impregnação do óleo residual requer condições de temperatura adequadas para que a impregnação ocorra com a máxima eficiência. Assim, foi importante avaliar a influência da temperatura nas propriedades do agente rejuvenescedor, para que não perca suas propriedades por envelhecimento inadequado.

Para identificar a extensão do envelhecimento oxidativo associado aos grupos funcionais de carbonila (C=O) e sulfóxido (S=O), foi feita a integração da área dos espectros, em torno dos picos representativos destes componentes, com o auxílio do *software* OriginPro 2024b. Com as áreas calculadas, aplicou-se as Equações 1 e 2, indicadas por Mouillet (2010), conforme método MLPC N°69.

As mudanças dos dois principais produtos do envelhecimento do ligante – correspondentes às ligações carbonila (C=O) e sulfóxido (S=O) – foram verificadas antes e depois dos processos de envelhecimento/rejuvenescimento do ligante asfáltico. As atribuições dos principais grupos funcionais dentro dos ligantes asfálticos nos espectros de FTIR estão mostradas na Tabela 19, incluindo os intervalos de número de onda de integração para cada grupo funcional utilizado para calcular os índices de envelhecimento.

Tabela 19 – Principais grupos funcionais do ligante asfáltico nos espectros de FTIR

Grupo funcional	Nome do composto	Pico do número de onda (cm^{-1})	Intervalo do número de onda (cm^{-1})
C=O	Carbonila	1700	1676 – 1716
S=O	Sulfóxido	1030	989 – 1050
CH ₂	Metileno	1430	1399 – 1486
CH ₃	Metilo	1375	1676 – 1716

Santos *et al.* (2021) explica que os grupos alifáticos metileno (CH₂) e metil (CH₃), são utilizados como grupos de referência, uma vez que estas estruturas são estáveis

e não afetadas pelos procedimentos de envelhecimento aplicados. A ideia de utilizar um grupo de referência é remover qualquer variação da penetração do feixe IR entre as amostras para avaliar o envelhecimento real dos ligantes asfálticos na presença dos agentes rejuvenescedores.

Os ensaios de FTIR desta pesquisa foram realizados no CERTBIO/UFCG, e no LAMMEN/UFRN. O equipamento utilizado é o Espectrômetro Bruker Vertex 70, como sonda ATR.

3.2.9.3 Análise reológica

O Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, é utilizado na determinação de parâmetros viscoelásticos do ligante a temperaturas elevadas e intermediárias. O equipamento utilizado foi o DSR, da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1), que mede o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ) a temperaturas e frequências de carregamentos desejados. Os ensaios realizados nesta etapa foram: PG, MSCR, LAS e curva mestra.

3.2.9.3.1 Grau de Performance (*Performance Grade* – PG)

O PG estabelece uma faixa de temperatura na qual o ligante atende aos critérios de desempenho, sendo o parâmetro utilizado para definir o limite superior de PG o seno do ângulo de fase ($G^*/\text{sen}\delta$). O ensaio foi conduzido para avaliar o comportamento do parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ conforme a variação de temperatura, iniciando em 46 °C com aumento gradativo de 6 em 6 °C, em amostras de ligantes de 25 mm de diâmetro com 1 mm de espessura. O valor do PG é determinado pela temperatura anterior à falha observada durante o ensaio.

A temperatura de falha dos ligantes é aquela em que o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ atinge um valor inferior a 1,0 kPa antes do processo de envelhecimento, a curto prazo e, um valor de 2,2 kPa após esse processo, conforme especificação SUPERPAVE. Visto que todas as amostras de ligantes recuperados eram provenientes de misturas envelhecidas, a determinação do PG contínuo foi realizada com base no valor de 2,2 kPa para o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$.

Com base nos resultados de PG, tanto virgem quanto envelhecido conforme as metodologias estudadas, foi possível calcular o índice de envelhecimento ou *Aging Index* (AI). Este índice relaciona o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ do ligante, antes e após, o

envelhecimento a uma temperatura específica, conforme descrito na Equação (12), permitindo avaliar a suscetibilidade do material ao envelhecimento.

$$AI = \frac{G^*/\text{sen}\delta \text{ (ligante envelhecido)}}{G^*/\text{sen}\delta \text{ (ligante virgem)}} \quad (12)$$

3.2.9.3.2 Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (*Multiple Stress Creep and Recovery – MSCR*)

O ensaio de MSCR é uma técnica utilizada para avaliar as propriedades viscoelásticas de ligantes asfálticos. Este ensaio é especialmente importante porque simula as condições reais que os ligantes asfálticos enfrentam em campo, onde são submetidos a múltiplas tensões e ciclos de temperatura.

O ensaio foi realizado com a aplicação de 20 ciclos de tensão ao ligante asfáltico. Os primeiros 10 ciclos foram realizados sob uma tensão baixa de 0,1 kPa, enquanto os ciclos subsequentes foram aplicados sob uma tensão alta de 3,2 kPa. Para cada ciclo, foram registrados os valores da curva de deformação *versus* tempo. A temperatura de ensaio foi estabelecida em 64°C, por ser a temperatura mínima especificada pela norma do DNIT para países de clima tropical.

Durante a fase de fluência (*creep*), o ligante é submetido a uma carga de tensão constante na temperatura de ensaio por um período prolongado. Isso permite observar como o ligante se deforma ao longo do tempo sob condições de carga constante, refletindo sua capacidade de resistir à deformação plástica ao longo do tempo. Após a fase de fluência, o ensaio avalia a capacidade do ligante de se recuperar após a remoção da carga de tensão, enquanto é mantida a temperatura. Isso é essencial para entender a capacidade do ligante de recuperar sua forma original após sofrer deformação, o que é crítico para a durabilidade e desempenho dos pavimentos asfálticos.

A partir dos resultados de deformação das amostras devido às tensões aplicadas, foram calculados e monitorados os seguintes parâmetros: a compliância não-recuperável (J_{nr}), usado para avaliar a propensão do ligante asfáltico à deformação permanente; a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis sob 0,1 kPa e 3,2 kPa ($J_{nr\text{diff}}$), usado para avaliar a sensibilidade dos ligantes asfálticos a mudanças no nível de tensão; e o percentual de recuperação elástica (%R), usado

para indicar a capacidade do ligante asfáltico de se recuperar elasticamente ao longo do tempo.

Além disso, os resultados foram utilizados para classificar os ligantes de acordo com a recomendação da AASTHO M320 (2016), conforme a Tabela 20. A classificação é baseada no valor do Jnr à 3200 Pa e avalia o volume de tráfego que o pavimento suporta.

Tabela 20 - Classificação de volume de tráfego baseado no valor de Jnr à 3200Pa

PROPRIEDADE	MÁX.	TIPO DE TRÁFEGO	NÚMERO DE PASSADAS DE UM EIXO PADRÃO
JNR À 3200 PA	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	2,0	Pesado (H)	< 10 milhões
	1,0	Muito Pesado (V)	< 30 milhões
	0,5	Extremamente Pesado (E)	< 100 milhões

Fonte: AASHTO M320 (2016)

3.2.9.3.3 Varredura de Amplitude Linear (*Linear Amplitude Sweep - LAS*)

O ensaio de LAS é uma técnica utilizada para caracterizar as propriedades viscoelásticas de ligantes asfálticos. Este ensaio é particularmente relevante para entender como esses materiais se comportam sob condições de carregamento variáveis, como aquelas encontradas em pavimentos sujeitos a tráfego e variações de temperatura.

As amostras de ligante asfáltico utilizadas para realização do ensaio tinham 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. De acordo com a norma AASHTO TP 101 (2012), é especificado que estas devem ser envelhecidas utilizando os métodos RTFO e PAV. No entanto, neste estudo, o ensaio foi realizado utilizando amostras envelhecidas mediante aplicação dos protocolos de envelhecimento adotados.

Na realização do ensaio, o ligante asfáltico é submetido a um ciclo de varredura de amplitude, onde a tensão aplicada varia de forma sinusoidal ao longo do tempo, numa frequência de 0,2 a 30 Hz, com deformação controlada de 0,1%. Esse ciclo permite avaliar como o ligante responde a diferentes níveis de tensão, desde baixos até altos, e como essa resposta varia com a frequência aplicada. Durante a varredura

de amplitude, foram registradas a tensão (ou força) aplicada e a deformação resultante, com incremento linear variando de 0,1 a 30% ao longo de 300 ciclos de carga, no intervalo de 300 segundos.

Existe um critério baseado na relação entre o LAS para ligantes e a fadiga uniaxial para misturas asfálticas, utilizando o modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD). Underwood (2011) e Hintz & Bahia (2013) propuseram o fator de fadiga do ligante (FFL), determinado pela área abaixo das curvas de fadiga para níveis de tensão de 1,25% e 2,50%. Esse índice é calculado de acordo com a Equação 13.

$$FFL = \frac{(\log(Nf_{1,25}) + \log(Nf_{2,5\%}))}{2} \times (\log(0,025) - \log(0,0125)) \quad (13)$$

Onde:

$Nf_{1,25\%}$: vida de fadiga do ligante a 1,25% de deformação;

$Nf_{2,5\%}$: vida de fadiga do ligante a 2,5% de deformação.

Diante disto, Nascimento (2021) propôs limites para o FFL dos ligantes asfálticos com base no banco de dados que a Petrobrás vem acumulando no Brasil. Esses limites estão detalhados na Tabela 21 e foram utilizados para classificar os ligantes com base nos resultados obtidos no ensaio.

Tabela 21 – Classificação do FFL (19°C)

Classificação	Nível	FFL (19°)
BAIXO	1	$\leq 1,22$
INFERIOR	2	$1,22 \leq FFL \leq 1,31$
INTERMEDIÁRIO	3	$1,31 \leq FFL \leq 1,48$
SUPERIOR	4	$1,48 \leq FFL \leq 1,57$
EXCELENTE	5	$\geq 1,57$

Fonte: Nascimento (2021).

3.2.9.3.4 Curva mestra

O ensaio de curva mestra é uma técnica utilizada para caracterizar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos sob uma ampla faixa de temperaturas e taxas de deformação. Como o ensaio não segue diretrizes normativas específicas,

sua análise é fundamentada na revisão da literatura e na observação da resposta do material às condições de teste aplicadas.

Durante o ensaio, foram registrados parâmetros como módulo complexo (kPa), frequência (Hz), ângulo de fase (δ) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), onde para cada temperatura, neste caso entre 5 e 65 $^{\circ}\text{C}$, foi verificada a frequência de aplicação de torque e medidos os parâmetros de módulo dinâmico de cisalhamento ($|G^*|$) e ângulo de fase (δ). Esses parâmetros fornecem informações detalhadas sobre a rigidez, capacidade de dissipação de energia e comportamento viscoelástico do ligante. A temperatura de sobreposição utilizada no ensaio foi de 25 $^{\circ}\text{C}$.

3.2.10 Caracterização funcional e mecânica das misturas

A análise das propriedades mecânicas e funcionais permitirão verificar o efeito da adição da vermiculita saturada no desempenho das misturas. Os ensaios que foram realizados nesta etapa da pesquisa estão apresentados na Tabela 22 e, aqueles que não foram detalhados no tópico 3.2.5 estão descritos nos tópicos 3.2.10.1, 3.2.10.2, 3.2.10.3, 3.2.10.4, 3.2.10.5, 3.2.10.6.

Tabela 22 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização, funcional e mecânica, das misturas.

ENSAIOS	MÉTODOS
Vazios comunicantes	-
Volume de vazios	DNIT- ME 427/2020 e 428/2022
Permeabilidade	-
Resistência à tração indireta por compressão diametral	DNIT-ME 136/2018
Determinação do dano por umidade induzida	DNIT-ME 180/2018
Escorrimento	ASTM D6390/2017
Desgaste por abrasão – Cântabro	DNIT-ME 383/1999
Módulo de resiliência	DNIT-ME 135 /2018

3.2.10.1 Vazios comunicantes

O ensaio para determinação do volume de vazios comunicantes (V_{vc}) seguiu a formulação da Associação de Rodovias do Japão citada por Muniz *et al.* (2004), em que determina a capacidade drenante da mistura asfáltica por meio da quantidade de vazios eficazes. O ensaio consistiu basicamente em pesar o corpo de prova, ao ar e depois, pesá-lo novamente submerso. Por fim, a porcentagem de vazios

comunicantes foi determinada por meio da Equação 6, na qual o volume de agregado e poros independentes do CP (C) foi determinada pela Equação 7.

$$V_c = \left(\frac{V-C}{V} \right) \times 100 \quad (6)$$

$$C = \left(\frac{P-P'}{\gamma} \right) \quad (7)$$

Onde:

V_c: volume de vazios comunicantes (%);

V: volume do CP;

C: volume de agregado e poros independentes do CP;

P: Peso seco;

P': Peso imerso;

γ: peso específico da água.

3.2.10.2 Comportamento drenante

Para fluido incompressível a vazão que escoar em movimento permanente no interior da massa porosa é obtida normalmente pela Equação da Continuidade, conforme Equação 8 (MASSEY, 2002). Enquanto Caputo (1973) diz que o coeficiente de permeabilidade (k) é a velocidade superficial de escoamento (v) da água através da área total (sólidos + vazios) da seção transversal (A), sob um gradiente hidráulico unitário (i = 1), como visto na Equação 9. As equações são definidas por:

$$Q = A \times v \quad (8)$$

$$v = k \times i \quad (9)$$

Onde:

Q: vazão, (L³/T);

A: área da seção de escoamento, (L²);

v: velocidade superficial de escoamento, (LT⁻¹);

k: coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica, (LT⁻¹);

Logo, estes conceitos foram utilizados como base para o cálculo da permeabilidade das misturas, por meio dos dados da água drenada obtidos nas pesagens após os corpos de prova serem submetidos a chuva simulada. Estes resultados foram comparados com os obtidos no ensaio de permeabilidade.

3.2.10.3 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado com o objetivo de determinar o coeficiente de permeabilidade das misturas asfálticas, a fim de verificar a funcionalidade no que se refere à capacidade de drenar a água precipitada sobre a superfície do pavimento. O ensaio foi realizado em um permeômetro de parede flexível e carga constante, Tri-Flex 2 da ELE Internacional Inc./Soiltest Products Division com temperatura controlada de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, ilustrado na Figura 39.

Figura 39 - Permeômetro de parede flexível TRI-Flex 2



Fonte: Costa (2019)

De acordo com a norma ASTM D5084/1990, o ensaio pode ser finalizado quando as leituras de volume de água na entrada e na saída do corpo de prova forem estáveis e a razão entre as duas, em pelo menos quatro leituras ao longo do tempo, situe-se no intervalo de 0,75 e 1,25. Por fim, determina-se o coeficiente de permeabilidade das misturas asfálticas por meio da Equação 10.

$$K = \frac{v(t_1, t_2) \times L}{P_b \times A \times t} \quad (10)$$

Onde:

K: coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$v(t_1, t_2)$: volume lido entre o tempo inicial e o final (cm³);

L: comprimento do corpo de prova (cm);

P_b : diferença de pressão entre a entrada e a saída (cmca);

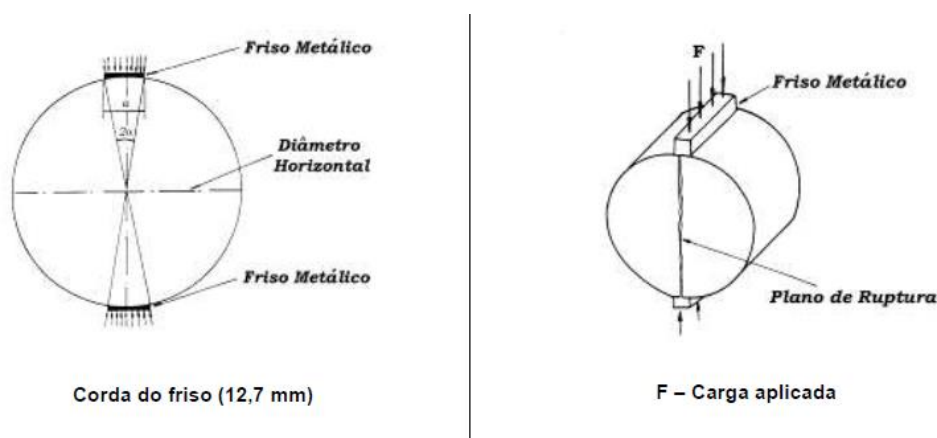
A: área do corpo de prova (cm²);

t: tempo gasto entre as leituras inicial e final;

3.2.10.4 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado segundo as recomendações da DNIT-ME 136/2018. Este, consistiu 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 40 (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Figura 40 - Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral



Fonte: DNIT (2018)

Para iniciar o procedimento, o corpo de prova foi mantido por, no mínimo, 4 horas em temperatura controlada de 25°C. Após esse período, o corpo de prova foi acomodado em um dispositivo centralizador e levado à prensa. A carga foi então aplicada à uma velocidade de 0,8 mm/s até a ruptura da amostra e, em seguida, a tensão foi calculada por meio da Equação 11.

$$\sigma_R = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (11)$$

Onde:

σ_R : Tensão de tração (MPa);

F: Carga de compressão de ruptura (N);

D: Diâmetro da amostra (mm);

H: Altura da amostra (mm).

3.2.10.5 Determinação do dano por umidade induzida

O ensaio de Lottman Modificado também é conhecido como Ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida e avalia a adesividade das misturas

asfálticas. Consiste na avaliação de misturas asfálticas quanto a sua suscetibilidade à água, já que este afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O ensaio foi realizado segundo a norma DNIT-ME 180/2018, no entanto, com algumas modificações recomendadas pela ASTM D7064/21. O ensaio foi realizado com seis corpos de prova com dimensões de 100x63,5mm. Destes, três formaram o subgrupo de controle e os outros três foram o subgrupo condicionado, submetidos a ciclos de congelamento e descongelamento de 16 horas a -18°C e 24 horas a 60°C, respectivamente. Ao final dos ciclos todas as amostras foram ensaiadas para determinação da resistência à tração indireta.

Dentre as alterações do ensaio conduzido para amostras de 7% de vazios, para as misturas de graduação aberta, este é realizado com cinco ciclos de congelamento e descongelamento ao invés de um. Além disso, o vácuo aplicado foi de 87,8 kPa, durante 10 minutos, para saturar o corpo de prova a qualquer nível de saturação. E por fim, os CPs foram mantidos submersos em água durante os ciclos de congelamento para manter a saturação.

3.2.10.6 Modulo de resiliência

O ensaio do Módulo de Resiliência (MR) foi realizado segundo Norma DNIT ME 135/2018. Os resultados foram obtidos com auxílio do *software* UTS0031.39 *Indirect Tensile Modulus Test*, utilizando a prensa UTM-25, que obtém o módulo instantâneo. Foram utilizados condicionamentos de 50 ciclos e os LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) mediram a deformação elástica do CP durante o carregamento cíclico com frequência de 1Hz, sendo que 0,1segundo foi utilizado para aplicação de carga e 0,9 segundo para descanso. O equipamento é automatizado e um software foi utilizado para cálculo do MR, sendo que este valor é uma média dos resultados em 5 leituras após os ciclos de condicionamento a que o CP foi submetido.

Os ensaios de carga repetida, em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo e depois diminui até anular-se, ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso, procuram conhecer o material. A amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões de deformações produzidas. A frequência remete o fluxo de veículos (MOURÃO, *et al.*

2003). O ensaio para a determinação do módulo de resiliência, ensaio de tração indireta com carregamento repetido, simula o comportamento mecânico da mistura asfáltica, na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada (SALES, 2015).

3.2.11 Análise estatística

Para uma melhor interpretação dos dados coletados foi realizada a análise estatística com o emprego do teste ANOVA ou análise de variância. Esta é uma técnica estatística utilizada para comparar as médias de três ou mais grupos independentes e, é amplamente utilizado para determinar se há diferenças significativas entre as médias desses grupos.

A ANOVA parte do pressuposto de que as amostras são provenientes de populações com distribuições normais e variâncias homogêneas. Existem diferentes tipos de ANOVA, sendo os mais comuns o ANOVA unifatorial (one-way ANOVA) e o ANOVA bifatorial (two-way ANOVA), que diferem na quantidade de fatores que estão sendo analisados.

O procedimento básico da ANOVA envolve o cálculo da variância total dos dados e sua decomposição em duas componentes: a variância entre os grupos (entre-grupos) e a variância dentro dos grupos (dentro-grupos). A razão entre essas variâncias é então calculada, pela Equação 12 e comparada com uma distribuição F para determinar se há uma diferença significativa entre os grupos.

$$F \text{ cal} = \frac{QM}{QM \text{ erro}} \quad (12)$$

Onde:

QM: quadrado médio, obtido através da Equação 13;

QMerro: erro dos quadrados médios.

$$QM = \frac{SQ}{GL} \quad (13)$$

Onde:

SQ: soma dos quadrados, obtido pela Equação 14;

GL: grau de liberdade.

$$SQ = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (14)$$

Onde:

X: parâmetro observado;

N: número de observações.

Se o valor calculado de F_{calc} exceder o valor tabelado de F_{tab} para um determinado nível de significância p a hipótese nula é rejeitada. Em contrapartida, se o valor de F_{calc} for inferior ao valor tabelado de F_{tab} , os dados apresentam significância para o modelo e, conseqüentemente, o modelo é considerado válido.

A escolha do nível de significância (p) no teste de hipóteses é importante para controlar a probabilidade de erro. Na prática, o nível de significância representa a probabilidade de rejeitar ou aceitar a hipótese nula quando esta é verdadeira, ou seja, a probabilidade de erro. O nível de significância adotado para as análises desta pesquisa foi de 5%.

Além disso, quando a ANOVA revela diferenças significativas entre os grupos, testes de comparações múltiplas, como o teste de Tukey ou o teste de Bonferroni, podem ser realizados para identificar quais grupos diferem entre si. Então, quando constatado que havia diferença significativa para a variável analisada, utilizou-se o teste Tukey para comparar as variações dentro do grupo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES










Nesta seção são apresentados os resultados da análise química dos ligantes, extraídos e recuperados das misturas asfálticas submetidas as diferentes condições propostas, por meio da análise de espectrometria do infravermelho. Além disso, são apresentados também os espectros para o ligante na sua condição virgem e envelhecida, por RTFOT, e para o óleo de soja residual.

A análise reológica de ligantes asfálticos submetidos ao processo de rejuvenescimento permitiu quantificar e entender as mudanças induzidas a partir da inserção do óleo na mistura asfáltica. Logo, a fim de avaliar a eficácia da adição do APSOSR, no rejuvenescimento de CPAs, também serão apresentados os resultados de caracterização reológica dos ligantes recuperados.

Foram determinadas as propriedades volumétricas, funcionais e mecânicas das misturas asfálticas nas condições de referência, envelhecidas e envelhecidas submetidas ao carregamento cíclico. Estes parâmetros foram analisados por serem indicadores do desempenho das misturas após o processo de usinagem e compactação, pois qualquer liberação do rejuvenescedor afeta significativamente estas propriedades.

Em decorrência do elevado volume de dados apresentados em cada gráfico deste capítulo, os padrões e cores adotados para cada protocolo e misturas, respectivamente, foram sintetizados no Quadro 8, para facilitar a compreensão.

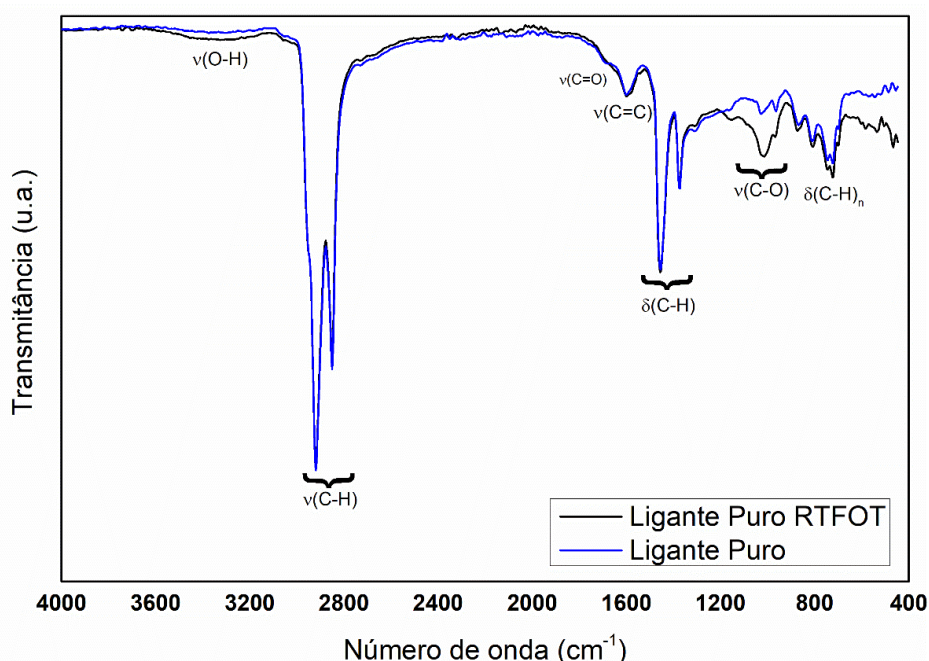
Quadro 8 – Cores e padrões adotados para as misturas e protocolos adotados.

Amostra	Cor	Protocolo	Padrão de Preenchimento
Pura	Verde	Referência	Sólido 
		Envelhecimento	Listrado 
		Envelhecimento + Ação cíclica	Pontilhado 
0,5% de óleo	Laranja	Referência	Sólido 
		Envelhecimento	Listrado 
		Envelhecimento + Ação cíclica	Pontilhado 
0,7% de óleo	Roxo	Referência	Sólido 
		Envelhecimento	Listrado 
		Envelhecimento + Ação cíclica	Pontilhado 

4.1 Análise química dos ligantes recuperados

A análise química do ligante asfáltico teve o intuito de determinar níveis de oxidação, bem como determinar de maneira qualitativa e/ou semi-quantitativa a presença de aditivos orgânicos. Para isso, foram realizados os ensaios de FTIR nas amostras de ligante virgem e após RTFOT, bem como para os ligantes proveniente das misturas asfálticas. Os espectros obtidos para as amostras de ligante puro e após RTFOT estão contidos na Figura 41.

Figura 41 - Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico.



Para os espectros dos ligantes (antes e após RTFOT), foi obtido um perfil semelhante para as amostras. Para o ligante pós RTFOT foram encontrados picos com intensidade relevante para indicar um alto grau de oxidação para o tratamento por RTFO, como em regiões entre 3200 e 3600 cm^{-1} , para estiramentos de hidroxilas (O-H) ou entre 1250 e 1050 cm^{-1} , para estiramentos de grupos C-O.

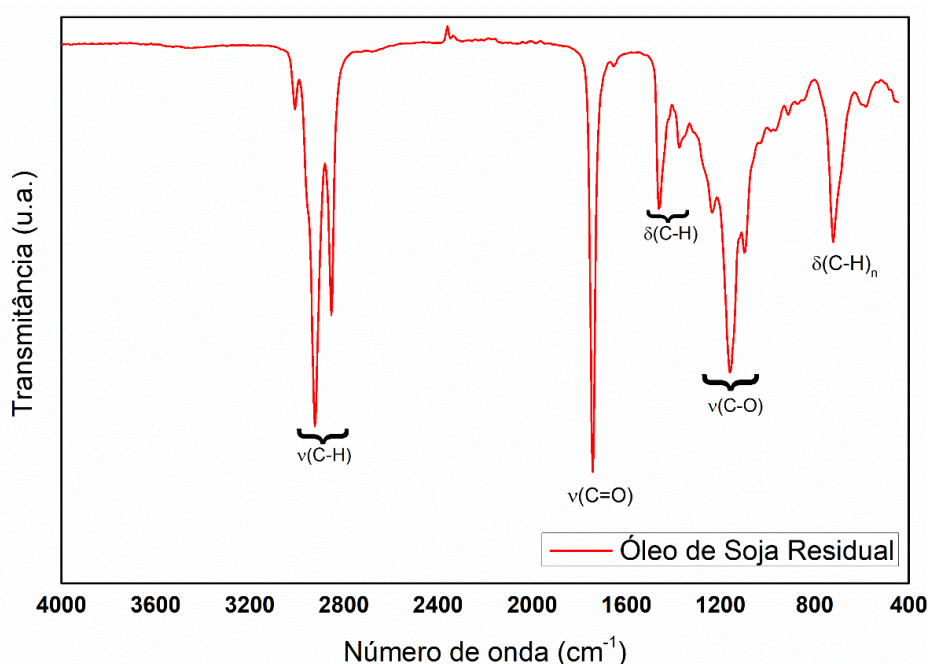
Em relação a caracterização do ligante, os principais sinais indicativos da sua composição estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos, sendo estas caracterizadas por picos de alta intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3000 e 2800 cm^{-1} . Nesta faixa foram encontrados picos em 2951 cm^{-1} e 2867 cm^{-1} , para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metila ($-\text{CH}_3$) e picos em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} ,

para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metileno ($-\text{CH}_2-$), além de um pico em 2890 cm^{-1} para estiramento de grupos metina ($-\text{CH}-$), parcialmente obscurecido pelo 2919 cm^{-1} .

Picos com baixa intensidade foram encontrados entre 2000 e 1700 cm^{-1} , indicando bandas harmônicas para aromáticos substituídos, bem como pequenos picos para grupos carbonilas ($\text{C}=\text{O}$) em pequena quantidade entre 1760 e 1700 cm^{-1} . A presença de um pico em torno de 1600 cm^{-1} é indicativo de insaturações ($\text{C}=\text{C}$) em anéis, juntamente com picos em torno de 1475 cm^{-1} , sendo este último geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) em 1455 cm^{-1} . O aparecimento deste último está em conformidade com os picos deste grupo para deformação axial (2919 e 2850 cm^{-1}), enquanto que o pico em 1375 cm^{-1} , referente a deformação angular em grupos metila ($-\text{CH}_3$), está em conformidade com picos de deformação axial em 2951 e 2867 cm^{-1} . Por fim, o pico em torno de 723 cm^{-1} é referente a vibração do tipo “*rocking*” para cadeias saturadas acima de 4 carbonos, $-(\text{CH}_2)_n-$, com $n \geq 4$, confirmando a característica orgânica do ligante com presença de grupos saturados, insaturados e aromáticos.

Na Figura 42 está contida o espectro para o óleo de soja residual. Este espectro apresentou alguns picos semelhantes ao do ligante em relação a ligações entre carbono e hidrogênio, que são espécies em comum entre as estruturas orgânicas.

Figura 42 - Espectro de FTIR para a amostra de óleo de soja residual.



Neste espectro foi observada a presença de picos entre 2950 e 2870 cm^{-1} , relacionados a grupos metila e metileno (estiramentos assimétricos e simétricos) e em 1460 e 1375 cm^{-1} , para deformação angular destes mesmos grupos metileno e metila. Em consonância, há também o aparecimento de picos de baixa intensidade em 3010 e 1650 cm^{-1} , referentes às deformações axiais ($=\text{C-H}$ e C=C) em alcenos. O pico em 1745 cm^{-1} indica estiramento de grupos carbonila, e junto aos picos em 1250, 1170 e 1090 cm^{-1} (estiramentos de ligação C-O) são o indicativo da presença de grupos ésteres na amostra. Além disso, o pico em 721 cm^{-1} para estiramentos do tipo *rocking*, indica que há cadeias alifáticas longas nas moléculas contidas no óleo.

A não identificação de uma banda entre 3100 e 3600 cm^{-1} é indicativo de que o óleo possui baixo (ou desprezível) teor de ácidos graxos, e junto às informações de valor de estiramento da carbonila (1745 cm^{-1}), indica que o óleo é rico em ésteres, mais especificamente os triacilgliceróis. Quando presentes em quantidades adequadas, os ácidos graxos podem melhorar a flexibilidade e a capacidade de recuperação do ligante asfáltico, além de ajudar a reduzir sua rigidez em diferentes temperaturas, logo, por não possuir ácidos graxos a capacidade de rejuvenescimento do óleo utilizado pode ser comprometida. Apesar disso, por ser rico em ésteres, essa deficiência do óleo pode ser compensada, visto que estes componentes têm a capacidade de reduzir a rigidez do ligante, tornando-o mais flexível e resiliente em uma ampla faixa de temperaturas.

Os espectros de FTIR destacam os números de onda correspondentes às vibrações das ligações carbonila (C=O) e sulfóxido (S=O), que podem revelar as alterações de grupos químicos funcionais no processo de envelhecimento e rejuvenescimento. Os espectros obtidos para as amostras de ligantes extraídas diretamente dos corpos de prova estão contidos na Figura 43. Em paralelo, os espectros foram obtidos também dos ligantes recuperados das misturas asfálticas e, estes podem ser observados na

Figura 44.

Figura 43 – Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico, extraídas dos corpos de prova.

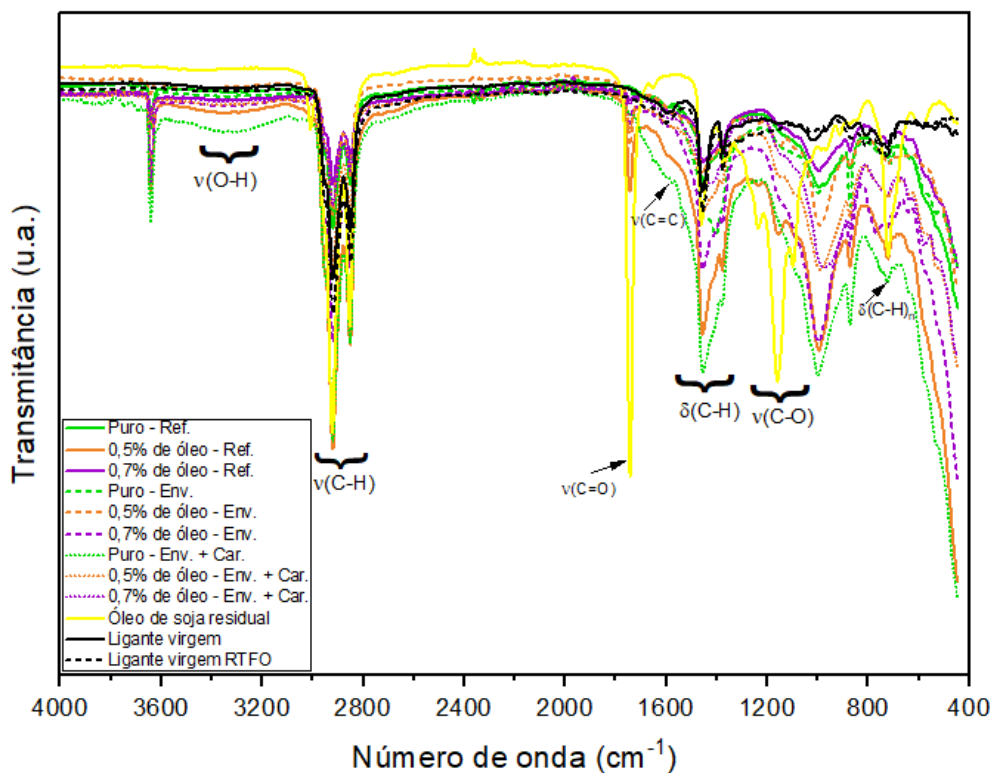
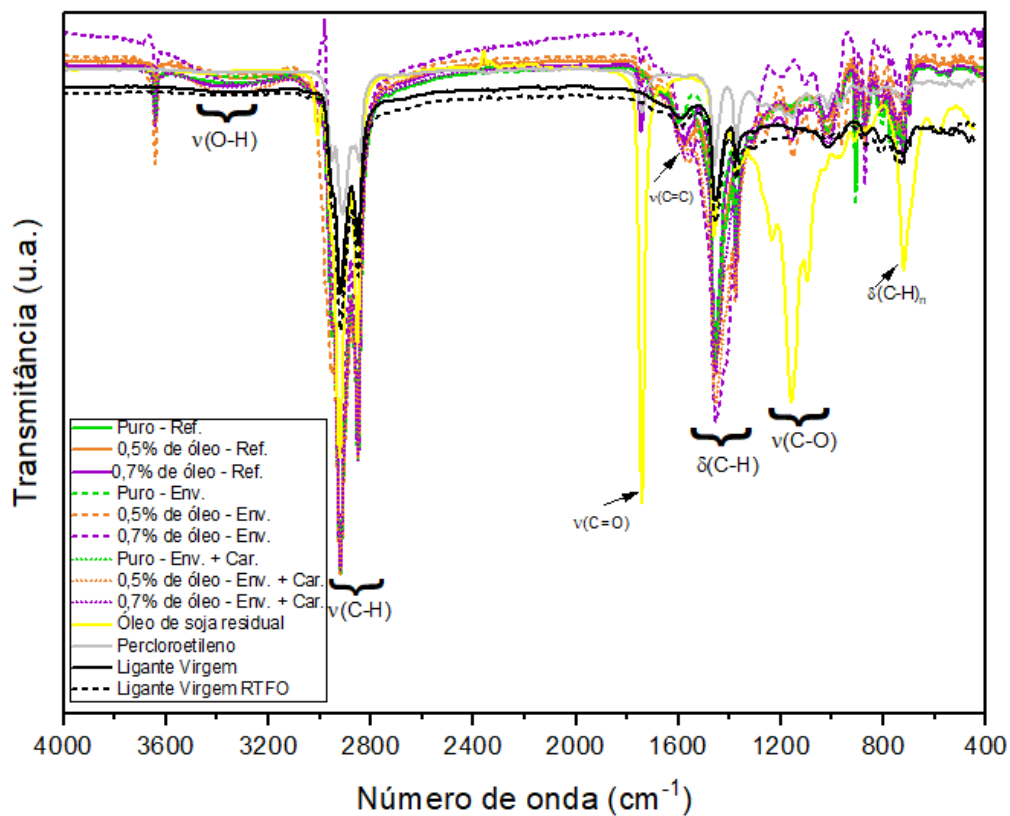


Figura 44 – Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico recuperado.



É importante destacar que os dados apresentados nesta pesquisa não podem ser utilizados para abordar a química envolvida no mecanismo de envelhecimento, pois não há informações públicas sobre os componentes químicos do rejuvenescedor, pois é um produto comercial. Desta forma, o objetivo do estudo é comparar o efeito do agente rejuvenescedor nos principais grupos característicos do envelhecimento asfáltico.

Ao observar os espectros, nota-se que tanto as amostras obtidas diretamente dos corpos de prova, como as amostras provenientes dos ligantes recuperados, apresentam picos em torno de 1000 cm^{-1} , que indicam a presença de resíduos inorgânicos do fíler da mistura. Apesar dos picos estarem presentes nos dois gráficos, estes são mais acentuados nas amostras retiradas dos corpos de prova, logo, acredita-se que a quantidade de resíduo é maior.

Na Figura 44 percebe-se a presença de picos em 930 , 845 e 780 cm^{-1} referente as vibrações nas ligações C-Cl e C-H (fora do plano) do solvente. A presença destes picos nos espectros dos ligantes recuperados indicam que ainda há solvente nas amostras. À medida que o solvente é removido, sua mobilidade é reduzida devido ao aumento da viscosidade, aumentando a resistência à difusão (BURR *et al.*, 1990). Por conta disso, Pinheiro e Vasconcelos (2022) complementam que atingir uma taxa de solvente residual nula, sem exceder a temperatura da amostra, torna-se dificultoso.

A presença de solvente em ligantes recuperados gera um nível significativo de amolecimento, o que pode levar a subestimação da rigidez real do material e, por conseguinte, na extensão do envelhecimento (GE *et al.*, 2017, 2019; ABUHASSAN *et al.*, 2019). Disto isto, é preciso se atentar na análise das propriedades reológicas dos ligantes em estudo, a fim de determinar se as alterações observadas são decorrentes da presença do solvente ou do óleo. No entanto, Hospodka, Hofko e Blab (2018) afirmam que as alterações reológicas são pouco significativas em função do percloroetileno, desde que o dispersante seja removido adequadamente até uma taxa de solvente residual inferior a 1%.

Para identificar quais amostras apresentam a presença do óleo de soja residual nos espectros de FTIR, deve-se procurar por bandas características associadas a este material. As amostras que exibem bandas de absorção entre 1750 - 1735 cm^{-1} , correspondentes aos grupos C=O de ésteres, e bandas associadas a insaturações C=C, que geralmente aparecem em torno de 1650 - 1600 cm^{-1} , indicam a presença do

óleo de soja residual. Ao analisar espectros gerados por ligantes rejuvenescidos com agentes à base de soja, Santos *et al.* (2021) também verificaram um pico de absorção em torno do número de onda de 1750 cm^{-1} , já que este pico é representativo dos grupos carbonila presentes nos ésteres dos bio-óleos.

Além disso, picos adicionais na região de $2920\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$ podem também sugerir a presença de cadeias alifáticas do óleo de soja. Nas Figura 43 e

Figura 44, ao comparar esses picos com os espectros de referência do óleo de soja residual, percebe-se a presença deste no ligante das misturas modificadas.

Ao analisar a Figura 43, os espectros apresentam sinais característicos de oxidação e degradação dos componentes asfálticos ao apresentar intensidade relevante em faixas específicas do espectro, como entre 1760 cm^{-1} e 1700 cm^{-1} para estiramentos de carbonilas (C=O) e entre 1250 cm^{-1} e 1000 cm^{-1} para estiramentos de grupos de sulfóxidos (S=O). Além disso, encontrou-se sinal indicativo de funções oxigenadas na faixa de 3200 cm^{-1} a 3600 cm^{-1} , relacionada à vibração em grupos O-H (hidroxilas). A análise destes picos indica a ação do óleo na mistura asfáltica, onde é possível perceber que a mistura sem a presença do APSOSR, submetida ao protocolo de envelhecimento/carregamento, foi a que apresentou maiores intensidades nestas faixas, o que indica maior nível de oxidação.

Nos espectros da

Figura 44 também se percebe o aumento na intensidade das bandas de O-H (bandas largas entre $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$), indicando a presença de grupos hidroxila, que aumentam com a oxidação. Verifica-se que o aumento nas bandas de C=O (bandas fortes perto de 1700 cm^{-1}) indica carbonilas formadas durante a oxidação. No entanto, observa-se intensidades distintas daquelas encontradas para as amostras provenientes dos corpos de prova, em decorrência do processo de extração e recuperação do ligante.

Destaca-se a redução nas bandas de C-H (em torno de $2850\text{-}2960\text{ cm}^{-1}$), que diminuem com a degradação de cadeias alifáticas, e apresentou características distintas para os dois espectros. No primeiro, apenas as amostras de ligantes puro/envelhecido/sob ação cíclica, com 0,5% de óleo/referência e 0,7% de óleo/envelhecido apresentaram reduções inferiores ao ligante na condição virgem, indicando que estão menos oxidadas. Enquanto no segundo, todas as amostras apresentaram reduções nas bandas de C-H inferiores ao ligante virgem, inclusive os

ligantes provenientes das misturas sem modificações. Isto pode indicar a presença do percloroetileno nas amostras, já que solventes orgânicos frequentemente exibem bandas de estiramento de C-H em torno de 2850-2960 cm^{-1} .

A Tabela 23 apresenta valores dos índices de oxidação para regiões dos espectros que correspondem a funções orgânicas oxigenadas. Esses índices foram calculados por meio da integração da área sob as curvas dos espectros da

Figura 44, já que estas amostras apresentaram menores quantidades de resíduo do fíler, e conseqüentemente, o impacto no resultado de oxidação é menor.

Tabela 23 - Índices de oxidação para as amostras de ligante

Protocolo/Amostra		IC _(C=O) (%)	IS _(S=O) (%)	ITOTAL (%)	
Ligante Virgem		0,08	8,84	8,93	
Ligante Virgem RTFO		0,24	4,68	4,92	
Ligantes recuperados das misturas	Referência	Mistura pura	2,43	10,06	12,48
		0,5% de óleo	1,59	8,34	9,93
		0,7% de óleo	1,10	7,87	8,97
	Envelhecimento	Mistura pura	2,50	11,10	13,60
		0,5% de óleo	2,25	6,21	8,47
		0,7% de óleo	1,87	15,92	17,79
	Envelhecimento + Ação cíclica	Mistura pura	2,61	10,79	13,39
		0,5% de óleo	2,25	12,48	14,74
		0,7% de óleo	2,16	11,84	14,01

A soma da área total das regiões de oxidação constitui um parâmetro utilizado para avaliar o grau de envelhecimento dos ligantes recuperados. Para uma melhor visualização, os valores dos índices de envelhecimento químico correspondentes ao índice de carbonila (IC) são mostrados na Figura 45, bem como a Figura 46 mostra os índices de sulfóxido (IS) para os ligantes puros e rejuvenescidos em função dos níveis de envelhecimento.

Figura 45 - Índices de carbonila em função do nível de envelhecimento para os ligantes puros e rejuvenescidos.

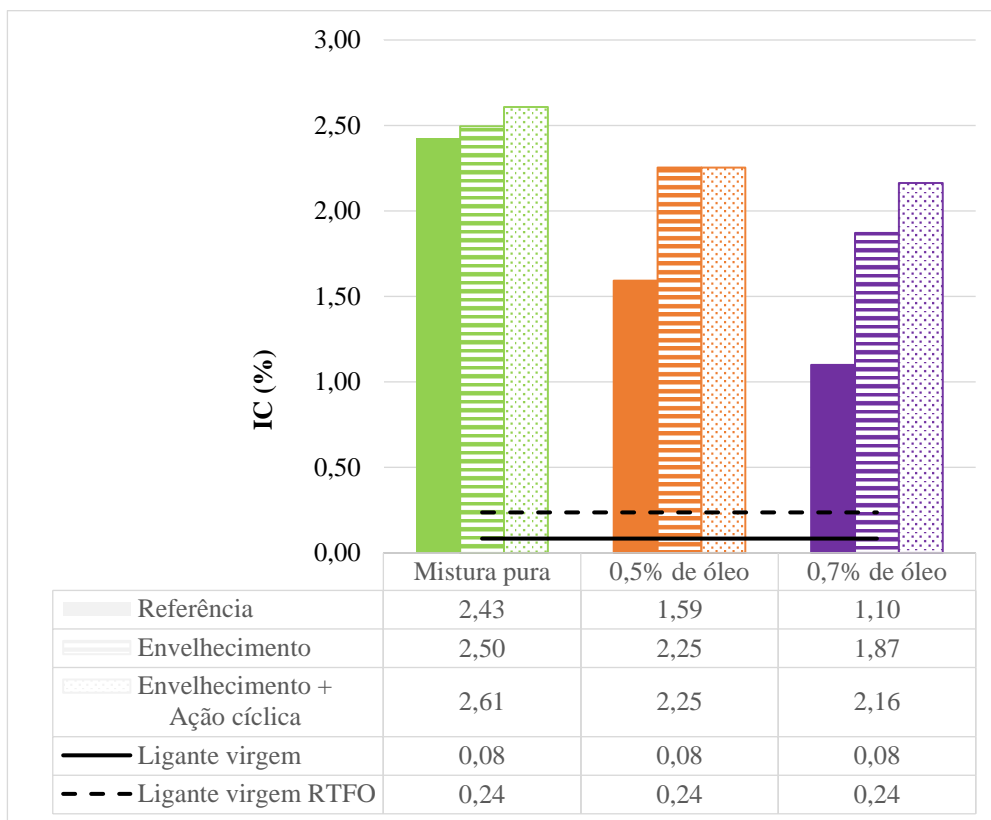
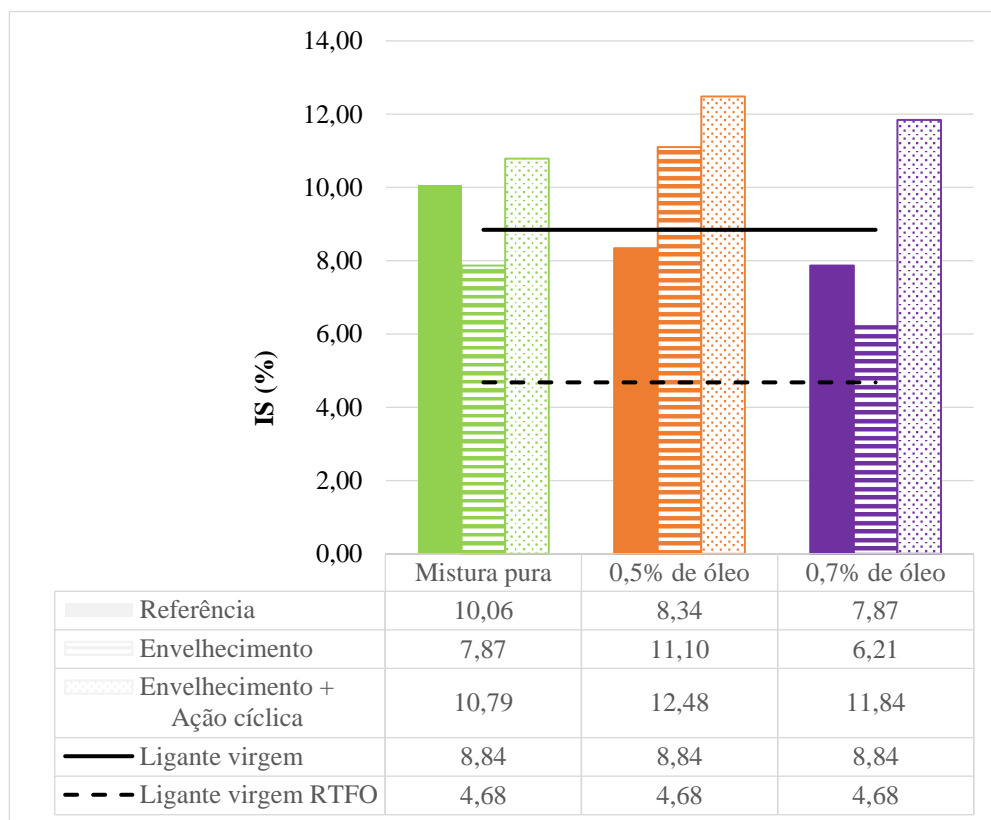


Figura 46 - Índices de sulfóxido em função do nível de envelhecimento para os ligantes puros e rejuvenescidos



No geral, observa-se que os valores do IC aumentam à medida que os ligantes são envelhecidos, quando comparadas amostras equivalentes. Apesar disso, os ligantes recuperados que continham rejuvenescedores, apresentaram valores de IC abaixo daqueles provenientes das misturas não modificadas, mesmo após o envelhecimento. Esta diferença poderia ser ainda mais pronunciada se considerar que parte das bandas de carbonila medidas por meio dos espectros de FTIR podem ser provenientes de agentes à base de soja.

Nota-se que os ligantes provenientes das misturas que continham o óleo residual apresentaram maiores diferenças de valores de IC, quando comparadas as amostras antes e após o envelhecimento. No entanto, Nayak & Sahoo (2017) concluíram que na presença de bio-óleos, o aumento nos valores de IC pode não ser necessariamente devido ao processo de envelhecimento do ligante, e sim dos grupos carbonila destes materiais. Esses achados concordam com os relatados por Zargar *et al.* (2012), que assumiram que o aumento no índice de carbonila foi parcialmente devido à carbonila de outros grupos ésteres presentes nos agentes de base biológica.

Para os resultados de IS percebe-se uma redução dos valores com o processo de envelhecimento, com exceção do ligante proveniente da mistura com 0,7% de óleo, inclusive para o ligante que não passou pelo processo de recuperação. Estes resultados corroboram com os observados por Cavalli *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2021), no entanto, esta tendência não é consistente com um processo oxidativo típico de envelhecimento. Os autores reforçam que o comportamento esperado era de aumento do IS com o processo de envelhecimento.

Elkashef *et al.* (2018) afirmam que a redução no índice de sulfóxido não é incomum sob de condição grave de envelhecimento e que este comportamento provavelmente é observado devido às intensas reações químicas que ocorrem durante a formação de sulfóxidos. Isto ocorre, pois, o enxofre presente nos ligantes asfálticos na forma de sulfetos é bastante reativo ao envelhecimento oxidativo para produzir sulfóxido.

De acordo com Santos *et al.* (2021) a redução no IS permite concluir que, devido à complexidade e à instabilidade dos compostos intermediários durante a oxidação, o envelhecimento químico do IS não é preciso o suficiente para se correlacionar com o processo de envelhecimento do ligante. Esta afirmação corrobora com os resultados encontrados nesta pesquisa.

É importante destacar que no cálculo das áreas de oxidação dos espectros da Figura 44, para os índices de sulfóxido, foi considerado o intervalo de onda entre 989 e 1050 cm^{-1} , faixa que compreende o número de onda relativo ao fíler, que se situa em torno de 1000 cm^{-1} . Disto isto, é possível inferir que como foi identificada a presença do resíduo nos ligantes recuperados, possivelmente houve influência da presença desses picos no IS calculado, conseqüentemente, os índices de oxidação foram superestimados.

Ao analisar o índice de oxidação total, que é a soma das parcelas de IC e IS, percebe-se que na condição de referência, a adição do óleo já proporcionou uma redução na oxidação do ligante. Da mesma forma, o teor de 0,5% de óleo apresentou bom desempenho na redução da oxidação das amostras envelhecidas, diferente do comportamento observado para o ligante recuperado puro, que apresentou um valor maior. No entanto, todas os ligantes provenientes das misturas submetidas ao envelhecimento e sob ação cíclica, apresentaram índices de oxidação superiores as demais amostras analisadas, bem como o ligante envelhecido contendo 0,7% de óleo.

Cavalli *et al.* (2018) apontaram que, apesar da adição de rejuvenescedores, a oxidação físico-química do ligante pode não ter sido revertida. Os autores destacam que o processo de rejuvenescimento não é causado apenas por alterações químicas no nível do grupo funcional, mas também por um rearranjo de componentes polares/apolares.

Além disso, Hassan & Todd (2017) completam que o uso de óleos como agentes rejuvenescedores é uma forma de complementar os componentes leves perdidos durante o envelhecimento do ligante e de induzir a diluição dos grupos funcionais do envelhecimento químico, mitigando o efeito das espécies de oxidação. Independente do mecanismo de rejuvenescimento do óleo de soja residual, pode-se inferir, com base nos espectros de FTIR dos ligantes envelhecidos e recuperados, que o rejuvenescedor contribuiu para reduzir, pelo menos parcialmente, o impacto do envelhecimento do ligante.

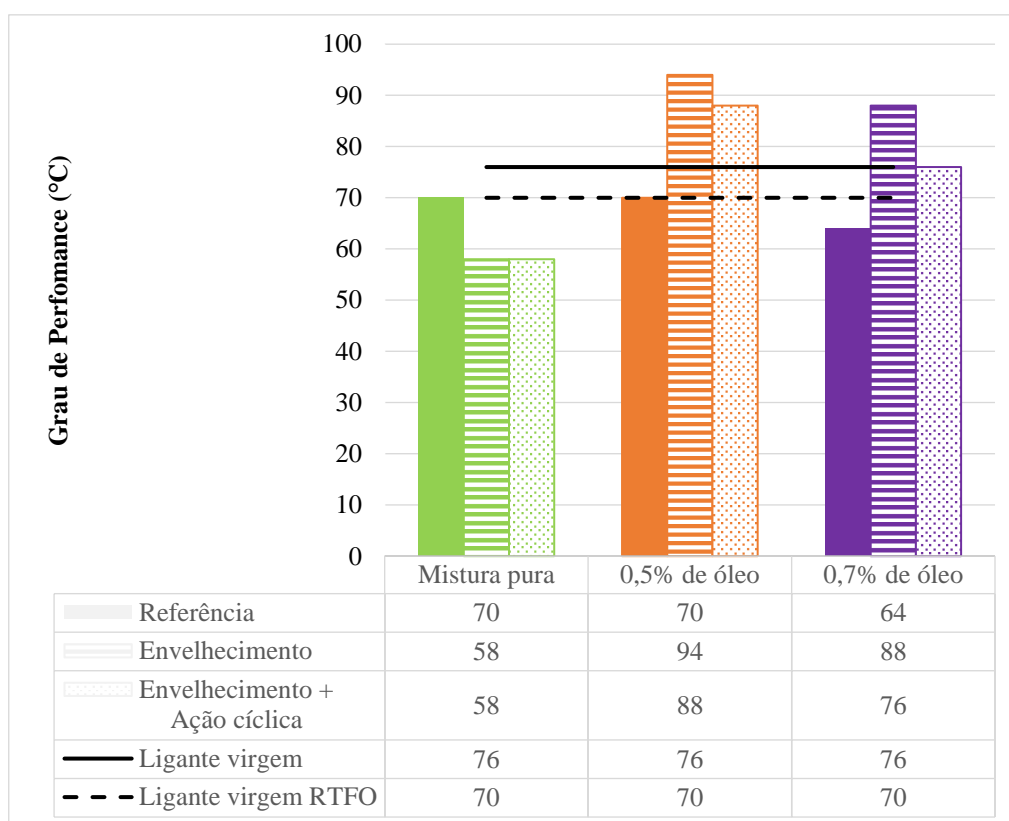
4.2 Análise reológica dos ligantes recuperados

4.2.1 Grau de desempenho – PG

O ensaio de PG permitiu delimitar a faixa de temperatura de utilização dos ligantes recuperados. Embora a temperatura mínima de uso do ligante possa ser

determinada, optou-se por determinar apenas a temperatura máxima, visto que no Brasil o clima que predomina é o tropical, tornando a ocorrência de temperaturas negativas pouco comum. Na Figura 47 é possível verificar as temperaturas máximas de PG dos ligantes recuperados, bem como do ligante virgem, antes e após RTFO.

Figura 47 - Temperaturas superiores de PG



Ao comparar os ligantes obtidos das misturas de referência, submetidas ao envelhecimento de curto prazo, percebe-se que os valores encontrados, de 70°C, é o mesmo daquele determinado para o ligante virgem, após RTFO, com exceção do ligante recuperado da mistura com 0,7% de óleo, que a temperatura foi de 64°C. Este comportamento pode ser explicado pela maior presença de óleo nesta amostra, já que pelo espectro da Figura 44, percebe-se uma banda forte em torno de 1740cm⁻¹, que é característica de grupos éster (C=O). Ao analisar os espectros FTIR de amostras de ligante asfáltico, a presença de bandas características de éster (C=O) e ligações CH alifáticas é geralmente indicativa da presença de óleo vegetal.

Observa-se um comportamento distinto dos ligantes oriundos das misturas modificadas com o APSOSR daqueles provenientes da mistura pura. Enquanto os primeiros apresentaram aumento da temperatura de PG com a aplicação dos

protocolos de envelhecimento e envelhecimento e carregamento cíclico, os segundos apresentaram redução nas temperaturas com a aplicação dos mesmos protocolos. De acordo com Lei *et al.* (2015) essa diminuição na temperatura pode ser vantajosa para reduzir a rigidez, pois uma menor rigidez implica em um menor estresse térmico no ligante, o que potencialmente reduz o risco do surgimento de trincas no pavimento. No entanto, a redução da temperatura do PG torna o ligante mais suscetível à deformação permanente, o que requer atenção no Brasil, em virtude de suas elevadas temperaturas.

Os ligantes recuperados das misturas modificadas com o APSOSR apresentaram tendência similares, em que ao aplicar o protocolo de envelhecimento ocorre um aumento de 24°C nas temperaturas de PG, porém, ao submeter as misturas à ação do carregamento cíclico, este aumento para as amostras com 0,5% de óleo e 0,7% de óleo é de 18°C e 12°C, respectivamente. O fato destas misturas apresentarem a capacidade de aumento de temperatura de PG após o envelhecimento, o que não aconteceu com a amostra de ligante puro, dá um indicativo de que o óleo agiu impedindo o efeito degenerativo do ligante. No entanto, é importante destacar que o aumento de 24°C pode estar associado também ao processo de recuperação do ligante, o que pode ter contribuído para o enrijecimento do material.

Torres *et al.* (2024) ao estudarem a utilização de óleo vegetal residual como agente rejuvenescedor de ligantes asfálticos verificaram que depois do procedimento de RTFO, os ligantes modificados com 1%, 2% e 3% de óleo, mantiveram as temperaturas de PG, que era de 64°C. Isso indica que o aditivo agiu como agente rejuvenescedor. Melo Neto *et al.* (2022) acrescentam que os compostos do óleo de soja agem protegendo o ligante da oxidação e/ou volatilização de compostos químicos, aumentando a resistência do ligante ao envelhecimento.

Os resultados também corroboram com os encontrados por Sousa *et al.* (2023) ao analisarem temperaturas de PG de ligantes modificados com cera de abelha, que é um aditivo capaz de reduzir a viscosidade do ligante, bem como o óleo vegetal. Eles observaram que misturas com 1%, 3% e 5% de cera de abelha foi capaz de manter as temperaturas de PG, diferente do ligante puro que após o envelhecimento de curto prazo apresentou um decréscimo de temperatura de 6°C.

Na Tabela 24 são apresentadas as análises de variância das temperaturas de PG observada devido à presença de APSOSR e aos diferentes protocolos de envelhecimento aplicados nas misturas estudadas, das quais os ligantes foram extraídos. Estes resultados foram obtidos com um nível de significância de 5%.

Tabela 24 - ANOVA para as temperaturas de PG

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	744	2	372	3,1	0,1537	6,9442
Protocolos	216	2	108	0,9	0,4756	6,9442
Erro	480	4	120			
Total	1440	8				

Diante dos resultados obtidos com a aplicação da análise da ANOVA, observa-se que o valor calculado de F para a presença do óleo é 3,1, enquanto para os protocolos de envelhecimento é 0,9, sendo ambos os valores inferiores ao valor crítico de F de 6,94. Assim, aceita-se a hipótese inicial de que a presença do APSOSR e os protocolos de envelhecimento não exercem uma influência significativa na variação das temperaturas de PG dos ligantes recuperados.

O PG contínuo permite uma representação mais precisa do comportamento do ligante asfáltico em relação à temperatura. Em vez de apenas uma classificação discreta de temperatura, que ocorre com a determinação do PG, o PG contínuo descreve como a especificidade do ligante varia continuamente ao longo de uma faixa de temperaturas. Isso é essencial para projetar misturas asfálticas que atendam aos requisitos de desempenho em uma ampla gama de condições climáticas. Os resultados da estimativa da temperatura de falha dos ligantes são mostrados na Figura 48 e a Tabela 25 apresenta as variações de temperatura entre o PG e o PG contínuo das amostras.

Figura 48 - Estimativa das temperaturas de falha

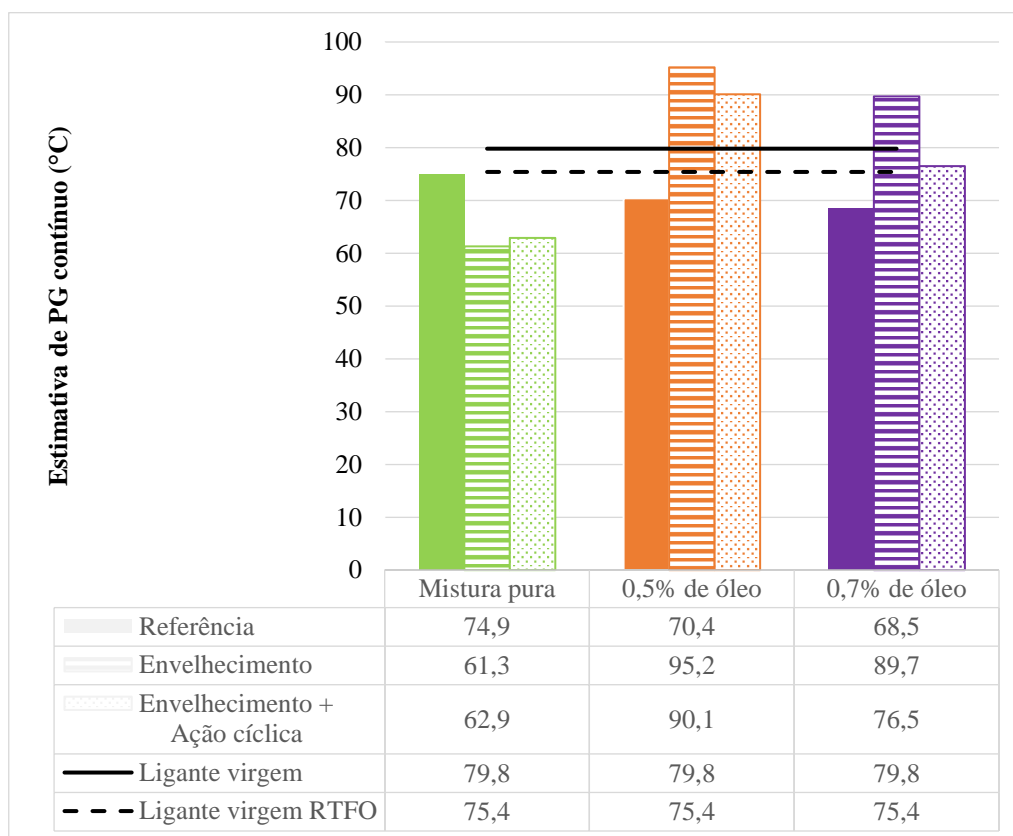


Tabela 25 - Variação das temperaturas de PG e PG contínuo nas amostras dos ligantes

Protocolo/Amostra		°C	%
Ligante Virgem		+ 3,8	5,0
Ligante Virgem RTFO		+ 5,4	7,7
Referência	Mistura pura	+ 4,9	7,0
	0,5% de óleo	+ 0,4	0,6
	0,7% de óleo	+ 4,5	7,0
Envelhecimento	Mistura pura	+ 3,3	5,7
	0,5% de óleo	+ 1,2	1,3
	0,7% de óleo	+ 1,7	1,9
Envelhecimento + Ação cíclica	Mistura pura	+ 4,9	8,4
	0,5% de óleo	+ 2,1	2,4
	0,7% de óleo	+ 0,5	0,7

Pode-se notar que a variação do PG tradicional para o PG contínuo ocorre entre 0°C à 6°C, em decorrência do degraú de temperatura de PG. Observa-se que a amostra de referência com 0,5% de óleo apresentou uma variação de apenas 0,6%,

bem como a amostra envelhecida sob ação cíclica com 0,7% de óleo apresentou uma variação de 0,7%, o que indica que os PG's destas amostras são mais representativos dentre os demais por possuir valor de PG próximo do seu verdadeiro ponto de falha.

Os resultados de PG contínuo de Santos *et al.* (2021), para os ligantes rejuvenescidos à base de soja, indicaram melhoria desta propriedade em comparação aos puros. Nesta pesquisa, os autores identificaram o aumento das temperaturas, nas amostras envelhecidas, com a adição do rejuvenescedor, bem como o comportamento observado nesta pesquisa.

A fim de investigar o impacto da variação da estimativa das temperaturas de falha devido à inclusão do óleo e à aplicação dos protocolos de envelhecimento nas misturas que resultou nos ligantes analisados, conduziu-se uma análise de variância dos dados. Os resultados são apresentados na Tabela 26 e foram avaliados com um nível de significância de 5%.

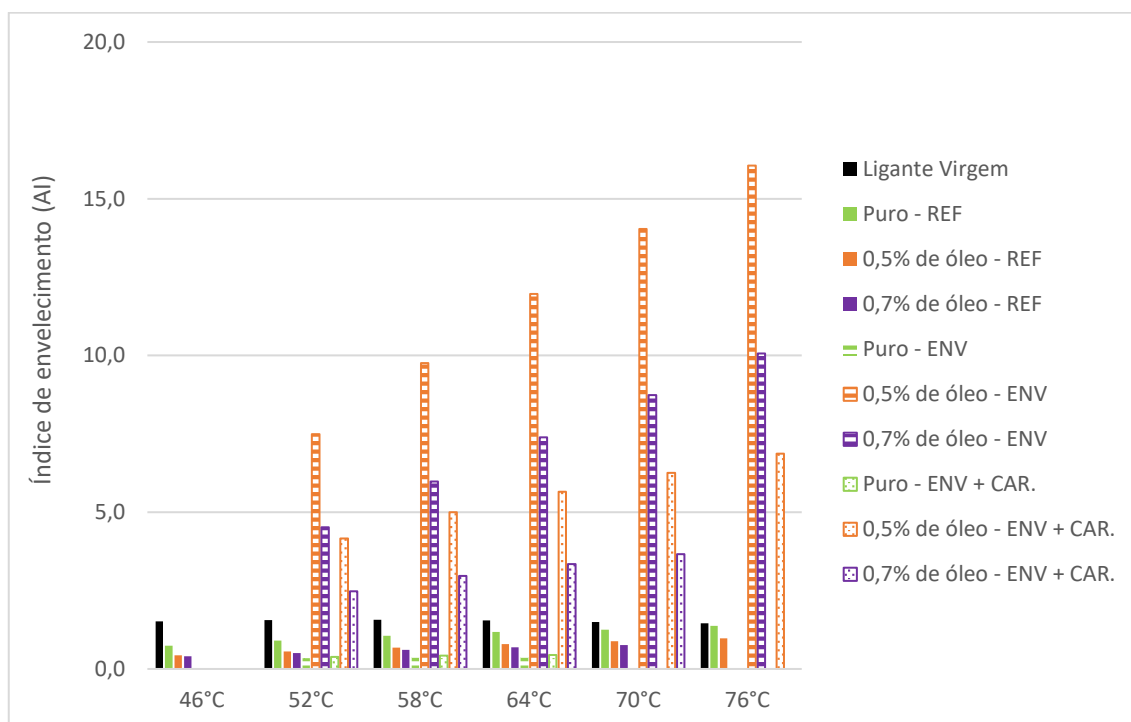
Tabela 26 - ANOVA para as estimativas de PG contínuo

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	545,7689	2	272,8844	2,1496	0,2322	6,9442
Protocolos	175,0156	2	87,5077	0,6893	0,5530	6,9442
Erro	507,7644	4	126,9411			
Total	1228,549	8				

Após análise dos dados apresentados na Tabela 26, observa-se que os valores calculados de F para a inclusão do óleo (2,1) e para os procedimentos de envelhecimento (0,6) são inferiores ao valor crítico de F de 6,94. Portanto, confirma-se a validação da hipótese inicial de que a presença do óleo e as diferentes abordagens de envelhecimento não têm um impacto significativo na estimativa das temperaturas de falha dos ligantes recuperados.

O índice de envelhecimento oferece uma medida objetiva de como à exposição a condições ambientais, como radiação UV, variações de temperatura e presença de umidade afetam as propriedades do ligante ao longo do tempo. A Figura 49 apresenta os valores do “aging index” (AI) obtidos por meio da relação entre os parâmetros $G^*/\sin\delta$ dos ligantes recuperados, quando comparados com o ligante virgem.

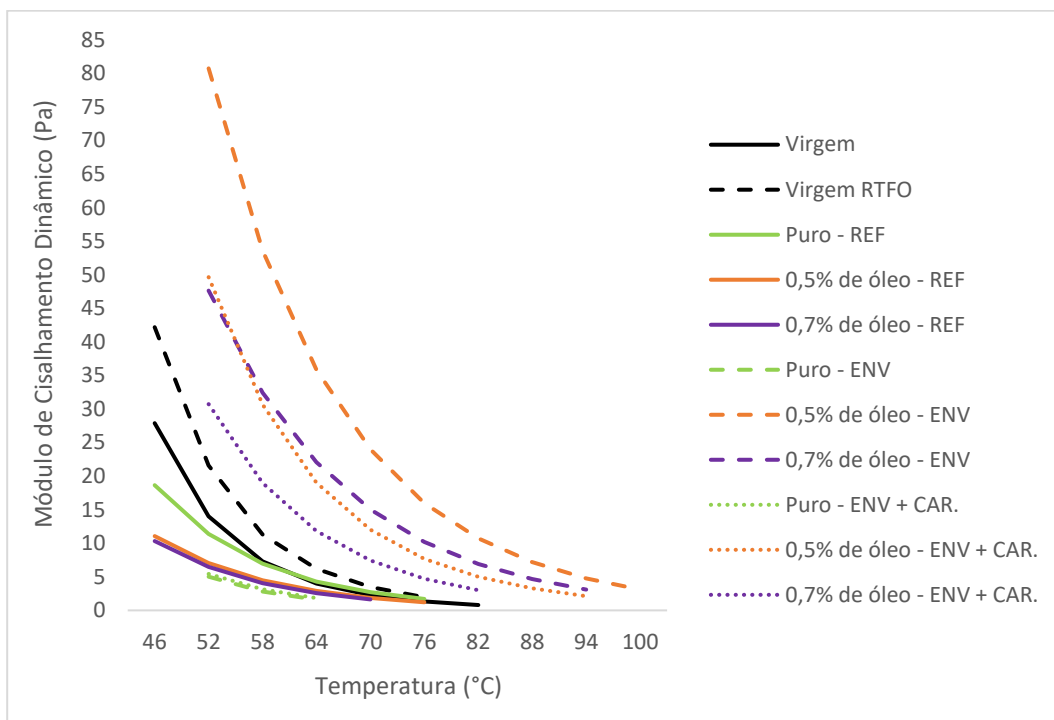
Figura 49 - Índice de Envelhecimento



Todos os ligantes recuperados, com ou sem óleo, apresentam comportamentos similares. Para as amostras de referência o índice de envelhecimento é moderado e aumenta levemente com a temperatura. Enquanto isto, como esperado, quando envelhecidos, o índice de envelhecimento aumenta significativamente, especialmente nas temperaturas mais altas (64°C, 70°C, 76°C). Por fim, quando envelhecidas e sob ação cíclica, os índices aumentam ainda mais, indicando que o envelhecimento combinado com o carregamento resulta em maior degradação. Para os ligantes modificados, este resultado sugere que o óleo de soja residual não é capaz de proteger eficazmente os ligantes contra a degradação severa.

Os ligantes de referência, com 0,5% e 0,7% de óleo de soja residual apresentam índices de envelhecimento relativamente baixos, aumentando com a temperatura. Ambos mostram um comportamento similar ao do ligante puro, mas com ligeiras diferenças que podem indicar um impacto marginal do óleo na resistência ao envelhecimento.

O Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G^*) é um indicador da temperatura do grau de desempenho de ligantes asfálticos. A Figura 50 ilustra o comportamento do G^* do ligante virgem, antes e após RTFO, e dos ligantes recuperados.

Figura 50 - Módulo de Cisalhamento Dinâmico *versus* Temperatura

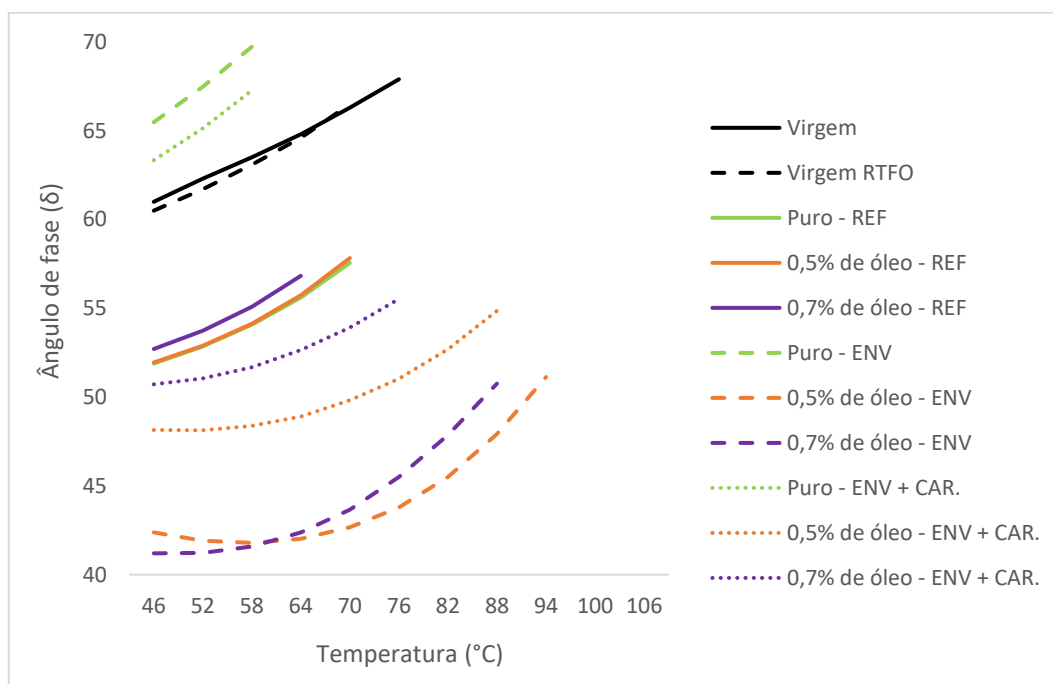
Observa-se que o ligante virgem envelhecido por RTFO tem o maior módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) em baixas temperaturas, mas esse valor diminui significativamente com o aumento da temperatura. Já o ligante virgem não envelhecido tem um G^* menor que o ligante virgem envelhecido, já que nesta condição o ligante é mais flexível, o que é desejável para evitar rachaduras térmicas.

Em relação ao ligante puro de referência, observa-se uma diminuição de G^* com o aumento da temperatura, semelhante ao ligante virgem, mas com valores menores. Após envelhecimento, o ligante puro apresenta um G^* significativamente menor, especialmente em temperaturas mais altas, indicando uma maior susceptibilidade ao cisalhamento dinâmico após envelhecimento.

A adição de óleo de soja residual nas amostras envelhecidas resulta em maiores valores de G^* , especialmente em altas temperaturas, comparado ao ligante puro envelhecido. Todavia, essa rigidez mais elevada não necessariamente está relacionada a melhoria do desempenho do ligante em altas temperaturas.

O ângulo de fase é uma medida da viscoelasticidade do material, onde valores mais baixos indicam comportamento mais elástico e valores mais altos indicam comportamento mais viscoso. O gráfico da Figura 51 apresenta o ângulo de fase (δ) em função da temperatura para os ligantes asfálticos recuperados, além do ligante virgem, antes e após RTFOT.

Figura 51 - Ângulo de Fase versus Temperatura



Observa-se que o ligante virgem tem um ângulo de fase que aumenta ligeiramente com a temperatura, o que indica uma mudança gradual de comportamento mais elástico para mais viscoso. Porém, após o envelhecimento por RTFO, o ângulo de fase é ligeiramente menor do que o não envelhecido, indicando um comportamento um pouco mais elástico devido ao envelhecimento.

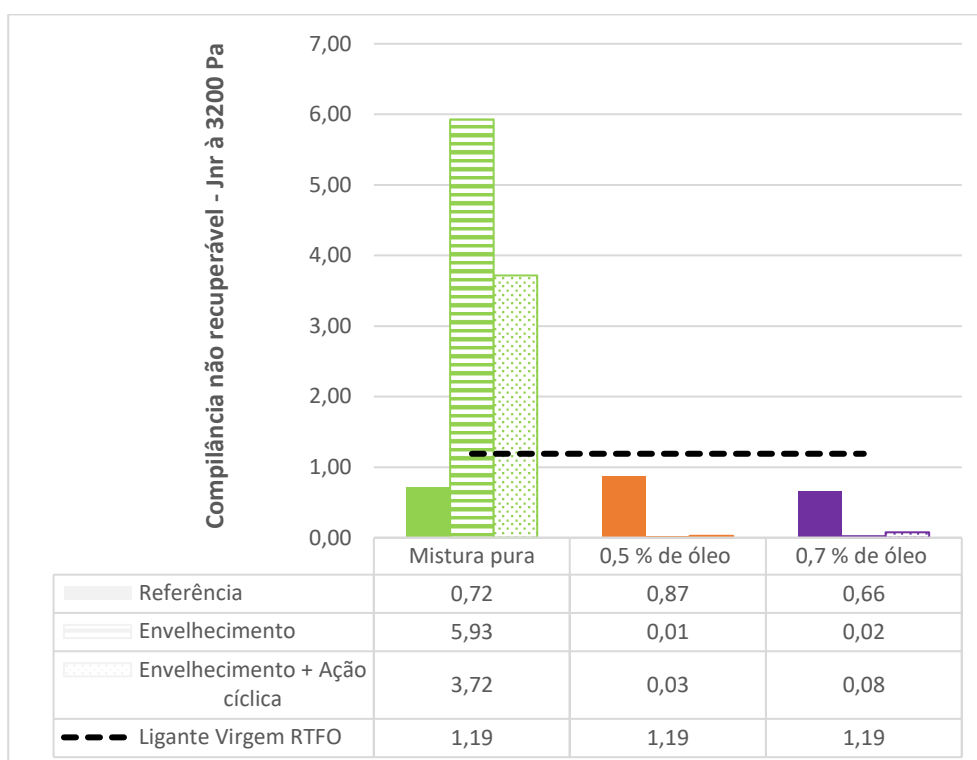
É possível verificar que o ligante puro não envelhecido mostra um aumento gradual no ângulo de fase com a temperatura, similar ao ligante virgem, mas começa a níveis um pouco mais baixos, próximo aos ligantes de referência, com óleo. No entanto, os ligantes puros, recuperados das misturas envelhecidas e envelhecidas e sob ação cíclica, tem ângulos de fase mais altos, especialmente em temperaturas mais altas, o que mostra uma maior tendência para um comportamento viscoso em decorrência do envelhecimento de longo prazo.

Em relação aos ligantes modificados com óleo de soja residual e envelhecidos, estes apresentam ângulos de fase ainda mais baixos, especialmente em temperaturas mais altas, que indica que o envelhecimento combinado com a presença de óleo resulta em um comportamento mais elástico das amostras. Em baixas temperaturas, o desempenho observado é o mesmo, o que é benéfico para resistir às tensões térmicas.

4.2.2 Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR

Os resultados do ensaio de MSCR podem ser empregados para auxiliar na escolha de ligantes com desempenho superior em relação à deformação permanente. Os resultados para o parâmetro de compilância não recuperável (Jnr) estão representados na Figura 52.

Figura 52 - Compilância não recuperáveis, à 3.200 Pa



De acordo com os critérios da AASHTO M320 (2016) valores mais altos de Jnr indicam uma maior susceptibilidade à deformação permanente, enquanto valores mais baixos indicam uma maior resistência. O envelhecimento dos ligantes asfálticos geralmente afeta negativamente suas propriedades reológicas e sua capacidade de resistir à deformação permanente, logo, para ligantes envelhecidos à longo prazo espera-se que haja o aumento ainda maior do Jnr.

Verifica-se que para o ligante virgem RTFO, o Jnr foi de 1,19 para 3200 Pa, já para o ligante recuperado da mistura sem adição de óleo, na condição de referência, o valor encontrado foi de 0,72, indicando baixa suscetibilidade à deformação. Porém, após o envelhecimento, o valor aumenta para 5,93, indicando alta suscetibilidade à deformação após envelhecimento à longo prazo. Isso ocorre porque o envelhecimento

geralmente resulta em oxidação, endurecimento e perda de ductilidade do ligante, tornando-o mais quebradiço e menos capaz de resistir à deformação sob carga.

O resultado para a mistura com 0,5% de óleo foi de 0,87, para a amostra de referência, sendo um valor ligeiramente maior do que a mistura pura, já na condição de envelhecimento, o valor encontrado foi de 0,01, indicando uma grande redução na suscetibilidade à deformação. Para as misturas com 0,7% de óleo, foram encontrados valores de 0,66, para a de referência e, 0,02, para a envelhecida, mostrando uma resistência significativa à deformação, para esta última.

Logo, percebe-se que na condição de referência, a adição de óleo de soja residual (0,5% e 0,7%) aumenta ligeiramente a suscetibilidade à deformação (Jnr mais alto) em comparação com a mistura pura, o que era esperado visto que o óleo tende a diminuir a viscosidade do ligante. Em contrapartida, após o envelhecimento, esses ligantes provenientes das modificações com o óleo mostram uma considerável redução em Jnr, sinalizando uma resistência significativamente maior à deformação permanente. Esses resultados indicam que a adição de óleo de soja residual, pode melhorar significativamente a resistência à deformação permanente dos ligantes asfálticos envelhecidos, tornando-os menos susceptíveis à deformação permanente em altas temperaturas.

Os óleos vegetais têm a capacidade de melhorar a flexibilidade do ligante asfáltico, visto que esses compostos podem interagir com os grupos polares formados durante o envelhecimento, reduzindo a rigidez do ligante e aumentando sua capacidade de deformação sem quebra. Como foi observada a presença de óleo, confirmada pelos espectros de FTIR, tanto nas amostras de referência quanto nas envelhecidas, espera-se comportamentos similares. No entanto, as diferenças observadas entre as misturas de referência e as envelhecidas podem ser atribuídas ao maior tempo de interação do óleo com o ligante asfáltico nas últimas.

A redução na susceptibilidade a deformação permanente não é uma regra para ligantes rejuvenescidos e, esta tendência pode estar relacionada ao tipo de ligante utilizado. Takahashi (2020) ao utilizar ligantes do tipo 30/45 e 50/70 percebeu que a adição de um agente rejuvenescedor à base de óleo de pinho tornou os ligantes mais propensos a deformações permanentes. Logo, é possível inferir que ligantes com comportamento elastomérico, como é o caso do AMP 55/75 utilizado nesta pesquisa, por já apresentar características elásticas, ou seja, de deformar-se sob carga e depois

retornar à sua forma original quando a carga é removida, tem seu desempenho potencializado na presença de agentes rejuvenescedores de base vegetal.

A fim de avaliar o impacto da presença do óleo de soja residual e dos diferentes protocolos de envelhecimento nos valores de Jnr, com o objetivo de entender melhor a sensibilidade dos ligantes asfálticos a diferentes condições de ensaio e aditivos, foi realizada a análise de variância dos resultados. A Tabela 27 apresenta a ANOVA para as compliâncias não recuperáveis (Jnr) dos ligantes asfálticos, à 3200 Pa, para um nível de significância de 5%.

Tabela 27 – ANOVA dos valores de Jnr à 3200 Pa

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do óleo	20,19421	2	10,0971	3,340921	0,140226	6,944272
Protocolos	2,309363	2	1,154681	0,38206	0,704944	6,944272
Erro	12,08901	4	3,022252			
Total	34,59258	8				

De acordo com a ANOVA é possível observar que o valor-P do Jnr à 3200 Pa (0,14023), para a presença do óleo no ligante, é superior à 0,05, logo, não há evidência estatística suficiente para afirmar que a modificação tem um efeito significativo sobre estes valores de Jnr. Em relação aos diferentes protocolos submetidos as misturas, o valor-P do Jnr à 3200 Pa (0,70494), também são superiores à 0,05, dessa forma não é possível afirmar estatisticamente que as condições de envelhecimento aplicadas têm um efeito significativo sobre a susceptibilidade dos ligantes à deformação permanente. Portanto, conclui-se que, com base nos resultados obtidos e com o nível de significância de 5%, a adição de óleo de soja residual e a variação nos protocolos não resultam em diferenças significativas nos valores de Jnr.

A fim de avaliar o volume de tráfego que o pavimento suporta foram feitas as classificações dos ligantes, com base nos valores de Jnr à 3200 Pa e de acordo com a AASHTO M320 (2016). Os resultados podem ser verificados na Tabela 28.

Tabela 28 – Classificação dos ligantes quanto ao tipo de tráfego suportado

Protocolo/Amostra		Jnr à 3200 Pa	Tipo de Tráfego
Ligante Virgem RTFO		1,19	Pesado
Referência	Mistura pura	0,72	Muito Pesado
	0,5% de óleo	0,87	Muito Pesado
	0,7% de óleo	0,66	Muito Pesado
Envelhecido	Mistura pura	5,93	Inadequado
	0,5% de óleo	0,01	Extremamente Pesado
	0,7% de óleo	0,05	Extremamente Pesado
Envelhecimento + Ação cíclica	Mistura pura	3,72	Padrão
	0,5% de óleo	0,03	Extremamente Pesado
	0,7% de óleo	0,08	Extremamente Pesado

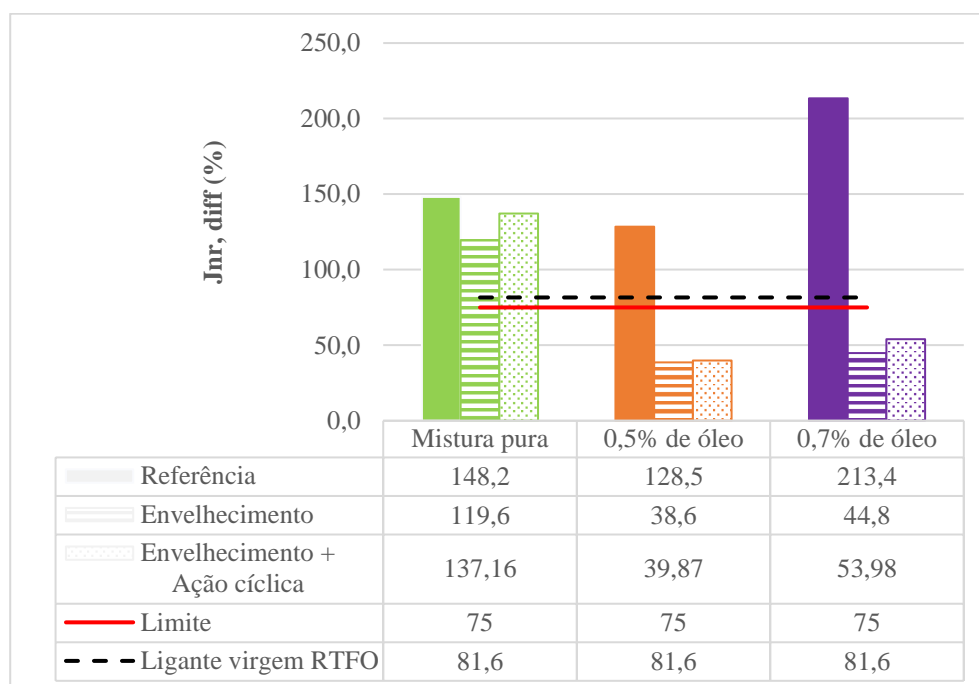
Com base nos critérios da AASHTO M320, os ligantes modificados com óleo de soja residual mostram uma resistência à deformação permanente superior àqueles puros e são classificados como adequados para tráfego extremamente pesado (E), os quais na condição de referência eram classificados em um nível de tráfego inferior, na categoria muito pesado. Em contrapartida, o ligante puro mostra alta suscetibilidade à deformação permanente e uma regressão do tipo de tráfego suportado de muito pesado, na condição de referência, para padrão ao ser envelhecido e carregado.

Santos *et al.* (2021) perceberam a mesma tendência de resultados encontrados nesta pesquisa, ao avaliar o desempenho de agentes de reciclagem à base de soja (SB). Foram determinados níveis de tráfego padrão e muito pesado para ligantes com PG 64–22 a 58 e 64°C, respectivamente. Por sua vez, para o ligante com PG 70–16 os níveis verificados foram de pesado e muito pesado (V) para as mesmas temperaturas, respectivamente. Em termos gerais todos os rejuvenescedores mantiveram o nível de tráfego ou apresentaram melhoria no nível de tráfego atribuído aos ligantes.

Vale ressaltar que para a amostra proveniente da mistura pura de referência o valor de Jnr (5,93) está acima do limite máximo para tráfego padrão (4,0). Este valor não permite que esse ligante seja enquadrado em nenhuma categoria de tráfego especificada na tabela da AASHTO M320.

O Jnr diferencial (Jnr,diff), é outro parâmetro calculado e mede a diferença entre o Jnr à 100 Pa e à 3200 Pa, expressa em porcentagem, e os resultados podem ser observados na Figura 53 - Diferença percentual - Jnr, diff. Os valores de Jnr,diff para os ligantes asfálticos indicam a sensibilidade dos materiais ao aumento dos níveis de tensão e devem permanecer abaixo de 75%, conforme a AASHTO M320 (2016).

Figura 53 - Diferença percentual - Jnr, diff



Ao analisar os resultados das amostras de ligante puro, em todas as condições, percebe-se que os valores de Jnr,diff estão acima do limite de 75%, logo, estes ligantes são muito sensíveis ao aumento dos níveis de tensão. Esse comportamento não é desejado, pois sugere que o material pode não ser adequado para condições de tráfego pesado.

Em paralelo, os ligantes proveniente das misturas modificadas com óleo de soja residual, quando envelhecidas e envelhecidas e sob ação cíclica, apresentaram valores de Jnr,diff abaixo de 75%, indicando baixa sensibilidade ao aumento dos níveis de tensão. Esse comportamento é esperado e desejável para ligantes envelhecidos, mostrando que eles são mais adequados para uso em pavimentação sob tráfego pesado.

Desta forma, deduz-se que o óleo de soja residual atua como um agente plastificante, introduzindo componentes que podem aumentar a flexibilidade e reduzir a rigidez do ligante asfáltico. Isso pode resultar em menor suscetibilidade à formação

de trincas devido à flexibilidade adicional, após o envelhecimento, já que se espera que a maior liberação do óleo ocorra durante esta fase.

A presença de óleo nas amostras foi comprovada pela identificação de picos em torno de 1740 cm^{-1} nos espectros da Figura 44, indicativos de grupos éster (C=O). Geralmente, a presença de óleo vegetal é sugerida pela identificação de bandas características de éster (C=O) e ligações CH alifáticas. Apesar disso, é preciso ressaltar que os espectros indicam também a presença de solvente nas amostras, o que torna os ligantes menos rígidos e, por consequência, tornando-os menos quebradiço e capazes de resistir à deformação sob carga mais elevadas.

A análise de variância da diferença percentual foi realizada a fim de determinar se as variações observadas no Jnr, diff são estatisticamente significativas ou se podem ser atribuídas ao acaso. Isso ajuda a identificar quais fatores (como a adição de óleo de soja residual ou o tipo de protocolo de envelhecimento) têm um impacto real e significativo no desempenho dos ligantes. O resultado da ANOVA pode ser verificado na Tabela 29.

Tabela 29 – ANOVA dos valores de Jnr, diff

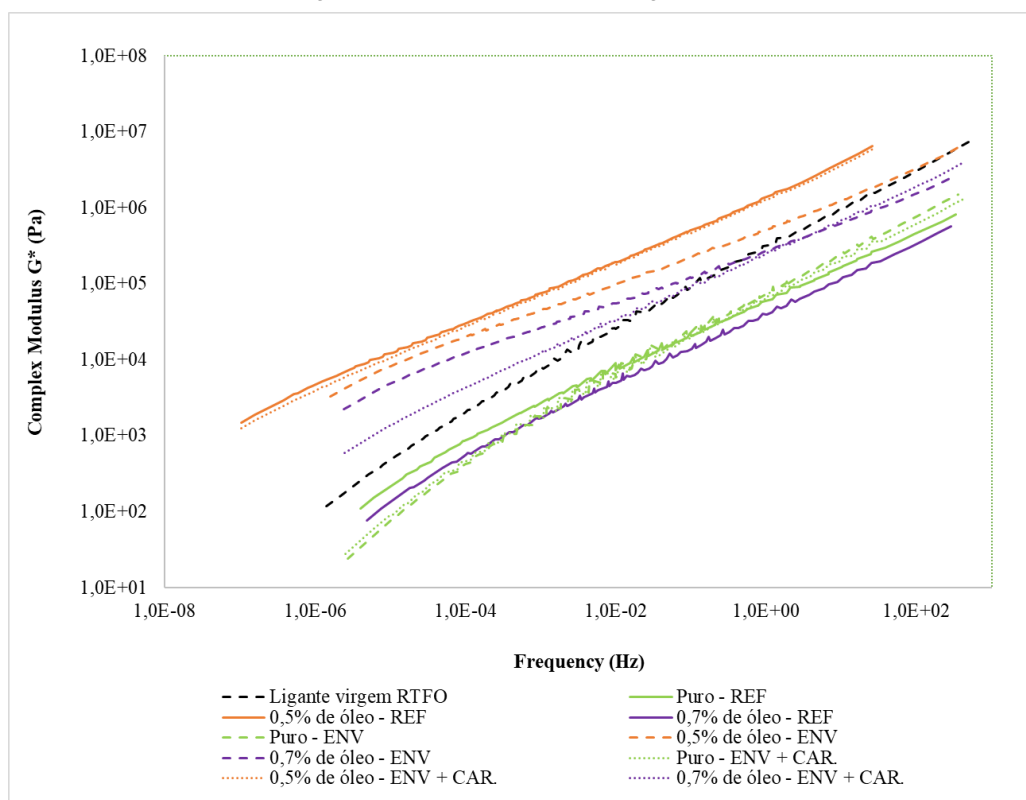
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do óleo	6541,361	2	3270,680	1,866832	0,267515	6,944271
Protocolos	16691,59	2	8345,796	4,763597	0,087438	6,944271
Erro	7007,978	4	1751,994			
Total	30240,93	8				

Ao observar o resultado da Tabela 29, é possível verificar que o valor-P para a presença do óleo no ligante (0,26752) é maior que 0,05, logo, não há evidência estatística suficiente para afirmar que a modificação tem um impacto significativo sobre os valores do Jnr diferencial (Jnr, diff). Em relação aos diferentes protocolos aplicados às misturas, o valor-P (0,08744) também é superior a 0,05, assim, da mesma forma, não é possível afirmar estatisticamente que as condições de envelhecimento aplicadas têm um efeito significativo sobre a sensibilidade dos ligantes ao aumento dos níveis de tensão. Portanto, conclui-se que, com base nos resultados obtidos e com o nível de significância de 5%, a adição de óleo de soja residual e a variação nos protocolos não resultam em diferenças significativas nos valores do Jnr diferencial (Jnr, diff).

4.2.3 Curvas mestras

A curva mestra do módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) no domínio da frequência reduzida é utilizada para entender o comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos em diferentes temperaturas e frequências de carregamento. A Figura 54 apresenta as curvas mestras para os ligantes recuperados, bem como para o ligante envelhecido a curto prazo, em decorrência do RTFOT.

Figura 54 - Curvas mestras dos ligantes



De maneira geral, a adição do APSOSR nas misturas asfálticas aumenta a rigidez dos ligantes contidos nelas, mas essa rigidez é ligeiramente reduzida após envelhecimento, já que com a aplicação do protocolo, acredita-se que ocorra a liberação do óleo, resultando na interação ligante-óleo. Para Marinho Filho (2017) essa região de baixas frequências ($<10^2$ Hz), que corresponde a altas temperaturas, aumentos de rigidez são desejáveis, uma vez que o material apresenta maior fluidez podendo sofrer deformações plásticas.

Na análise das amostras envelhecidas, observa-se que para baixas frequências, a curva mestra referente ao envelhecimento a curto prazo encontra-se abaixo das curvas das amostras recuperadas das misturas modificadas com o óleo

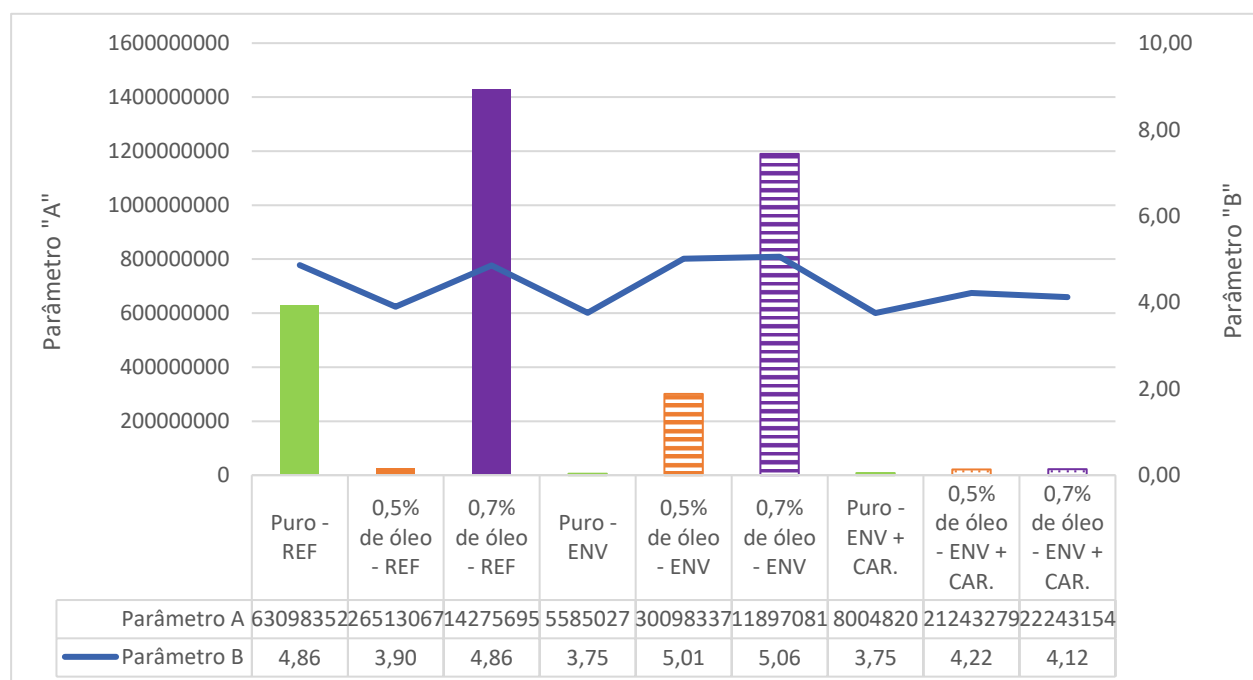
de soja residual, com exceção da mistura com 0,7% de óleo na condição de referência. Logo, esta apresenta menores valores do parâmetro $|G^*|$, indicando uma menor rigidez do ligante.

Este comportamento explica-se pela maior presença de óleo nesta amostra, conforme observado no espectro da Figura 44, que apresenta um pico de intensidade em torno de 1740 cm^{-1} , característica de grupos éster ($\text{C}=\text{O}$) e já observado em ensaios como o de PG, no qual o ligante em questão apresentou uma temperatura de 64° , inferior as temperaturas encontradas para as demais amostras na mesma condição. Ao analisar os espectros FTIR de amostras de ligante asfáltico, a presença de picos característicos de éster ($\text{C}=\text{O}$) e ligações CH alifáticas geralmente indicam a presença de óleo vegetal. No entanto, não é possível descartar a possibilidade de haver influência da presença do percloroetileno na rigidez da amostra.

4.2.4 Varredura linear de amplitude de deformação – LAS

A análise da resistência à fadiga dos ligantes asfálticos foi conduzida a partir do ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS) a 19°C . O critério de falha adotado para identificar o início do dano foi baseado na abordagem energética, usando a energia de pseudo-deformação ou pseudo energia máxima (PSE). A Figura 55 apresenta a variabilidade dos parâmetros A e B na resistência ao dano.

Figura 55 - Parâmetros "A" e "B" para os ligantes



O parâmetro 'A' é um coeficiente que reflete a resistência à fadiga do ligante asfáltico. Logo, valores maiores significam que a amostra manteve sua integridade inicial, mesmo diante do acúmulo de danos. Dito isto, percebe-se que as amostras com 0,7% de óleo, em relação a massa da mistura, nas condições de referência e envelhecida, foram as que apresentaram melhores desempenhos. O resultado da amostra de referência, contendo 0,7% de óleo, segue a tendência das propriedades reológicas anteriores, nas quais observou-se que a maior presença de óleo, comprovada pelos espectros de FTIR, resultou numa maior interferência nas propriedades reológicas do ligante.

A análise do parâmetro "B" está associada à inclinação da curva de frequência versus módulo de armazenamento (G'). Valores mais altos de "B" indicam uma maior taxa de decréscimo na vida de fadiga do material com o aumento da amplitude de deformação, enquanto valores mais baixos sugerem um decréscimo gradual (KODRAT *et al.*, 2007). Verificou-se que as amostras modificadas com 0,7% de óleo em relação à massa da mistura, tanto nas condições de referência quanto após o envelhecimento, não demonstraram aumento significativo na sensibilidade frente às variações na deformação, apresentando valores de "B" próximos aos dos demais ligantes recuperados.

O envelhecimento geralmente reduz a resistência ao dano do ligante, conforme indicado pela diminuição dos valores de "A" para o ligante recuperado das misturas puras. Por outro lado, o parâmetro "B" mostra que a sensibilidade à deformação não variou muito com a modificação e envelhecimento dos ligantes.

A ANOVA permite determinar se as distinções observadas nos parâmetros "A" e "B" entre os diferentes ligantes recuperados são estatisticamente significativas ou se podem ser atribuídas ao acaso. Esta análise de variância auxilia na validação da eficácia do óleo de soja residual no rejuvenescimento dos ligantes envelhecidos, com um nível de significância de 5%, e os resultados podem ser observados nas Tabela 30 e Tabela 31.

Tabela 30 – ANOVA para o parâmetro "A" dos ligantes recuperados

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do óleo	1,035E+18	2	5,175E+17	2,90525	0,166240	6,944271
Protocolos	7,299E+17	2	3,649E+17	2,04896	0,243990	6,944271
Erro	7,125E+17	4	1,781E+17			
Total	2,477E+18	8				

Tabela 31 – ANOVA para o parâmetro “B” dos ligantes recuperados

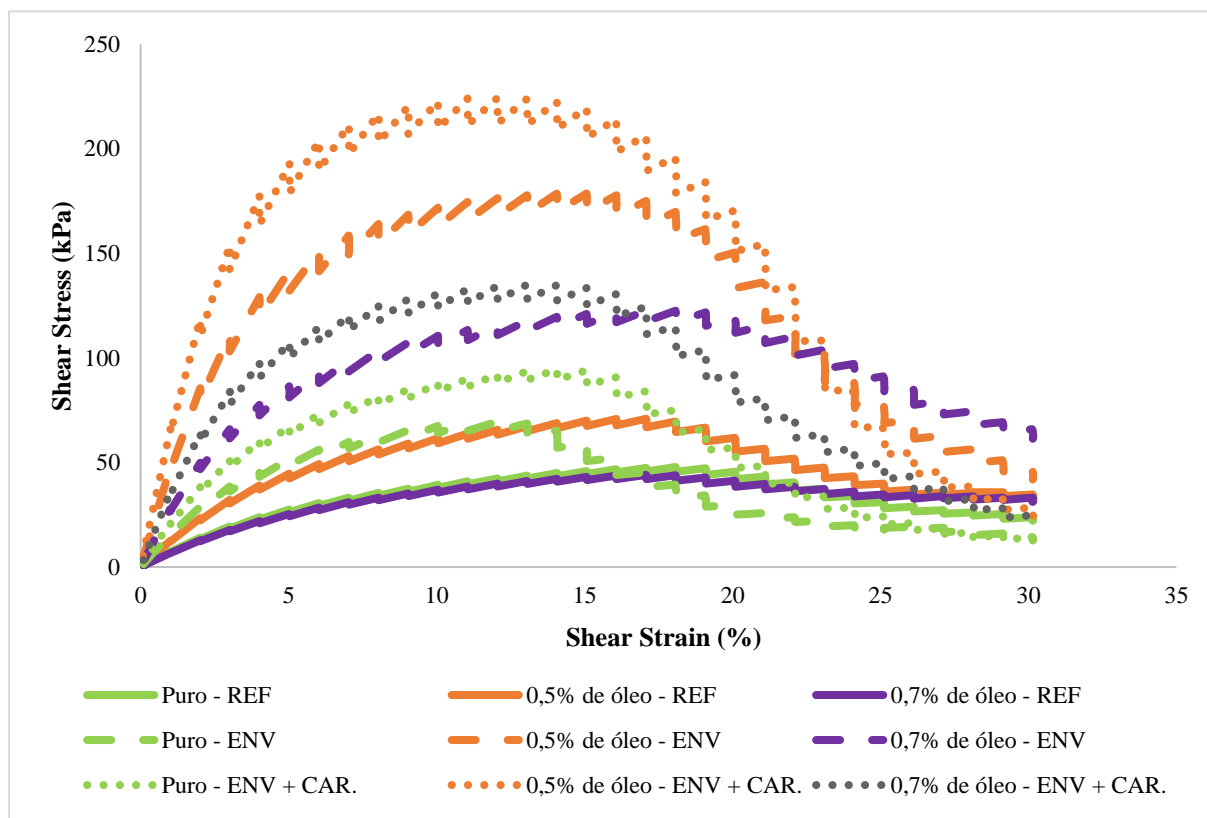
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do óleo	0,459892	2	0,229946	0,672416	0,560082	6,944272
Protocolos	0,600358	2	0,300179	0,877794	0,482993	6,944272
Erro	1,367878	4	0,34197			
Total	2,428128	8				

A ANOVA para o parâmetro “A” mostra que o valor-P (0,166240) é superior ao nível de significância de 0,05, indicando que não há evidências estatísticas suficientes para concluir que a presença do óleo tem um efeito significativo na variação do parâmetro. Além disso, em relação as condições submetidas as misturas asfálticas, o valor-P (0,243990) também é superior a 0,05, sugerindo que os diferentes protocolos de envelhecimento não têm um efeito significativo sobre o parâmetro “A”.

Quanto ao parâmetro “B”, a ANOVA revela um valor-P (0,560082) superior a 0,05, que indica que a presença do óleo não tem um efeito significativo sobre o parâmetro. Da mesma forma, relativo aos protocolos aplicados, o valor-P (0,482993) é superior a 0,05, o que mostra que os diferentes protocolos de envelhecimento não influenciam significativamente neste.

Assim, conclui-se que não há evidência estatística suficiente para afirmar que a presença do óleo ou os diferentes protocolos de envelhecimento têm um efeito significativo sobre a resistência ao dano (parâmetro A) ou a sensibilidade à variação do nível de deformações (parâmetro B) dos ligantes recuperados. A variabilidade observada nos dados não pode ser atribuída de forma conclusiva aos fatores estudados, sugerindo que outros fatores podem estar influenciando os resultados ou que os efeitos dos fatores são menores do que a variabilidade experimental.

A Figura 56 apresenta o gráfico de tensão *versus* deformação obtida no ensaio LAS sob deformação controlada para os ligantes recuperados. A área total sob a curva até o ponto de falha pode ser usada como uma medida da energia de deformação absorvida pelo material, representando a tenacidade do ligante.

Figura 56 – Curvas de tensão *versus* deformação dos ligantes recuperados

As curvas da Figura 56 demonstraram que, de uma maneira geral, a adição do óleo provoca um aumento na tensão cisalhante suportada pelas amostras envelhecidas e envelhecidas/carregadas. O ligante puro e o ligante recuperado da mistura com 0,7%, submetidos apenas ao envelhecimento de curto prazo, apresentaram resultados semelhantes, onde as maiores tensões de cisalhamento são alcançadas para um nível de deformação de aproximadamente 17%. Já o ligante recuperado da mistura com 0,5%, na mesma condição, apresenta uma curva deslocada para cima, o que sugere que a máxima resistência do ligante antes de começar a falhar é superior.

Em ligantes envelhecidos, geralmente, o pico de tensão ocorre em níveis de deformação mais baixos em comparação aos ligantes não envelhecidos. Para o ligante puro este comportamento foi realmente observado, com um decaimento do nível de deformação de 17% para 12%, com o envelhecimento. Em contrapartida, os ligantes modificados com óleo apresentaram capacidade de manutenção de nível de deformação, para o teor de 0,5%, e até do aumento deste nível, para o teor de 0,7%, partindo de 17%, para 20% com envelhecimento.

Ainda é possível observar a ação do óleo após o envelhecimento com o aumento dos picos de tensão das curvas, que representam a máxima resistência do ligante antes de começar a falhar. Esses resultados estão em concordância com os estudos de Marinho Filho (2023), que ao expor amostras de ligantes modificados com nanofibrilas de celulose ao envelhecimento de longo prazo, observou que as amostras suportaram uma tensão de cisalhamento maior e um número maior de ciclos até a falha, demonstrando, assim, uma resistência aumentada à fadiga.

Teymourpour e Bahia (2014) propuseram calcular o número de ciclos até a falha (Nf) em diferentes níveis de deformação, como uma forma de estabelecer a relação entre a vida de fadiga dos ligantes e os parâmetros de campo. Com base no princípio de dano viscoelástico (VECD) foi possível desenvolver um modelo de fadiga para cada ligante recuperado, apresentado no gráfico da Figura 57. Além disso, a

Tabela 32 apresenta um resumo destes resultados, na qual é possível analisar melhor a estimativa de fadiga dos ligantes nos níveis de deformação: 1, 2,5, 5 e 10%.

Figura 57 – Estimativa da vida de fadiga dos ligantes recuperados

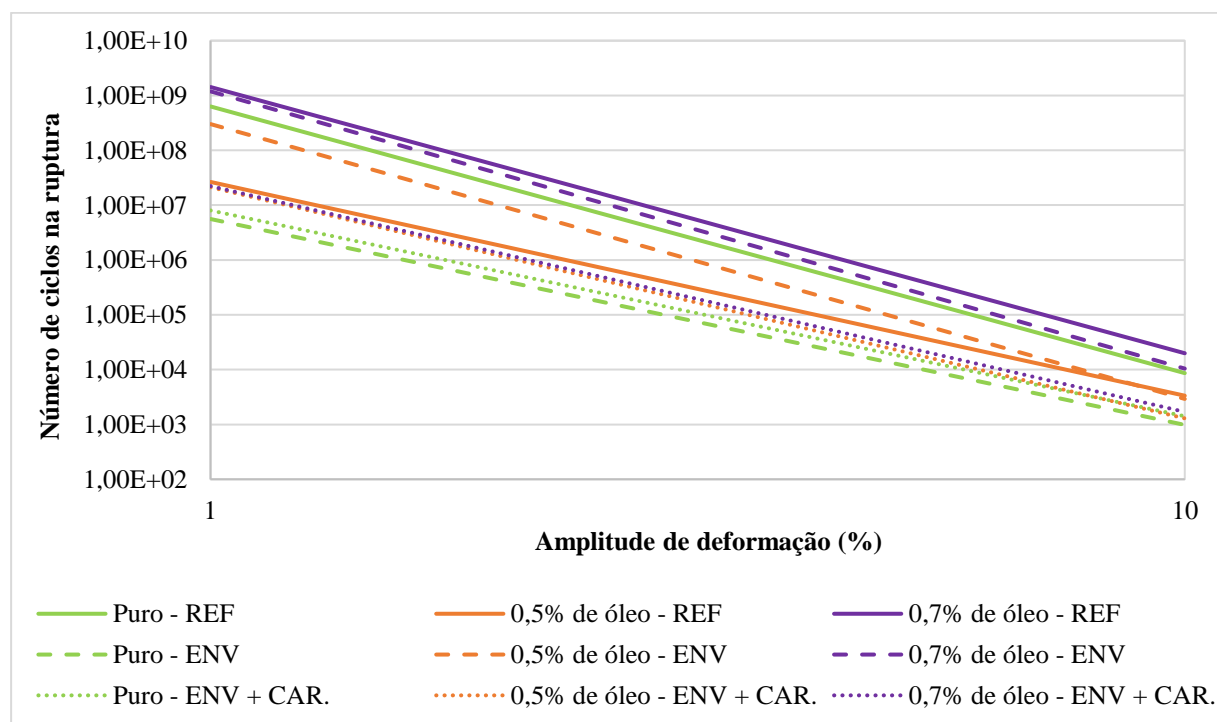


Tabela 32 - Valores estimados para vida de fadiga dos ligantes recuperados

Protocolo	Amostra	Amplitude de deformação			
		1,0 %	2,5 %	5,0 %	10,0 %
		Número de ciclos até a falha (Nf)			
Referência	Mistura pura	630983527	7319182	251345	8631
	0,5% de óleo	26513067	744613	49917	3346
	0,7% de óleo	1427569519	16682407	576104	19895
Envelhecimento	Mistura pura	5585027	178980	13258	982
	0,5% de óleo	300983374	3045704	94328	2921
	0,7% de óleo	1189708164	11566760	347552	10443
Envelhecimento + Ação cíclica	Mistura pura	8004820	256927	19054	1413
	0,5% de óleo	21243279	446205	24011	1292
	0,7% de óleo	22243154	510839	29410	1693

Níveis baixos de deformação, em torno de 3%, indicam pavimentos com baixos índices deflectométricos, apresentando um comportamento similar ao de pavimentos rígidos. Por outro lado, altos níveis de deformação (> 2,0mm) indicam pavimentos com elevados índices deflectométricos, cujo comportamento se assemelha ao de pavimentos flexíveis (NASCIMENTO, 2015). Além disso, o número de ciclos até a falha (Nf) representa as condições que o material pode ser submetido, e está relacionado ao volume de tráfego suportado em função das deformações aplicadas, que são um indicador da estrutura do pavimento, ou das deformações admissíveis no pavimento (NUÑEZ *et al.*, 2014).

Para 1% de nível de deformação o ligante oriundo da mistura de referência, com 0,7% de óleo, apresentou maior número de ciclos até a falha, seguido pela amostra de mesmo teor, porém, na condição de envelhecimento. Como este nível de deformação coincide com os valores encontrados do parâmetro A, este padrão de comportamento já era esperado.

Pamplona (2013) destaca que a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos é dependente do nível de tensão, para níveis de tensão mais baixos, quanto mais rígido o ligante for, maior será sua vida de fadiga. No entanto, esse comportamento não foi verificado com a adição do óleo, visto que este foi capaz de diminuir a rigidez do ligante, e ainda assim, nota-se um aumento da vida de fadiga do material. O mesmo comportamento é observado para os níveis mais altos de tensões.

No entanto, é preciso se atentar ao fato de que a redução da rigidez dos ligantes recuperados, já observado nos demais ensaios reológicos, pode estar associada à presença do solvente nas amostras, como foi observado na análise dos espectros da Figura 44. Em geral, os solventes orgânicos exibem bandas de estiramento de C-H em torno de 2850-2960 cm^{-1} , logo, foi possível observar a presença desse pico característico também nos ligantes recuperados, além de picos em 930, 845 e 780 cm^{-1} referente as vibrações nas ligações C-Cl e C-H.

A Tabela 33 apresenta os valores de *Fatigue Failure Limit* (FFL) dos ligantes recuperados, bem como a classificação com base na proposta de Nascimento (2021). O parâmetro de FFL propõe uma classificação dos ligantes com base no desempenho em resistência à fadiga.

Tabela 33 - FFL dos ligantes recuperados

Protocolo/Amostra		FFL (19°)	Classificação
Referência	Mistura pura	2,287	EXCELENTE
	0,5% de óleo	1,944	EXCELENTE
	0,7% de óleo	2,394	EXCELENTE
Envelhecimento	Mistura pura	1,751	EXCELENTE
	0,5% de óleo	2,179	EXCELENTE
	0,7% de óleo	2,355	EXCELENTE
Envelhecimento + Ação cíclica	Mistura pura	1,799	EXCELENTE
	0,5% de óleo	1,892	EXCELENTE
	0,7% de óleo	1,905	EXCELENTE

Observa-se que todos os ligantes recuperados apresentaram desempenho de vida de fadiga excelentes, com FFL superiores à 1,57. Desta forma, percebe-se que a adição do óleo não provoca redução no desempenho dos ligantes perante à fadiga, e além disso, na condição de envelhecimento os valores do índice são superiores ao da amostra de ligante puro.

Vale destacar que esse comportamento observado quanto a fadiga foi obtido para pequenas deformações, já que o FFL é calculado em função de 1,25% e 2,5% de deformação. Assim, os resultados convergem para as conclusões de Chen & Bahia (2021) que observaram que o endurecimento devido ao envelhecimento pode melhorar a vida de fadiga apenas se os ligantes forem submetidos a deformações

muito pequenas, onde o limite dessa pequena tensão é altamente dependente da composição do ligante.

4.3 Caracterização volumétrica e funcional das misturas

4.3.1 Escorrimento

O ensaio de escorrimento foi realizado apenas nas misturas de referência, ou seja, naquelas misturas que não foram submetidas aos protocolos de envelhecimento ou envelhecimento e sob ação cíclica. Isto porque, a finalidade era quantificar o efeito da liberação do óleo durante a fase de usinagem, além da própria metodologia do ensaio não permitir que fosse realizado nas misturas envelhecidas. Na Figura 58 são apresentados os resultados deste ensaio.

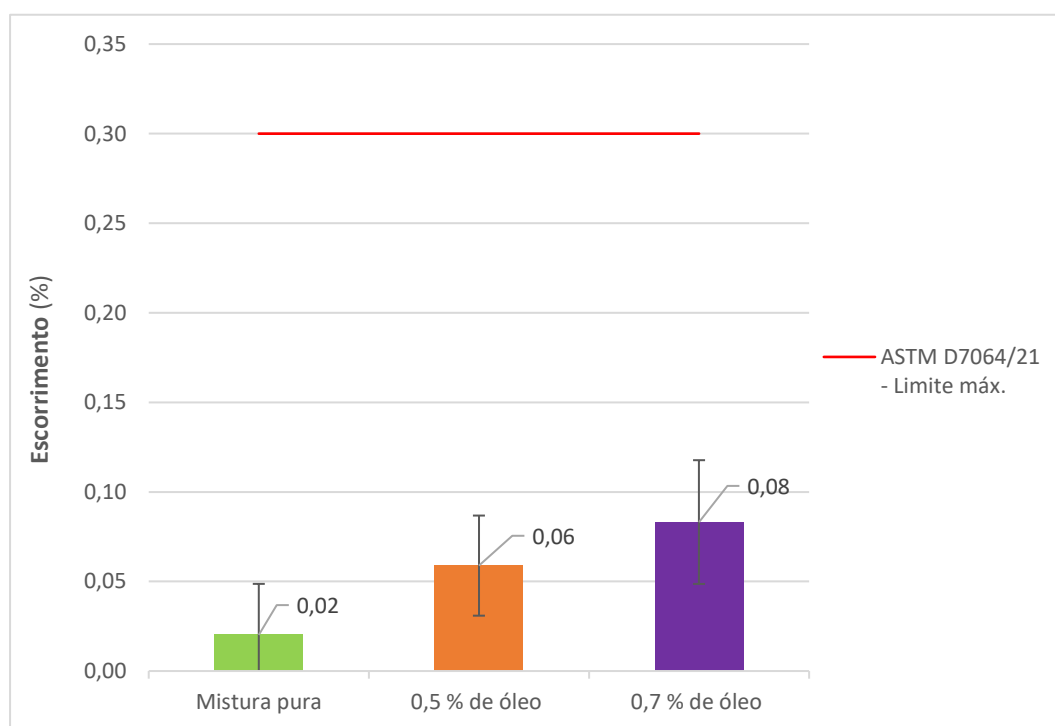


Figura 58 – Resultado do ensaio de escorrimento

Um problema frequente em pavimentos drenantes é o acúmulo de ligante asfáltico na porção inferior do revestimento, daí a importância da realização do ensaio de escorrimento. Tanto a norma americana, como a brasileira preveem um escorrimento máximo de 0,3%, em relação à massa total da amostra, logo, observa-se que todas as misturas apresentaram um escorrimento abaixo deste limite.

No entanto, é possível notar que a adição da vermiculita saturada na mistura provocou um aumento progressivo na porcentagem de escorrimento. Este resultado é esperado, tendo em vista a capacidade do óleo em reduzir a viscosidade do ligante. Resultado este já comprovado por Portugal *et al.* (2017) ao verificarem que a utilização de óleo de soja e óleo de milho (novo e residual) contribuiu de forma positiva para a diminuição da viscosidade do ligante. Este fato traz um bom indicativo da utilização do óleo na mitigação dos efeitos decorrentes da oxidação do ligante envelhecido, já que permite reduzir a rigidez do ligante.

A fim de verificar se o acréscimo de escorrimento decorrente da adição do APSOSR foi realmente significativo, foi feita a análise de variância para os resultados de escorrimento das misturas. Esta análise foi realizada utilizando os resultados obtidos no ensaio, com nível do coeficiente de determinação de 5% e, os resultados podem ser observados na Tabela 34.

Tabela 34 – ANOVA para o ensaio de escorrimento

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	0,004039	2	0,002019591	2,174298	0,260841	9,552094
Dentro dos grupos	0,002787	3	0,000928847			
Total	0,006826	5				

Com base nos resultados estatísticos verifica-se que não houve diferença significativa entre os valores de escorrimento das misturas, com e sem adição do APSOSR, visto que o valor de F calculado é inferior ao valor de F crítico, e o valor-P foi superior ao nível de significância de 5%. Logo, a hipótese inicial é aceita, ou seja, os dados não apresentam significância para o modelo.

Shirini e Imaninasab (2016) ao estudaram o desempenho de misturas porosas contendo ligante modificado por borracha em diferentes teores, verificaram que as misturas modificadas apresentaram menores escorrimientos e que estes, tendem a diminuir com o aumento do teor do aditivo. Logo, concluíram que os resultados podem ser atribuídos à alta viscosidade que a borracha proporciona ao ligante. Este apontamento está de acordo com o resultado encontrado nessa pesquisa, já que o óleo promove o efeito contrário ao da borracha, reduzindo a viscosidade do ligante.

Abohamer *et al.* (2023) avaliaram a eficácia de aditivos de mistura asfáltica mornas, subproduto à base de borracha moída, cimento Portland e cinzas volantes na

melhoria do desempenho de misturas porosas, do tipo OGFC. Os resultados mostraram que os escorrimentos das amostras modificadas foram consideravelmente inferiores ao da mistura de referência. A queda nos valores de escorrimento das misturas mornas pode ser atribuída à redução na temperatura de mistura. Já em relação ao subproduto da borracha, a redução se deu por conta do aumento da viscosidade do ligante asfáltico. Quanto aos materiais de enchimento, as características pozolânicas foram as responsáveis pela redução no teor de escorrimento, já que possuem a capacidade de melhorar as propriedades de adesão entre o agregado e o ligante. Logo, percebe-se os diversos fatores capazes de influir nessa propriedade, como viscosidade do ligante, temperatura de usinagem e adesão agregado/ligante.

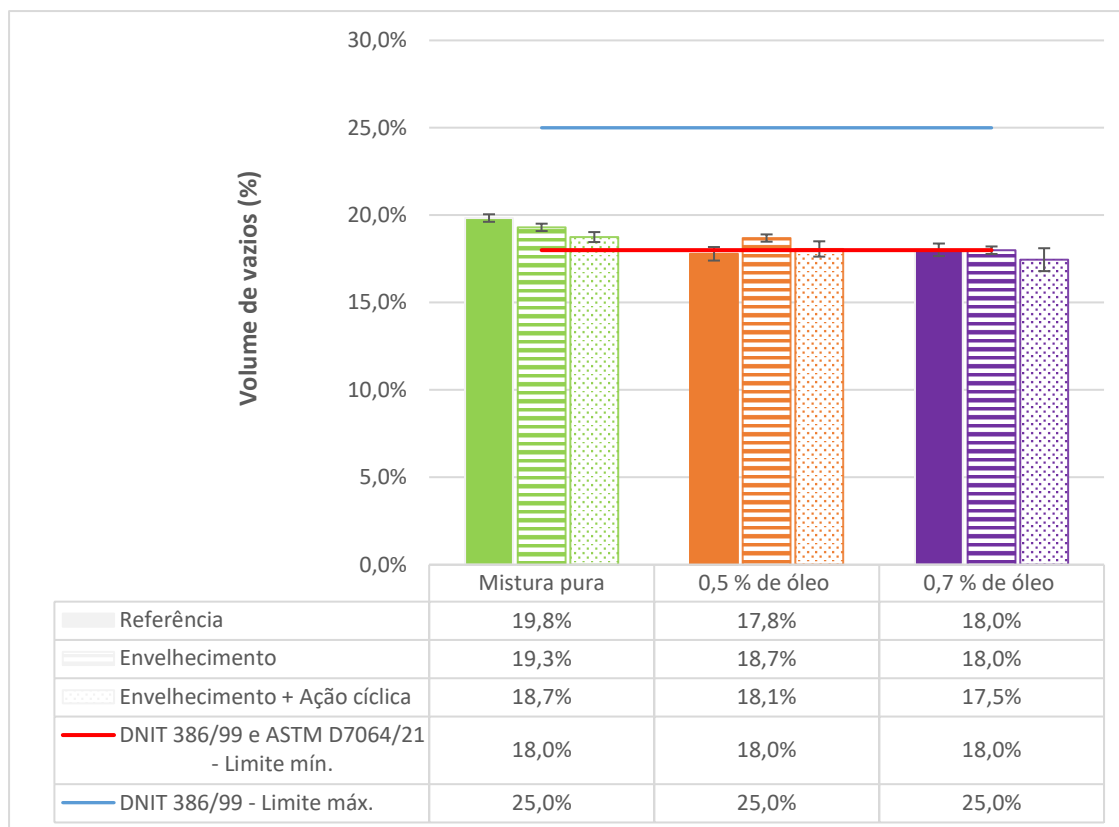
Outra conclusão que se chega ao analisar os resultados é acerca da difusão do óleo na mistura. Percebe-se que o óleo começa a ser liberado dos poros da vermiculita desde o processo de mistura, já que após uma hora de ensaio, o valor de escorrimento teve um aumento de 200% ao comparar a mistura pura e a mistura com 0,5% de óleo, em relação a massa da mistura asfáltica. Já quando a comparação é feita entre a mistura pura e a mistura com 0,7% de óleo, este acréscimo foi de 300%.

Este resultado corrobora com os espectros da Figura 43, que são provenientes das amostras retiradas diretamente dos corpos de prova, em que foi possível observar a presença do óleo, com destaque para a amostra com 0,5% de óleo. Observou-se um pico representativo dos grupos carbonila, presentes nos ésteres dos bio-óleos, em torno de 1750 cm^{-1} , além disso, picos adicionais na região de $2920\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$ também sugerem a presença de cadeias alifáticas do óleo de soja. A retirada superficial e aleatória de amostras para análise por FTIR pode explicar a identificação mais evidente de óleo na amostra com 0,5% em comparação com a amostra que continha 0,7%.

4.3.2 Volume de vazios

Devido à funcionalidade da CPA, o volume de vazio se torna um dos parâmetros mais significativos na análise deste tipo de revestimento. Na Figura 59 estão apresentados os resultados da avaliação volumétrica das misturas.

Figura 59 - Resultado do ensaio de volume de vazios



De maneira geral, todas as misturas apresentaram volumes de vazios próximos do limite mínimo de 18%, estabelecido pelas normas ASTM D7064/21 e DNIT 386/99, com exceção da mistura sem cápsulas, que apresentou volume de vazios de aproximadamente 20%. Estes valores tão próximos ao limite mínimo se devem principalmente ao número de giros utilizado nesta pesquisa, que foi 100, em contraponto aos 50 giros recomendados pela norma americana.

Ao se comparar a variação no número de giros em função do tipo de ligante, este parece ter influência no total de vazios da mistura, onde percebe-se que ligantes com maiores temperaturas de ponto de amolecimento tendem a manter o VV mesmo com o aumento da energia de compactação. Como descrito no tópico 3.2.5.3, ao utilizar 4,5% de AMP 60/85, a mistura manteve 20% de volume de vazios para as amostras compactadas com 50 e 100 giros. Já no tópico 3.2.5.4, percebe-se que na utilização de 4,5% de AMP 55/75 este comportamento não é o mesmo, visto que o houve uma redução no volume de vazios de 22% para 19,5% quando alterado o número de giros de 50 para 100.

Na Tabela 35 são apresentadas as análises de variância para a variação volumétrica observada em decorrência da presença de APSOSR e dos protocolos de envelhecimento aplicados nas misturas estudadas. Esta análise foi realizada utilizando os resultados obtidos no ensaio de volume de vazios, com nível do coeficiente de determinação de 5%.

Tabela 35 - ANOVA para o ensaio de volume de vazios

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	0,000354	2	0,000177	10,5698	0,025316	6,944272
Protocolos	5,53E-05	2	2,76E-05	1,650474	0,300166	6,944272
Erro	6,7E-05	4	1,67E-05			
Total	0,000476	8				

Ao observar a Tabela 35, quando a fonte de variação se refere aos protocolos de envelhecimento, o F calculado foi de 1,65, valor inferior ao F crítico que é de 6,94, para um nível de significância de 5%. Logo, a hipótese inicial é aceita, então o volume de vazios não sofre influência significativa ao se aplicar os diferentes protocolos às misturas.

No entanto, quando a análise estatística é feita em decorrência da presença de APSOSR, verificou-se diferenças significativas entre o volume de vazios das misturas estudadas, já que o F calculado foi de 10,57, valor superior ao F crítico que é de 6,94. Desta forma, a hipótese inicial é rejeitada, ou seja, os dados apresentaram significância para o modelo quando a fonte da variação é a presença do APSOSR.

Como a ANOVA revelou diferenças significativas entre as misturas, puras e com adição do APSOSR, foi realizado o teste de Tukey, que faz comparações múltiplas, a fim de identificar quais misturas diferem entre si. Na Tabela 36 é possível verificar se existe diferença significativa no volume de vazios, ao se comparar pares das misturas, para cada protocolo de análise.

Tabela 36 – Resultado das comparações múltiplas entre os VVs das misturas

Test Tukey para presença de APSOSR			
Misturas	Referência	Envelhecimento	Envelhecimento + Ação cíclica
Pura - 0,5%	Sim	Não	Não
Pura - 0,7%	Sim	Sim	Sim
0,5% - 0,7%	Não	Não	Não

Ao considerar as misturas de referência, nota-se uma redução do volume de vazios próxima à 2% quando comparadas as misturas com adição de APSOSR daquela sem. O comportamento é previsível, visto que a vermiculita saturada possui granulometria capaz de preencher os vazios da mistura. Esta previsão foi confirmada com o teste de comparação múltipla, pois ao observar a Tabela 36, nota-se que houve diferença significativa entre a mistura pura e as misturas com os dois teores de APSOSR. No entanto, entre as misturas com os teores de 0,5% e 0,7% de óleo, não se observou variação volumétrica significativa.

Em relação as misturas envelhecidas e envelhecidas e sob ação cíclica, a redução do volume de vazios foi mais discreta. Este comportamento pode ser verificado ao perceber que em se tratando das duas condições, não foram determinadas diferenças significativas entre a mistura pura e aquela com 0,5% de óleo. Porém, ao aumentar a adição do APSOSR em 0,2% de óleo, já é possível perceber uma variação volumétrica expressiva.

Na comparação das amostras submetidas ao envelhecimento com aquelas submetidas ao protocolo combinado de envelhecimento e carregamento nota-se que houve pouca variabilidade no volume de vazios das misturas, confirmada pelo mesmo resultado de comparações múltiplas, para as duas condições. Além disso, as misturas com adição do APSOSR apresentaram uma variação do volume de vazios semelhante a mistura pura, o que pode indicar que a aplicação do carregamento não contribuiu significativamente na liberação do óleo, além do que já havia sido liberado durante o processo de envelhecimento.

Este comportamento confirma a tendência observada nos resultados do FTIR da Figura 43, que são provenientes das amostras retiradas diretamente dos corpos de prova. Os espectros demonstraram comportamentos semelhantes, com a sobreposição das curvas relativas as amostras envelhecidas e envelhecidas e sob ação cíclica, inclusive nas faixas relativas à presença do óleo, em torno de 1750 cm^{-1} e na região de $2920\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$, o que demonstra que não houve variação significativa na quantidade de óleo liberado em decorrência do carregamento aplicado.

Casado *et al.* (2021) ao analisarem o volume de vazios de misturas modificadas com agregados porosos contendo rejuvenescedor asfáltico comercial notaram uma tendência de aumento neste parâmetro. Foram observados um leve decréscimo nas densidades e aumento no teor de vazios de ar das misturas asfálticas modificadas

com vermiculita e sepiolita, devido à baixa densidade dos agregados porosos. Este comportamento foi distinto do encontrado nesta pesquisa, como pode ser observado na Tabela 37 as densidades das misturas de referência.

Tabela 37 – GMB e GMM das misturas de referência

Mistura	Densidade aparente da mistura compactada (GMB)	Densidade máxima medida da mistura (GMM)
Pura	2,026	2,528
0,5 % de óleo	2,054	2,498
0,7 % de óleo	2,048	2,498

Nota-se que a adição da vermiculita saturada promoveu uma redução na densidade máxima medida da mistura solta, no entanto, as medidas de densidades aparentes das misturas compactadas sofreram um aumento. Casado *et al.* (2021) também analisaram o uso da vermiculita, como agente carreador de um rejuvenescedor, em uma mistura do tipo BBTM 11B (*Béton Bitumineux Très Mince*), que é uma mistura asfáltica com distribuição granulométrica descontínua. No entanto, o volume de vazios encontrado pelos autores apresentou tendência ao aumento com a adição do agregado poroso. Este comportamento contrário ao encontrado nesta pesquisa pode ser atribuído as diferenças existentes entre os esqueletos pétreos das misturas, além do fato de que os autores não fizeram a seleção de uma faixa granulométrica da vermiculita, como foi feito nesta pesquisa. O material por eles utilizados apresentava uma granulação mais variada, tendo uma proporção significativa de partículas mais finas, com tamanho de partícula menor que 2 mm.

Abohamer *et al.* (2023) concluíram que aditivos que reduzem a viscosidade do ligante permitem que a mistura seja compactada até uma densidade mais elevada, com o mesmo esforço de compactação. Este apontamento corrobora para o fato de que o aumento da densidade ocorreu em decorrência do óleo e, mais uma vez, confirma a capacidade deste em reduzir a viscosidade do ligante. Vale salientar que, parte do óleo começa a ser liberado durante a usinagem da mistura.

Se consideradas as misturas isoladamente, ao comparar a amostra de referência com sua respectiva submetida ao protocolo de envelhecimento, percebe-se que houve uma ligeira redução no volume de vazios para a amostra sem o APSOSR. Para as misturas com 0,5% de óleo residual, o comportamento foi o oposto,

já que houve um pequeno aumento no volume de vazios, na ordem de 0,9%. Em se tratando da mistura com 0,7% de óleo, não ocorreu distinção no volume de vazios, antes e após o envelhecimento.

A variação no volume de vazios, após as amostras serem submetidas ao protocolo de envelhecimento, pode estar relacionada ao ganho de massa verificado mesmo após sete dias da aplicação da chuva simulada. Na Tabela 38 estão apresentadas as médias das massas de sete corpos de prova, antes e após sete dias da aplicação da simulação de chuva, bem como os respectivos aumentos de massa.

Tabela 38 – Aumento de massa médio das amostras submetidas ao simulador de chuva

Mistura	Massa antes da chuva simulada (g)	Massa após 7 dias da chuva simulada (g)	Aumento de massa (g)
Pura	1012,6	1016,3	3,8
0,5 % de óleo	1018,1	1020,2	2,1
0,7 % de óleo	1022,7	1023,8	1,1

Percebe-se que mesmo após o período destinado à completa drenagem das amostras, estas apresentaram massas ligeiramente superiores as aferidas antes do simulador de chuva. Provavelmente, este aumento de massa seja em decorrência de uma pequena quantidade de água presente no interior dos vazios dos corpos de prova.

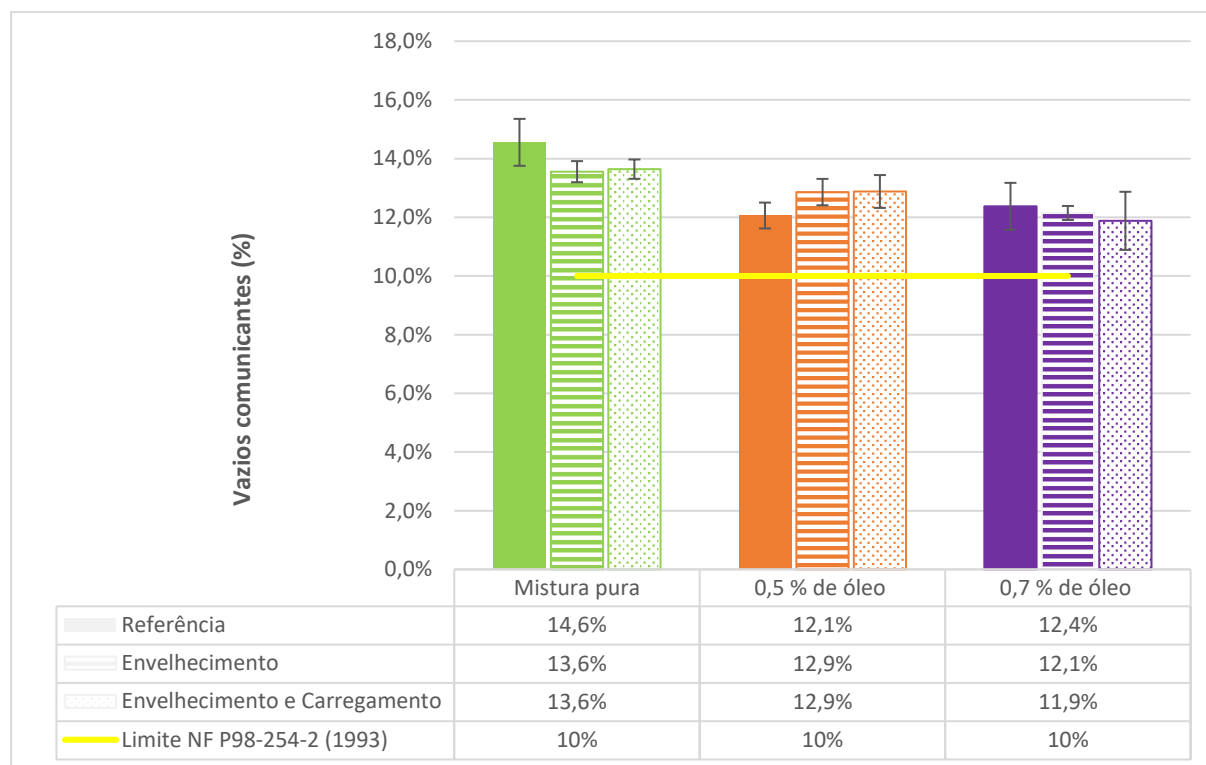
Ao se comparar o ganho de massa de cada mistura, nota-se que as amostras que continham APSOSR foram as que apresentaram menores variações. No entanto, é importante destacar que as misturas com APSOSR apresentaram menores volumes de vazios, portanto, menos espaços disponíveis para armazenamento da água residual, após os sete dias destinados à drenagem dos corpos de prova, o que justifica a menor quantidade de água retida.

4.3.3 Vazios comunicantes

A presença de vazios ineficazes pode ser resultado de uma quantidade insuficiente de ligante, que não consegue cobrir completamente os agregados. Isso leva à concentração em áreas que bloqueiam a conexão entre os vazios, dificultando o fluxo de água. Para quantificar os vazios comunicantes foi realizado o ensaio em 10

corpos de prova, para cada mistura analisada, de referência e envelhecida. Na Figura 60 são mostrados os resultados obtidos na presente pesquisa.

Figura 60 - Resultado do ensaio de vazios comunicantes



Apesar de não seguir o procedimento descrito pela NF P98-254-2 (1993) na verificação dos vazios comunicantes, optou-se por ponderar acerca dos resultados com base no limite estabelecido por esta, que é de no mínimo 10% de vazios comunicantes. Logo, observa-se que todas as misturas apresentaram uma porcentagem de vazios comunicantes superiores ao indicado pela norma francesa.

Um revestimento do tipo CPA, com mistura enquadrada na faixa V do DNIT e teor de ligante de 4,5%, estudado por Alves (2019), apresentou vazios comunicantes em torno de 11,3%. Já no caso de uma CPA, também enquadrada na faixa V e com 4,3% de ligante, analisada por Knabben (2012), o valor médio de vazios comunicantes foi de 14,27%. Logo, percebe-se que os valores encontrados na presente pesquisa estão condizentes com outros trabalhos descritos na literatura.

Com o propósito de determinar a significância da variação dos vazios comunicantes, causada pela inclusão do APSOSOR, procedeu-se à análise de variância dos dados. Essa avaliação utilizou os resultados do ensaio, com um coeficiente de determinação de 5%, cujos resultados estão disponíveis na Tabela 39.

Tabela 39 - ANOVA para o ensaio de vazios comunicantes

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	0,0005136	2	0,000257	9,254667	0,031579	6,944272
Protocolos	6,192E-06	2	0,000003	0,111578	0,89711	6,944272
Erro	0,000111	4	0,000028			
Total	0,000631	8				

Quando se compara cada amostra de referência com sua respectiva amostra envelhecida, percebe-se que houve uma leve redução nos vazios comunicantes para a amostra sem o APSOSR. Já para as misturas com 0,5% de óleo residual, houve um aumento discreto de 0,8% e, para a mistura com 0,7% de óleo o aumento foi ainda mais discreto, sendo somente 0,3%. Para complementar estes resultados, ao analisar os dados apresentados na Tabela 39, verifica-se que o valor calculado de F, quando a variação está relacionada aos protocolos, é inferior ao valor crítico de F, que é de 6,94. Portanto, conclui-se pela aceitação da hipótese inicial, que indica que o volume de vazios não é significativamente afetado pela aplicação dos diferentes protocolos de envelhecimento nas misturas.

Quando a comparação é feita entre o protocolo de envelhecimento e o protocolo combinado de envelhecimento e carregamento, percebe-se mais uma vez que não houve diferença significativa. Este fato corrobora com o indicativo de que aplicação do carregamento não contribuiu expressivamente na liberação do óleo.

Ao realizar a análise estatística considerando a presença de APSOSR, foi observada uma disparidade significativa nos vazios comunicantes das misturas estudadas. Isso é evidenciado pelo valor calculado de F, que atingiu 9,25, ultrapassando o valor crítico de F, estabelecido em 6,94. Conseqüentemente, a hipótese inicial é rejeitada, indicando que os dados demonstram significância do modelo quando a variação é atribuída à presença do APSOSR.

Devido à constatação de diferenças significativas entre os vazios comunicantes das misturas, pura e com a adição de APSOSR, foi realizado o teste de Tukey para identificar quais misturas distinguem entre si. Na Tabela 40, é possível examinar se há diferença significativa nos volumes de vazios ao comparar pares de misturas para cada protocolo de análise.

Tabela 40 – Resultado das comparações múltiplas entre os VCs das misturas

Test Tukey para presença de APSOSR			
Misturas	Referência	Envelhecimento	Envelhecimento + Ação cíclica
Pura - 0,5%	Sim	Não	Não
Pura - 0,7%	Sim	Sim	Sim
0,5% - 0,7%	Não	Não	Não

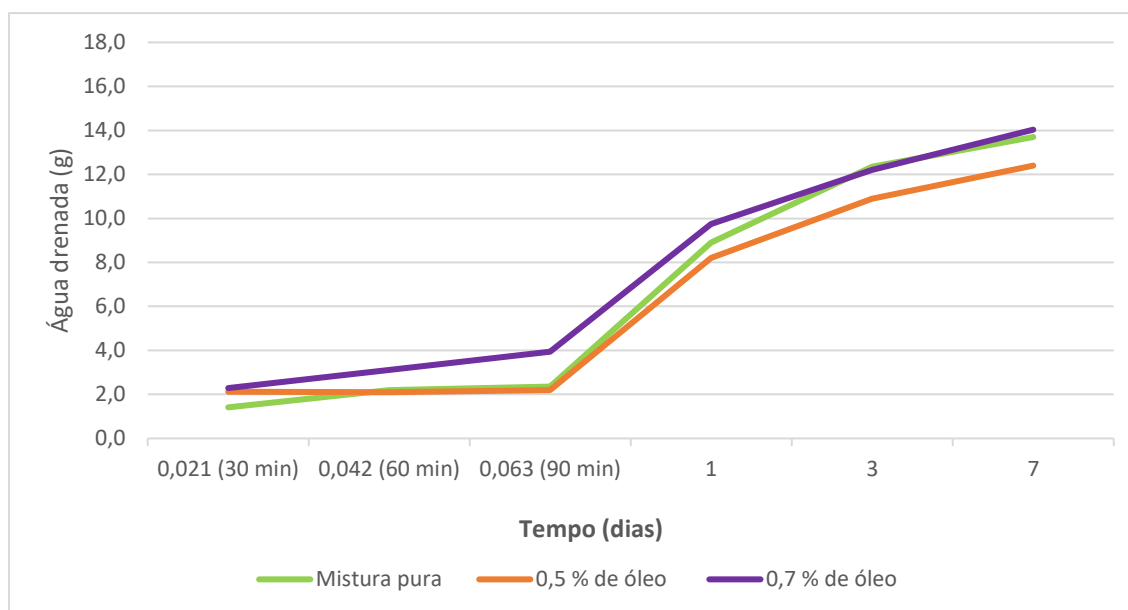
De maneira geral, as variações nos vazios comunicantes seguiram a mesma tendência do ensaio de volume de vazios, como já era esperado. Para as misturas de referência, percebe-se uma redução dos VC de 2,5% e 2,2% quando comparada a mistura com 0,5% de óleo e 0,7% de óleo, respectivamente, daquela sem o APSOSR. Estes resultados foram validados pelo teste de comparação múltipla, conforme evidenciado na Tabela 40, onde se constata uma diferença expressiva entre a mistura sem aditivo e aquelas com ambos os teores de óleo. Entretanto, não foi observada variação volumétrica significativa entre as misturas contendo 0,5% e 0,7% de óleo.

Em se tratando das misturas submetidas ao envelhecimento e ao envelhecimento e carregamento, a redução dos vazios comunicantes foi mais discreta. Esse padrão fica evidente ao notar que, em ambas as situações, não foram identificadas diferenças significantes entre a mistura sem aditivo e aquela com 0,5% de óleo. Contudo, ao aumentar a adição para 0,7% de óleo, passa-se a ter uma significativa variação dos vazios comunicantes.

4.3.4 Comportamento drenante

Na Figura 61 foram traçadas as curvas do comportamento drenante das misturas envelhecidas, em função do tempo. Os dados foram obtidos a partir da verificação das massas de sete corpos de prova, após a aplicação da chuva simulada, durante sete dias.

Figura 61 - Comportamento drenante das misturas envelhecidas



Ao analisar as curvas da Figura 61, nota-se que as três misturas apresentam comportamentos similares, com cerca de 60% da água drenada nas primeiras 24 horas. Percebe-se ainda que, a amostra sem o APSOSR, apesar de ser a mistura com maior volume de vazios, foi a que apresentou menor perda de água nos primeiros 30 minutos, quando comparada com as misturas modificadas. Esta tendência foi observada por todo o período de sete dias, como já constatado na análise do aumento de massa após este tempo de observação, visto que a mistura pura foi a que apresentou maior retenção de água.

Visto que durante as primeiras 24 horas foi verificado o escoamento da maior parte da água retida pelos corpos de prova, durante a chuva simulada, essas informações foram utilizadas para estimar a taxa de escoamento e, conseqüentemente, a permeabilidade das misturas. Desse modo, a vazão obtida para cada mistura pode ser vista na Tabela 41, bem como seus coeficientes de permeabilidade.

Tabela 41 – Permeabilidade das misturas, com base na Eq. da Continuidade

Mistura	Água retida após chuva simulada (g)	Água escoada em 24 horas (g)	Vazão (cm ³ /s)	k (cm/s)
Pura	16,5	9	$1,042 \times 10^{-4}$	$1,327 \times 10^{-6}$
0,5 % de óleo	13,3	8	$0,926 \times 10^{-4}$	$1,180 \times 10^{-6}$
0,7 % de óleo	15,5	10	$1,157 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-6}$

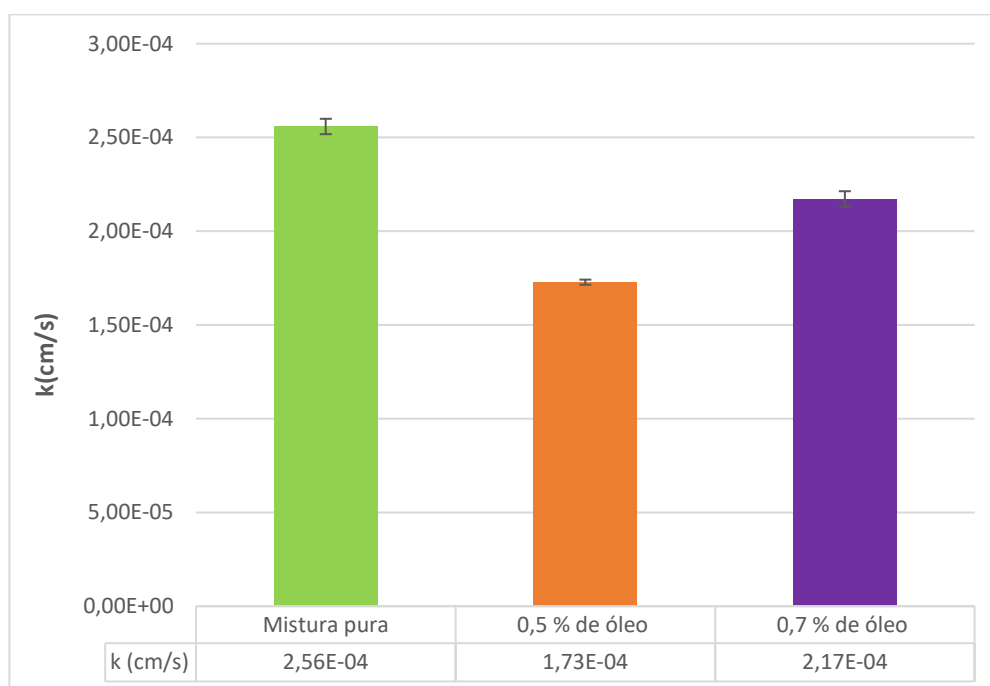
Goh e You (2012) e Shen, Wu e Du (2008) afirmam que coeficientes de permeabilidade superiores a 0,01 cm/s geralmente são atribuídos a revestimentos porosos que apresentam uma boa drenabilidade. Já a norma ASTM D7064/21 indica que os valores de permeabilidade devam ser superiores a 0,12 cm/s. Ao observar os resultados expostos na Tabela 41, notam-se valores bastante discrepantes dos encontrados na literatura, o que indica que o método utilizado não permite uma boa aproximação dos valores de permeabilidade encontrados por meio do ensaio de permeabilidade.

Além dos dados da permeabilidade das misturas, a Tabela 41 apresenta a informação da água retida nos corpos de prova, logo após estes serem retirados do simulador de chuva. Percebe-se que a mistura pura é a que apresenta maior retenção de água, seguida da mistura com 0,7% de óleo e, por fim a mistura com 0,5% de óleo. Este comportamento é previsível, visto que a mistura pura é a que apresenta maiores volume de vazios e vazios comunicantes.

4.3.5 Permeabilidade

Os coeficientes de permeabilidade das misturas também foram determinados a partir do ensaio de permeabilidade em um permeâmetro de parede flexível e carga constante. Estes resultados podem ser observados no gráfico da Figura 62.

Figura 62 – Permeabilidade das misturas, a partir do ensaio de permeabilidade à carga constante



A norma ASTM D7064/21 estipula que os valores de permeabilidade sejam superiores a 0,12 cm/s. Ao analisar os resultados da Figura 62 é evidente que há uma grande disparidade em relação ao valor especificado na norma, da mesma forma que foi constatado ao calcular os valores de coeficiente de permeabilidade com o auxílio da Equação 9. Apesar disto, é possível perceber que a adição do APSOSR não alterou a permeabilidade das misturas, visto que a ordem de grandeza encontrada (10^{-4}) foi a mesma para as três misturas.

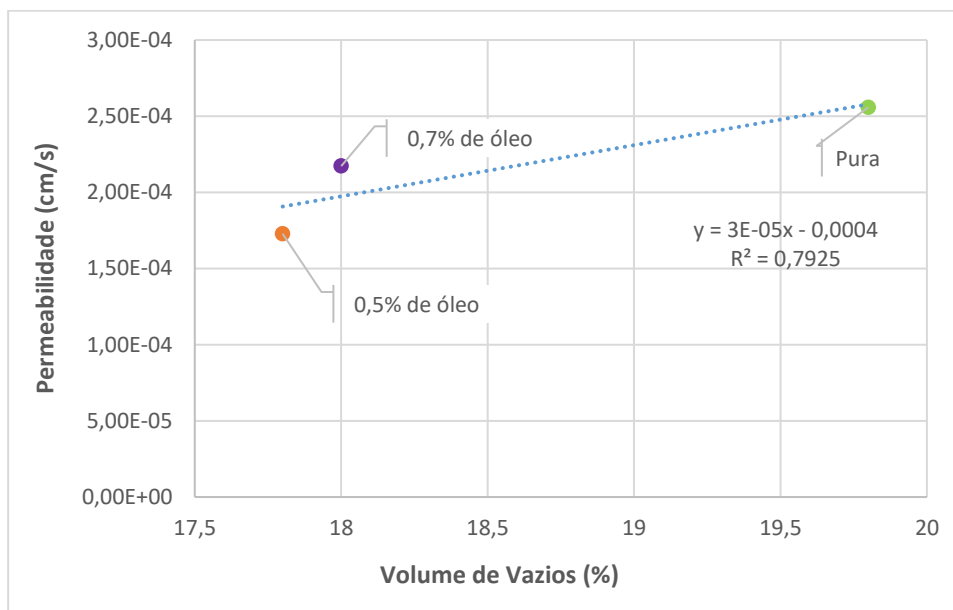
Como não foi realizado o ensaio para gradientes hidráulicos distintos, também não foi possível caracterizar o regime de escoamento. Desta forma, diante dos resultados, pode-se inferir que o regime de escoamento para esse tipo de mistura asfáltica pode ser considerado turbulento, logo, o método de ensaio não seria adequado. Souza (2008) ao realizar o ensaio por chuva simulada, a fim de avaliar a permeabilidade da mistura de forma mais realista, verificou que o escoamento da água em misturas asfálticas drenantes realmente ocorre em regime turbulento. O autor acrescentou ainda que o tipo de ensaio exerce uma influência significativa na permeabilidade medida.

Autores como Oliveira (2003) e Silva (2005) avaliaram experimentalmente o escoamento de misturas asfálticas do tipo CPA, e concluíram que o regime de escoamento é indefinido ou não caracterizado devido a velocidade de escoamento. Além disso, Ferreira (2015) destacou ainda que em misturas asfálticas drenantes, projetadas com alto VV, podendo chegar até 30%, o regime laminar pode não ser garantido, pois a velocidade de escoamento é elevada, da ordem de 10^{-3} m/s ou superior.

Ao comparar os resultados obtidos com o emprego das duas metodologias, nota-se uma discrepância dos coeficientes de permeabilidade encontrados, já que existe uma diferença nos valores da ordem de 10^{-2} . Logo, é possível concluir que o resultado do comportamento drenante após a chuva simulada para o cálculo de k com o uso da Equação 9, não é equivalente ao cálculo do coeficiente de permeabilidade em decorrência do ensaio com permeômetro de parede flexível e carga constante.

O volume de vazios não é o único aspecto determinante para o comportamento permeável da mistura, sendo igualmente importante que esses vazios sejam eficientes para facilitar o escoamento da água. A Figura 63 relaciona o volume de vazios com a permeabilidade de cada tipo de mistura de referência.

Figura 63 – Permeabilidade em função do volume de vazios



Percebe-se que há coerência entre os valores ($R^2 = 0,79$), havendo uma tendência de aumento da permeabilidade com o aumento do volume de vazios, como era o esperado. Schneider *et al.* (2019) observaram o mesmo comportamento ao estudar o desempenho hidráulico e mecânico de uma mistura asfáltica aberta enquadrada como camada porosa de atrito.

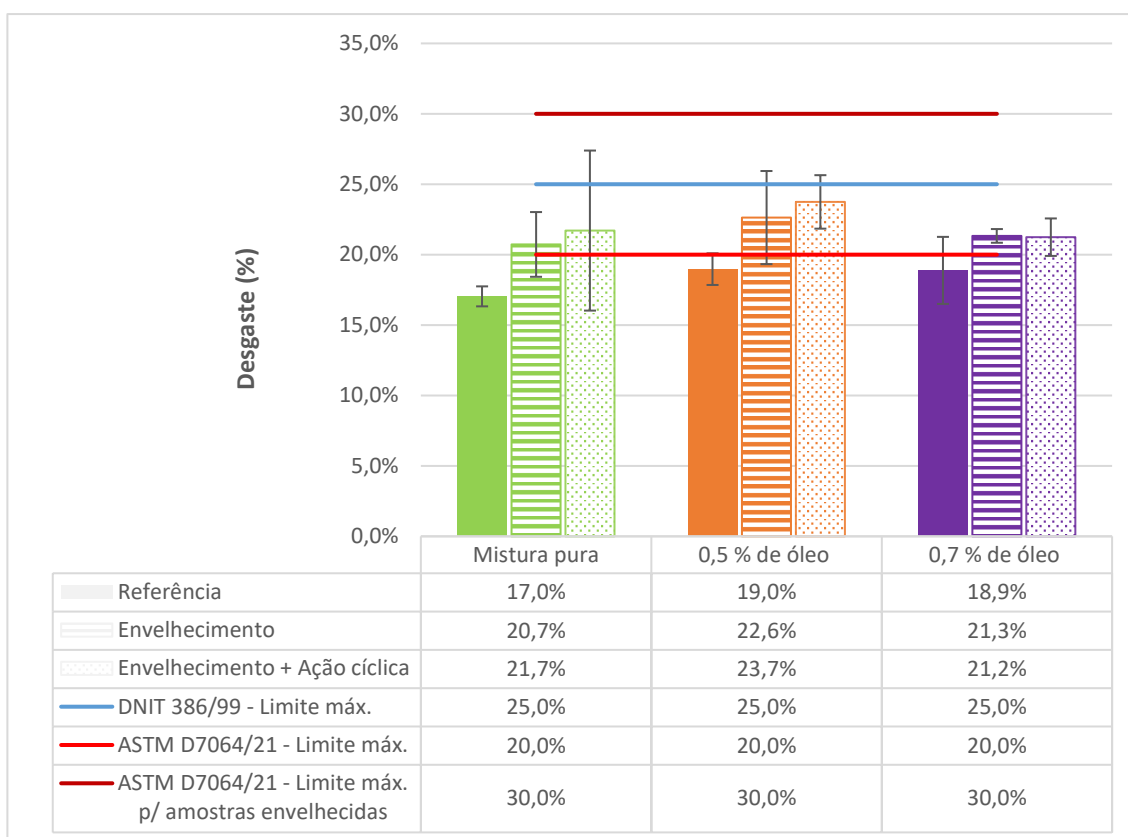
4.4 Caracterização mecânica das misturas

Embora a capacidade drenante seja sua característica primordial, é importante que a CPA também apresente resistência ao tráfego, para que o uso dessa mistura se torne vantajoso. A seguir, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de desgaste por abrasão, resistência à tração, dano por umidade induzida e módulo de resiliência.

4.4.1 Cântabro

O desempenho das misturas, quanto ao desgaste, foi avaliado por meio do ensaio de cântabro e, os resultados estão apresentados na Figura 64. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, a resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas.

Figura 64 - Resultado da perda por abrasão



Pelos resultados da Figura 64 nota-se que todas as amostras de referência, com ou sem APSOSR, apresentaram perdas por abrasão menores que os limites estabelecidos pela ASTM D7064/21 e DNIT 386/99, que são 20% e 25%, respectivamente. Em relação as amostras envelhecidas, todas as misturas também apresentaram valores inferiores ao limite máximo estabelecido pela DNIT 386/99, já em relação a norma americana, esta apresenta um limite próprio para amostras envelhecidas, que é de 30%. Logo, todas as misturas envelhecidas também atenderam ao limite estabelecido.

No ensaio de abrasão de misturas porosas, quentes e mornas, com ligante AMP 60/85 para um teor de ligante de 4,5%, Jaques (2018) verificou uma porcentagem superior ao encontrando nesta pesquisa, ultrapassando 20%. Já Motta *et al.* (2010) tiveram um resultado mais próximo, com uma porcentagem de perda de 18%, para CPAs compactadas com asfalto borracha.

A fim de avaliar a durabilidade de misturas com elevado volume de vazios, Zhang *et al.* (2021) realizaram o ensaio de cântabro, em duas condições, seguindo o

protocolo padrão e após submeter as amostras à ciclos de imersão em água. No primeiro caso, o resultado encontrado foi de 9,6% de perda, para um teor de 5% de ligante e volume de vazios de 21,1%, valor inferior ao encontrado nesta pesquisa. Já as amostras submetidas à umidade apresentaram um desgaste de 18,5%, próximo aos 20,7% de desgaste desta pesquisa, da mistura pura, submetida ao efeito combinado da temperatura e umidade.

Ao comparar as misturas puras com as misturas modificadas, percebe-se um ligeiro aumento na porcentagem de desgaste, de cerca de 2%, tanto para as misturas de referência, como para as envelhecidas. Porém, ao analisar o desgaste de cada mistura de referência com sua corresponde envelhecida, nota-se que a mistura com 0,7% de óleo foi a que apresentou o menor aumento de desgaste após o condicionamento.

Para avaliar a importância da variação da porcentagem de desgaste devido à inclusão do óleo e aplicação dos protocolos de envelhecimento, realizou-se uma análise de variância dos dados. Esta avaliação empregou os resultados do ensaio, para um nível de significância de 5%, os quais estão detalhados na Tabela 42.

Tabela 42 - ANOVA para o ensaio de cântabro

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	0,000595491	2	0,000298	6,377008	0,057001	6,944272
Protocolos	0,002659805	2	0,00133	28,48339	0,004305	6,944272
Erro	0,000186762	4	4,67E-05			
Total	0,003442057	8				

Pelo resultado da análise de variância, disposto na Tabela 42, nota-se que para a variação derivada da presença do APSOSR, o valor calculado de F foi de 6,37, abaixo do valor crítico de F, que é 6,94, com um coeficiente de determinação de 5%. Portanto, a hipótese inicial é aceita, o que indica que a presença do agregado saturado nas misturas não exerce influência significativa sobre a porcentagem de desgaste.

No entanto, ao realizar a análise estatística considerando os protocolos de envelhecimento, diferente do comportamento observado na análise volumétrica, observaram-se diferenças significativas no desgaste sofrido pelas misturas estudadas, pois o valor calculado de F foi de 28,48, superior ao valor crítico de F de 6,94. Assim, a hipótese inicial é rejeitada, evidenciando que os dados apresentam

significância para o modelo quando a fonte de variação é o envelhecimento da mistura.

Diante do resultado da ANOVA, em que foram verificadas diferenças significantes entre as misturas de referência, envelhecidas e envelhecidas e carregadas, fez-se necessária a aplicação do teste de Tukey, para avaliar quais misturas distinguem entre si. Na Tabela 43 são indicadas se existem diferenças significativas na porcentagem de desgaste ao comparar os pares de protocolos, para cada mistura em análise.

Tabela 43 – Resultado das comparações múltiplas entre as % de desgaste das misturas

Test Tukey para os protocolos de envelhecimento			
Misturas	Pura	0,5% de óleo	0,7% de óleo
Referência – Envelhecimento	Sim	Sim	Sim
Referência – Envelhecimento + Ação cíclica	Sim	Sim	Sim
Envelhecida – Envelhecimento + Ação cíclica	Não	Não	Não

O teste de Tukey indicou que para todas as misturas, com e sem presença de óleo, o comportamento frente ao envelhecimento foi similar. Ao comparar as misturas de referência com as envelhecidas ou com as envelhecidas e carregadas, nota-se que existe diferença significativa entre as porcentagens de desgaste, logo, a presença do óleo não afetou na coesão da mistura, conseguindo manter os valores dentro dos limites previstos nas normas ASTM D7064/21 e DNIT 386/99.

Quando se compara as misturas envelhecidas daquelas submetidas ao envelhecimento e carregamento, de acordo com o teste de Tukey, não há diferença significativa entre elas. Este resultado indica que, possivelmente, o passo adicional, referente à aplicação de carregamento, não promoveu uma maior difusão do óleo na mistura, o que corrobora com a premissa de que o processo de liberação do óleo pelo agregado poroso é diferente do que acontece com as cápsulas de alginato de cálcio, que necessitam do rompimento para que o rejuvenescedor seja liberado na mistura.

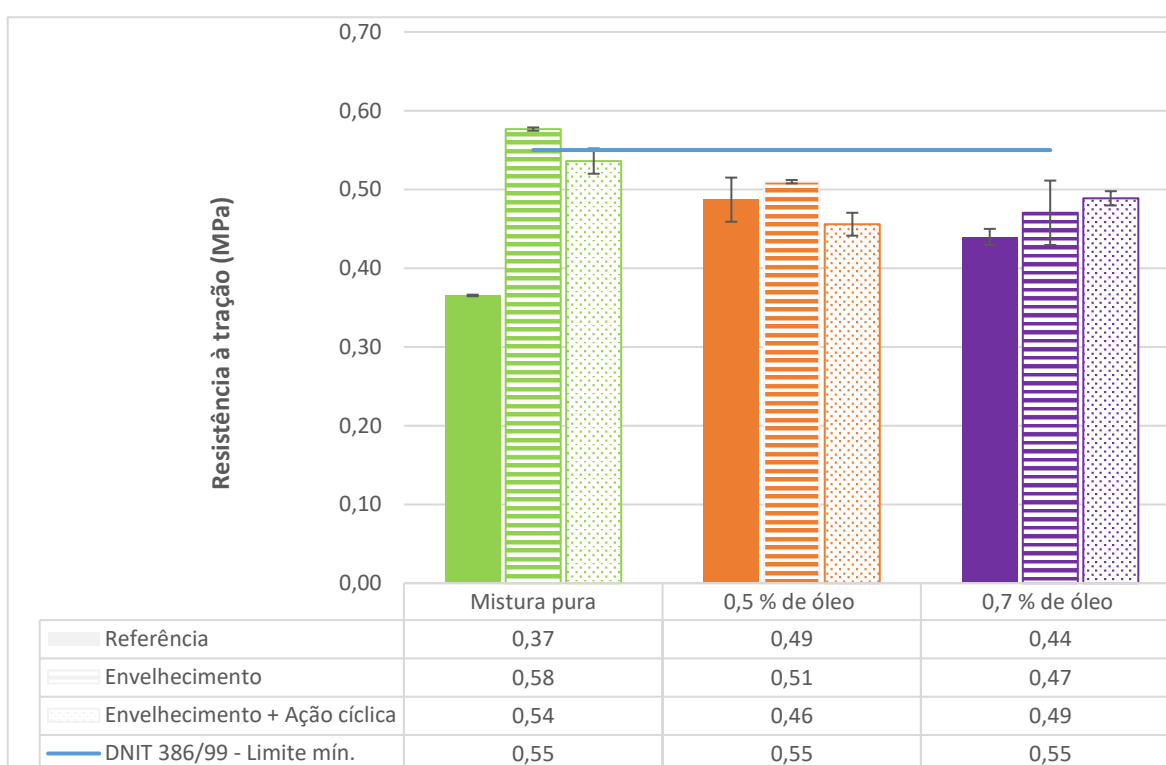
Além disso, o indicativo de que não existem mudanças significativas nos resultados referentes as amostras envelhecidas daquelas envelhecidas e sob ação cíclica contrapõe o resultado encontrado para os índices de oxidação, da Tabela 23. Naquela análise, foi possível perceber uma considerável alteração no índice de

oxidação após o carregamento cíclico que não foi observado nos ligantes provenientes das misturas submetidas somente ao envelhecimento. Isto confirma que a presença do fíler nas amostras submetidas ao FTIR superestimaram os índices de oxidação, visto que para o cálculo do IS, foi considerado o intervalo de onda entre 989 e 1050 cm^{-1} , faixa que compreende o número de onda relativo ao fíler, que se situa em torno de 1000 cm^{-1} .

4.4.2 Resistência à tração

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados no gráfico da Figura 65. Os valores são uma média dos resultados de três corpos de prova, além disso, estão apresentados os respectivos desvios-padrão para cada mistura.

Figura 65 - Resultados do ensaio de RT



Como exposto no tópico 3.2.5.3, houve dificuldade em se alcançar o valor de resistência à tração mínimo estabelecido pela norma, que é de 0,55 MPa. Com exceção da mistura pura envelhecida, nenhuma das outras conseguiram atingir o limite, como já era esperado.

Alecrim (2021) observou que muitas misturas asfálticas do tipo CPA, tanto as encontradas na literatura quanto as propostas no seu trabalho, não atingiram o limite mínimo de 0,55 MPa para a RT. A autora acredita que exista uma certa tendência da mistura CPA oriunda de campo apresentar propriedades superiores às misturas preparadas em laboratório.

Ao comparar as duas metodologias, Alecrim (2021) verificou valores de RT de 0,59 Mpa e VV de 22,2%, para a mistura proveniente do campo e compactada em laboratório, e RT de 0,47 MPa e VV de 21,6% para aquela totalmente produzida em laboratório. Com isto, concluiu-se que a usinagem em grande escala proporciona uma interação mais eficiente do ligante com os agregados. No entanto, outra explicação para esse resultado pode estar no controle da temperatura em campo, já que a amostra poderia estar mais envelhecida do que aquela preparada integralmente em laboratório.

Apesar disso, é possível notar um comportamento positivo em relação a adição das vermiculita saturada na mistura, já que houve um aumento de resistência quando se compara as misturas de referência. Com a adição do APSOSR resultante em 0,5% de óleo, em relação a massa da mistura, a resistência a tração passou de 0,37 MPa para 0,49 MPa, ou seja, um aumento de 32%. Em relação à adição de APSOSR resultante em 0,7% de óleo, em relação a massa da mistura, também houve um aumento de resistência, porém, menos expressivo, sendo de 18,9%.

Para confirmar que o aumento verificado na resistência à tração foi realmente significativo e determinar a fonte da variação responsável por este incremento, foi realizada a análise de variância. O resultado da ANOVA, para um nível de significância de 5%, pode ser observado na Tabela 44.

Tabela 44 - ANOVA para o ensaio de resistência à tração

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	0,001089	2	0,000544	0,140972	0,872646	6,944272
Protocolos	0,012377	2	0,006189	1,60295	0,308137	6,944272
Erro	0,015443	4	0,003861			
Total	0,028909	8				

Ao analisar a Tabela 44, quanto à presença do óleo na mistura, percebe-se que o F calculado é 0,14, já quanto aos protocolos de envelhecimento, o valor foi de 1,6.

Estes valores são inferiores ao valor crítico F de 6,94, portanto, aceita-se a hipótese inicial, o que indica que a presença do APSOR e os protocolos de envelhecimento não tem uma influência significativa na variação da RT das misturas.

Ainda que a análise de variância não tenha identificado uma diferença significativa nos resultados da RT, é possível perceber que existe uma tendência no aumento da resistência à tração com a realização do condicionamento de envelhecimento, em laboratório. Este comportamento ocorre devido à ação do ligante oxidado proveniente do processo de envelhecimento.

Silva Lopes *et al.* (2023) ao estudarem diferentes protocolos de envelhecimento para misturas densas utilizando um ligante asfáltico 50/70, apuraram que o protocolo que combinava o condicionamento em estufa com o simulador de chuva, promoveu um aumento de RT da mistura na ordem de 18%. Já Siqueira (2023) ao utilizar um AMP 55/75 na produção de misturas densas, notou que a influência promovida pela umidade provocou um acréscimo de resistência à tração em torno de 21%. Enquanto nesta pesquisa, o acréscimo de resistência da mistura pura foi de 56,7%, o que indica que o protocolo é mais agressivo para misturas com elevado volume de vazios.

Além disso, Briliak e Remišová (2021) verificaram que o tipo de ligante utilizado na mistura pode influenciar na resposta do módulo de rigidez diante do envelhecimento a curto e longo prazo. Esta afirmativa é confirmada com os resultados desta pesquisa, bem como do trabalho de Siqueira (2023) que utilizaram um AMP 55/75, já Silva Lopes *et al.* (2023) utilizaram um ligante asfáltico 50/70 e obtiveram um resultado inferior aos anteriores.

Em paralelo, outro indicativo do bom resultado da modificação das misturas pode ser feito ao analisar cada mistura de referência, isoladamente, com sua correspondente submetida ao protocolo de envelhecimento. Nesta análise, pode-se perceber que as misturas com adição de APSOSR apresentaram uma menor diferença entre as amostras de referências e as amostras envelhecidas, ou seja, o óleo atuou na redução da rigidez das misturas decorrente do condicionamento. O ganho excessivo de rigidez muitas vezes é indesejado, por tornar as misturas quebradiças ou frágeis.

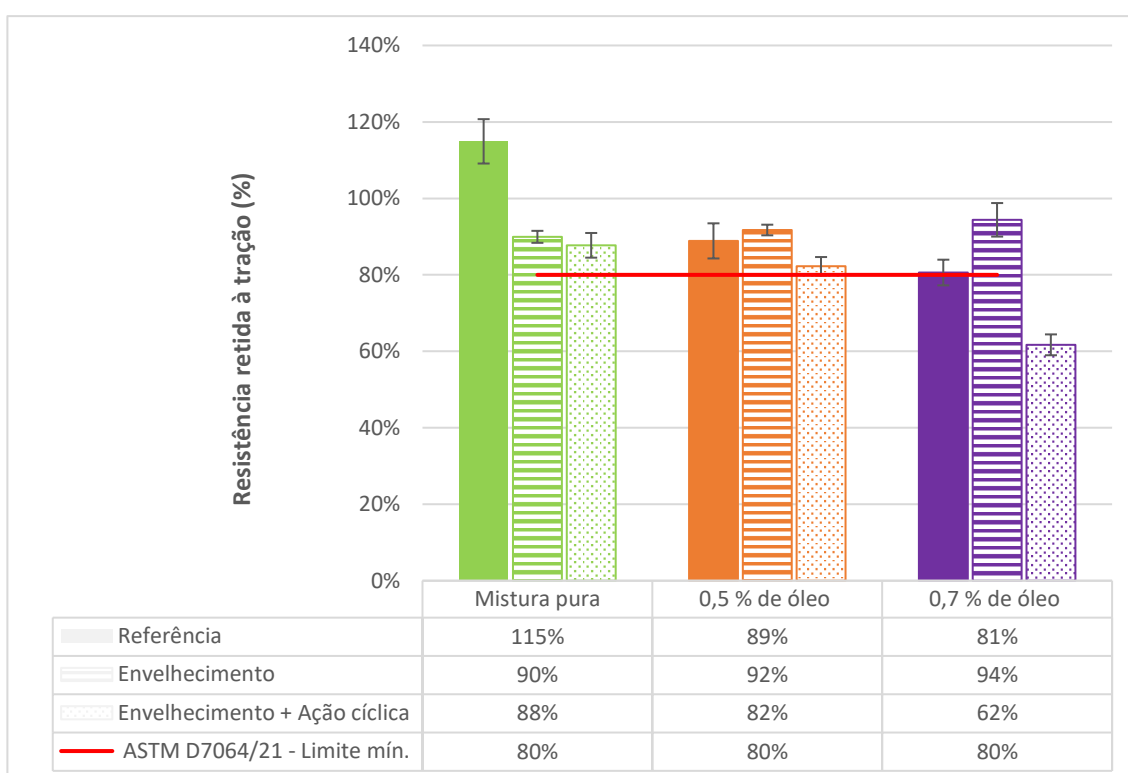
A tendência de que o uso de óleos vegetais como agentes rejuvenescedores podem reduzir a rigidez da mistura pode ser confirmada no trabalho de Melo Neto *et al.* (2022), em que utilizou a ácido graxo da borra do óleo de soja (SSFA) com o intuito

de restaurar parcialmente as propriedades envelhecidas do ligante recuperado. Dentre os resultados, a mistura reciclada contendo 40% de RAP e 5% de SSFA apresentou uma redução na resistência à tração de 9.2% em relação a mistura sem o agente rejuvenescedor.

4.4.3 Dano por umidade induzida

A Figura 66 apresenta o comportamento das misturas relacionado à resistência por umidade das amostras, por meio dos valores de resistência retida à tração.

Figura 66 - Resultados do ensaio de Lottman modificado



A ASTM D7064/21 sugere que o critério de definição da suscetibilidade à umidade de uma mistura seja de no mínimo 80% de RRT, ou seja, a perda máxima de resistência deve ser de 20% após o condicionamento, em relação ao valor de referência. Logo, todas as misturas apresentam valores de RRT dentro do limite estabelecido pela especificação americana.

Esperava-se que a resistência das amostras diminuísse após serem envelhecidas, já que com a oxidação do ligante a adesão com o agregado mineral fica comprometida, no entanto, este comportamento foi observado apenas para as

misturas puras. Ao se comparar a mistura pura, antes e após o envelhecimento, nota-se uma perda de resistência de 25%. Quanto as misturas modificadas, observou-se uma tendência contrária, já que após o envelhecimento, as amostras tiveram um aumento na resistência retida à tração de 3% e 13%, para as misturas com 0,5% e 0,7% de óleo, respectivamente.

Guo *et al.* (2023) observaram que a adesão entre o ligante asfáltico e o agregado mineral está diretamente ligada ao desempenho do pavimento asfáltico e que esta, pode ser afetada significativamente pela luz, oxigênio, água e outras condições naturais. Os autores também concluíram que a adesão entre o ligante asfáltico e os agregados graníticos diminuem após o envelhecimento e pela presença de partículas de água. Esta conclusão corrobora com o resultado verificado na mistura pura e indica o efeito positivo da presença de óleo nas misturas, em decorrência da melhora da adesão entre o ligante asfáltico e o agregado mineral, já que nestas, houve um aumento da RRT.

A melhora na adesão entre o ligante e os agregados das misturas modificadas com o APSOSR pode ser justificada com a análise do FTIR do óleo de soja residual. No espectro foi possível identificar o aparecimento do estiramento da carbonila em torno de 1745 cm^{-1} , que é um indicativo de que o óleo é rico em ésteres, especialmente triacilgliceróis. Os ésteres podem contribuir para aumentar a adesão e coesão entre os componentes do ligante asfáltico, melhorando sua capacidade de ligação com os agregados.

Para confirmar a significância do aumento da RRT e identificar a fonte da variação responsável por esse incremento, conduziu-se uma análise de variância das misturas estudadas. Na Tabela 45 são apresentados os dados da ANOVA para o ensaio de Lottman, com um nível de significância de 5%.

Tabela 45 - ANOVA para o ensaio de Lottman

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	0,052126	2	0,026063	2,05751	0,24296261	6,94427191
Protocolos	0,053557	2	0,026778	2,11401	0,23633564	6,94427191
Erro	0,050668	4	0,012667			
Total	0,156351	8				

Ao observar os resultados da Tabela 45, nota-se que o valor calculado de F para a presença do óleo na mistura é 2,05, enquanto para os protocolos de envelhecimento é 2,11. Ambos os valores são inferiores ao valor crítico de F de 6,94. Assim, conclui-se pela aceitação da hipótese inicial, que indica que a presença do óleo e os diferentes protocolos de envelhecimento não exercem uma influência significativa na variação da suscetibilidade à umidade das misturas.

Casado *et al.* (2021) ao trabalharem com rejuvenescedor comercial encapsulado em agregados porosos constataram que as misturas experimentais (com cápsulas) alcançaram um nível de desempenho comparável ou melhor que o de referência. Este fato foi atribuído a uma melhora da coesão entre ligante e agregados, na presença de água. Além disso, concluiu-se que a adição do agregado poroso não afetou as propriedades do pavimento em termos de sensibilidade à água. Logo, apesar da utilização de um rejuvenescedor diferente, o resultado da presente pesquisa corrobora com estas conclusões.

Majidifard *et al.* (2019) e Zaumanis *et al.* (2014) estudaram os efeitos dos óleos residuais de cozinha (OMA), que são predominantemente óleos à base de soja, em misturas recicladas. Esses autores relataram que as misturas preparadas com RAP + OMA apresentaram maior suscetibilidade a danos por umidade quando comparadas a outros materiais, como RAP + ligante virgem ou RAP + extrato aromático, embora a adição de OMA tenha proporcionado melhor trabalhabilidade às misturas de RAP e melhorou as propriedades do aglutinante. Este resultado também foi verificado nesta pesquisa, em que se comparando as misturas de referência, a adição do óleo provocou uma maior susceptibilidade à umidade, no entanto, o efeito benéfico é verificado ao analisar as misturas envelhecidas, em que as modificadas com o APSOSR apresentaram aumento de resistência.

Xu *et al.* (2015) explicaram que durante os ciclos de congelamento e descongelamento, as estruturas internas do pavimento modificam-se de três maneiras, ou seja, os poros existentes aumentam, os vazios separados se fundem e novos vazios se formam. Por consequência, as misturas que apresentam menores alterações internas, após os ciclos de gelo e degelo, retêm mais resistência. Por outro lado, as misturas que sofrem mais alterações, após os ciclos de congelamento e descongelamento, perdem resistência devido a uma perda em sua densidade e aumento no volume de vazios (Xu *et al.*, 2015a; Xu *et al.*, 2015b). Os valores

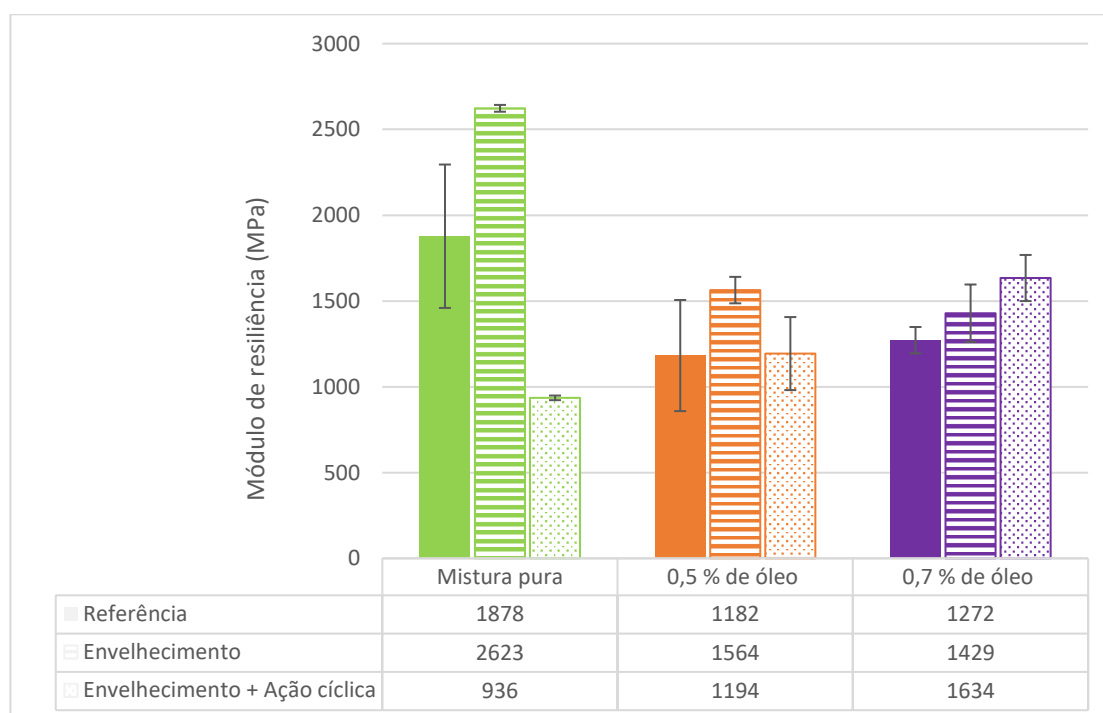
encontrados de densidade máxima medida da mistura solta e volume de vazios, vistos no tópico 4.3.2, confirmam os resultados de danos induzidos pela umidade.

Shirini e Imaninasab (2016) analisaram algumas misturas porosas produzidas com ligante modificado com 10% e 15% de resíduo de borracha e, os resultados mostraram uma maior resistência à danos por umidade, com valores RRT de 86,2% e 80,9%, respectivamente. Ainda que o resíduo de borracha tende à aumentar a viscosidade do ligante e o óleo à reduzir, os valores de RRT encontrados na presente pesquisa são bem próximos destes.

4.4.4 Módulo de resiliência

Na Figura 67 são apresentados os resultados dos módulos de resiliência médios, de três corpos de prova, para cada mistura analisada.

Figura 67 - Resultados de MR



É importante destacar que o módulo de resiliência está associado à rigidez da mistura, portanto, sua análise não pode ser feita de forma direta, permitindo, assim, valores menores ou maiores, mas que sejam compatíveis com a estrutura do pavimento e as deformações entre suas camadas (GAMA, 2013). No entanto, uma baixa rigidez evita alta absorção de tensões que levam ao trincamento prematuro do revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2022)

De acordo com Motta *et al.* (2010), em função do seu elevado volume de vazios, a CPA apresenta maior flexibilidade ($MR < 2000$ MPa) quando comparada com misturas asfálticas densas. Logo, ao analisar as misturas isoladamente, os valores encontrados estão dentro do limite mencionado.

Percebe-se que as misturas de referência, apresentam valores variando entre 1182 MPa e 1878 MPa, para a mistura com 0,5% de óleo e para a mistura pura, respectivamente. Estes resultados estão em consonância com os módulos de resiliência obtidos por Pinheiro (2004), que foram 1723 MPa e 1527 MPa, ao utilizar um ligante modificado por borracha na produção de duas misturas com 6,00% de teor de ligante e volume de vazios de 19,5% e 20,8%.

Os valores de módulo de resiliência das misturas modificadas com APSOSR sofreram reduções quando comparado ao resultado obtido para a mistura pura. Ao analisar as misturas de referências, nota-se uma redução de 37% e 32%, dos valores de MR das misturas com 0,5% e 0,7% de óleo, respectivamente, em relação a mistura pura. Este comportamento deve ser atribuído ao fato do MR ser inversamente proporcional ao valor de RT, já que para a realização do ensaio de módulo de resiliência é aplicada uma carga equivalente à 10% da resistência à tração, ou seja, como o RT foi maior para as misturas modificadas, conseqüentemente as cargas para realização do ensaio de MR foram superiores, resultando assim em menores valores de MR.

Este resultado mais uma vez confirma que a presença do filer nas amostras do FTIR superestimou os valores calculados do índice de oxidação dos ligantes provenientes das misturas submetidas ao envelhecimento e sob ação cíclica, visto que os resultados de MR indicaram que estas apresentavam rigidez próxima das misturas submetidas ao envelhecimento. Além disso, estes elevados valores de oxidação podem estar relacionados ao processo de extração e recuperação destas amostras em específico.

A fim de validar a importância das variações de rigidez das misturas e discernir acerca da origem da desta alteração, realizou-se uma análise de variância das misturas em estudo. Os resultados da ANOVA, referentes ao ensaio de MR, com um nível de significância de 5%, estão sumarizados na Tabela 46.

Tabela 46 - ANOVA para o ensaio de módulo de resiliência

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Presença do APSOSR	401270,9	2	200635,4	0,810306	0,506469	6,944272
Protocolos	600131,6	2	300065,8	1,211875	0,387742	6,944272
Erro	990418,6	4	247604,7			
Total	1991821	8				

Ao examinar os dados apresentados na Tabela 46 é evidente que os valores obtidos de F, sendo 0,8 e 1,2, para a inclusão do óleo na mistura e para os procedimentos de envelhecimento, respectivamente, são inferiores ao valor crítico de F de 6,94. Assim, conclui-se pela validação da hipótese inicial, que infere que a presença do óleo e as diferentes abordagens de envelhecimento não têm um impacto significativo na variação de rigidez das misturas.

Ainda que análise de variância não tenha revelado uma disparidade significativa nos resultados de MR, ao observar cada mistura e compará-la com sua respectiva amostra envelhecida, percebe-se a ação efetiva do óleo na redução da rigidez da mistura após o condicionamento. Na mistura pura, após o envelhecimento, o aumento do MR foi de aproximadamente 40%, já para as misturas com APSOSR, o aumento foi de 32% e 12%, para as misturas com 0,5% e 0,7% de óleo, em massa da mistura, respectivamente.

Diante dos seus resultados, Silva Lopes *et al.* (2023) concluíram que os valores de MR das misturas asfálticas densas e envelhecidas em relação à de referência podem ser considerados constantes, sem mudanças significativas. No entanto, este comportamento não foi o apresentado nesta pesquisa, com a aplicação do protocolo na CPA. O resultado deste ensaio, quanto ao condicionamento, reforça a tendência que os outros ensaios já demonstravam, de que a combinação do efeito da temperatura e umidade, é uma forma eficaz de representar o envelhecimento de misturas com elevado volume de vazios.

4.5 Análise do desempenho dos teores estudados

Em virtude do elevado volume de resultados obtidos na pesquisa, optou-se por apresentar uma síntese destes, por meios dos Quadro 9 e Quadro 10. A comparação destes resultados facilita a visualização do desempenho de cada teor estudado, frente ao comportamento das amostras puras, na mesma condição. Os resultados são

comparados as amostras puras mediante o aumento (↑), a redução (↓) ou constância (~) das propriedades. Ao identificar o mesmo comportamento para os dois teores, utilizou-se o símbolo duplo para indicar maior redução ou aumento.

Quadro 9 – Comparativo entre o desempenho dos ligantes recuperados das misturas com óleo e dos ligantes recuperados das misturas puras

Ensaio/ Parâmetro	Amostra						Desempenho desejável
	Referência		Envelhecimento		Envelhecimento + Ação cíclica		
	0,5% de óleo	0,7% de óleo	0,5% de óleo	0,7% de óleo	0,5% de óleo	0,7% de óleo	
Índice de oxidação	↓ ↓	↓	↓	↑	~	~	↓
PG	~	↓	↑ ↑	↑	↑ ↑	↑	↑
G*	↑	↓	↑ ↑	↑	↑ ↑	↑	↓
MSCR (3200 Pa)	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓
LAS (Nf - 1%)	↓	↑	↑	↑ ↑	↑	↑	↑
FFL	↓	↑	↑	↑ ↑	↑	↑ ↑	↑

Quadro 10 - Comparativo entre o desempenho das misturas com adição do APSOSR e das misturas puras

Ensaio/ Parâmetro	Amostra						Desempenho desejável
	Referência		Envelhecimento		Envelhecimento + Ação cíclica		
	0,5% de óleo	0,7% de óleo	0,5% de óleo	0,7% de óleo	0,5% de óleo	0,7% de óleo	
Escorrimento	↑	↑ ↑	---	---	---	---	~ OU ↓
VV	↓	↓	↓	↓ ↓	↓	↓ ↓	~ OU ↑
VC	↓	↓	↓	↓ ↓	↓	↓ ↓	~ OU ↑
Permeabilidade	~	~	---	---	---	---	~ OU ↑
% de desgaste	↑	↑	↑	↑	↑	~	~ OU ↓
RT	↑ ↑	↑	↓	↓ ↓	↓ ↓	↓	~ OU ↑
RRT	↓	↓	↑	↑	↓	↓ ↓	~ OU ↑
MR	↓	↓	↓	↓	↑	↑ ↑	~

Ao analisar o desempenho dos ligantes recuperados das misturas com óleo, frente ao comportamento dos ligantes recuperados das misturas puras, e compará-

los com a performance desejável, nota-se que na condição de referência, o teor de 0,7% de óleo se destacou com melhoria na maioria dos parâmetros, com exceção da temperatura de PG. Esse comportamento pode ser associado a maior liberação de óleo nesta mistura, ainda na fase de usinagem, como verificado no ensaio de escorrimento. No entanto, com a aplicação dos protocolos de envelhecimento e envelhecimento e ação cíclica, os dois teores apresentaram comportamentos similares, com discreto destaque para o teor de 0,5% de óleo.

Na análise das propriedades volumétricas das misturas com APSOSR, nota-se que houve redução no VV e VC para todas as misturas, com destaque para aquelas com 0,7% de óleo. Apesar deste comportamento não ser o desejável, as reduções foram discretas e os parâmetros se mantiveram dentro dos limites das especificações para misturas asfálticas de graduação aberta.

Em relação ao escorrimento, como esperado, a mistura com maior quantidade de óleo (0,7%) apresentou maior escorrimento, já que o agente rejuvenescedor é capaz de reduzir a viscosidade do ligante. Acerca da funcionalidade da mistura, a permeabilidade se manteve mesmo com a adição do APSOSR, o que garante que o principal objetivo da CPA não seja perdido.

Os resultados dos ensaios mecânicos revelam que o APSOSR resiste ao processo mecânico de fabricação da mistura, pois ao comparar as misturas modificadas, antes e após o processo de envelhecimento, observa-se que houve diferença nos valores encontrados, o que demonstra a ação do óleo durante a fase de envelhecimento e descanso dos corpos de prova. No entanto, ao se comparar com as amostras sem adição do APSOSR, na condição de referência, percebe-se que também houve variação nos resultados, o que confirma que o óleo já começa a ser liberado durante a usinagem das misturas.

A adição dos teores de 0,5% e 0,7% de óleo mostrou tendências similares, confirmadas pela análise estatística que indicou ausência de diferenças significativas entre os dois. No entanto, pode-se inferir que o teor de 0,5% de óleo apresentou um desempenho ligeiramente superior, apesar de demonstrar um comportamento reológico semelhante ao do teor de 0,7%. Para o primeiro, observou-se uma maior redução nos índices de oxidação em todas as condições analisadas, além do aumento da RT na condição de referência e uma menor redução deste parâmetro após o envelhecimento.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa explorou o uso potencial de agregados porosos saturados em óleo de soja residual como uma alternativa para restaurar parcialmente as propriedades envelhecidas do ligante asfáltico de camadas porosas de atrito. Nesta seção, serão apresentadas as conclusões obtidas por meio desta pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras relacionadas às lacunas identificadas na temática.

5.1 Considerações finais

O cálculo dos índices de oxidação indicou que a adição do óleo reduziu a oxidação do ligante envelhecido, quando comparado com o ligante puro. No entanto, todos os ligantes provenientes das misturas submetidas ao envelhecimento e sob ação cíclica, apresentaram índices de oxidação superiores aos demais. Apesar disso, sabe-se que os valores de IC dos ligantes modificados podem ter sido superestimados, já que parte das bandas de carbonila medidas por meio dos espectros de FTIR podem ser provenientes de agentes à base de soja. Quanto ao IS, os valores provavelmente foram superiores aos reais, em decorrência da presença de resíduo do fíler, que interferem no cálculo das áreas relativas ao sulfóxido.

A análise reológica evidenciou que a adição do óleo proporcionou um aumento na temperatura de PG após o envelhecimento, o que sugere que o óleo atuou impedindo o efeito degenerativo do ligante. Os ensaios de curva mestra e MSCR também indicaram que o óleo de soja residual agiu como um agente plastificante, induzindo componentes que aumentam a flexibilidade e reduzem a rigidez do ligante asfáltico. No entanto, acredita-se que parte dessa redução de rigidez seja devido à presença de percloroetileno nas amostras, conforme comprovado pelo FTIR. Por fim, os resultados do LAS e os valores de FFL calculados indicaram um desempenho superior dos ligantes modificados, perante a fadiga, em comparação ao ligante puro.

A análise química confirmou a presença do óleo de soja residual nos ligantes recuperados, indicando a efetiva difusão do óleo na mistura proveniente do agregado poroso. Além disso, observou-se que o tempo de interação do óleo com a mistura asfáltica foi adequado, o que permitiu sua liberação dos poros da vermiculita e efetiva ação nas propriedades do ligante envelhecido. O ensaio de escorrimento também evidenciou que o óleo começa a ser liberado dos poros da vermiculita durante o processo de mistura. Esta mesma análise pode ser feita diante dos resultados

mecânico, ao comparar os resultados das amostras modificadas daquelas sem adição do APSOSR, na condição de referência, percebe-se que também houve variação, o que confirma que o óleo já começa a ser liberado durante a usinagem das misturas.

Diante de todos os resultados, percebe-se que para o protocolo de envelhecimento adotado a adição da vermiculita saturada apresentou um efeito protetor frente ao envelhecimento do revestimento poroso, em decorrência dos efeitos combinados da umidade e temperatura. Em relação ao protocolo de carregamento cíclico, percebe-se que os resultados são similares aos determinados para as misturas submetidas somente ao envelhecimento, o que corrobora com a expectativa inicial de que o mecanismo de difusão do óleo é diferente do que ocorre em cápsulas tradicionais, que necessita da indução de um carregamento para que o agente rejuvenescedor comece a ser liberado na mistura.

Em relação ao comportamento volumétrico e funcional da mistura, notou-se que para as misturas de referência, com a adição do APSOSR, houve um decréscimo no volume de vazios, porém, este foi discreto. No entanto, após o envelhecimento e, sob ação cíclica, as amostras com APSOSR apresentaram um aumento estatisticamente significativo no volume de vazios, que provavelmente ocorreu em virtude do tempo dado para a liberação do óleo que resultou na redução da densidade máxima medida da mistura solta e aumento da densidade aparente da mistura compactada. De toda forma, os valores de permeabilidade não foram afetados, visto que a ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade verificada para as misturas com APSOSR foi a mesma da mistura pura.

Os resultados de resistência à tração mostraram que a adição do APSOSR resultou no aumento da propriedade das misturas, no entanto, diante a dificuldade em atingir o valor de resistência à tração estabelecido como mínimo pela norma DNIT 386/99, além dos trabalhos descritos na literatura que tiveram os mesmos entraves, sugere-se a revisão da especificação, visto que não é atualizada há 25 anos. Em relação as misturas submetidas aos ciclos de gelo e degelo, a fim de verificar sua susceptibilidade à umidade, concluiu-se que o APSOSR não permitiu que ocorressem alterações internas tão significativas quanto as verificadas na mistura pura. Este fato foi verificado ao observar que após o envelhecimento, as amostras que continham óleo tiveram um aumento na resistência retida à tração, o que não foi visto nas misturas sem o APSOSR. Quanto ao ensaio de módulo de resiliência, percebe-se a

ação efetiva do óleo na redução da rigidez da mistura após o condicionamento, ao comparar cada mistura de referência com sua respectiva amostra envelhecida.

De maneira geral, percebeu-se que o agregado poroso pode ser utilizado como material carreador de agentes rejuvenescedores, integrando uma solução para o rejuvenescimento de camadas porosas de atrito, sem interferir significativamente nas propriedades funcionais e volumétricas da mistura. No entanto, o processo de extração e recuperação do ligante não permitiu que se obtivesse resultados consistentes acerca da recuperação das propriedades reológicas dos ligantes envelhecidos. Desta forma, não foi possível atestar a efetiva iteração do óleo, sendo necessário para isto a aplicação de metodologias de extração do ligante que garantam a não contaminação das amostras pelo fíler, além de processos de recuperação que evitem o envelhecimento das amostras e permitam a completa remoção do solvente.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Com a finalidade de melhorar e dar continuidade e aprofundamento ao objeto desta pesquisa são sugeridos os seguintes estudos:

- Analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com elevado volume de vazios dosadas com os ligantes do tipo AMP 60/85 e 65/90, na tentativa de obter um melhor resultado no ensaio de resistência à tração;
- Estudar as demais faixas granulométricas, não abordadas nesta pesquisa, com o intuito de determinar a que apresenta uma melhor resistência mecânica, visto a dificuldade em atingir o valor mínimo estabelecido pela DNIT 386/99;
- Comparar os métodos de determinação das temperaturas de usinagem e compactação para aplicação em CPAs e seus efeitos nas propriedades mecânicas da mistura;
- Identificar uma metodologia que permita aferir de modo consistente os reais valores de permeabilidade de revestimentos do tipo CPA, a fim de identificar variações nos coeficientes de permeabilidade de misturas com adição de APSOSR;
- Analisar o protocolo que combina os efeitos de temperatura e umidade, porém, com a temperatura de 85 °C por 5 dias, que são as recomendações do protocolo da AASHTO R-30 e comparar com misturas envelhecidas por este

mesmo protocolo, obtendo assim as implicações reais do parâmetro umidade no envelhecimento da CPA;

- Investigar acerca de uma metodologia eficiente para recuperação do ligante, em que seja possível a retirada completa do solvente ao mesmo tempo que seja reduzido envelhecimento do material.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOHAMER, H.; ELSEIFI, M. A.; MAYEUX, C.; COOPER, S. B.; COOPER JR. S. (2023) **Effects of Asphalt Binder Additives and Industrial Fillers on the Mechanical and Functional Properties of Open Graded Friction Course**. Transportation Research Record 1–15. DOI: 10.1177/03611981231152253
- ABUHASSAN, Y.; ALI, M.; IQBAL, T.; NAZZAL, M.; ASCE, M.; ABBAS, A. (2019) **Effect of chemical solvents on rheological properties of recovered asphalt binders**, Journal of Transportation Engineering, 145(1), pp. 1–10. DOI: 10.1061/JPEODX.0000096.
- ALECRIM, C. M. C. (2021) **Avaliação da utilização de camada porosa de atrito em vias do meio urbano**. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- ALECRIM, C. M. C.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; PEIXOTO, N. G. M.; ALVES, A.; PINHEIRO, G. M. (2022) **Avaliação do desempenho acústico e das características de superfície de camada porosa de atrito em meio urbano**. Revista Transportes. DOI: 10.14295/transportes.v30i1.2581
- ALI, Y.; IRFAN, M.; AHMED, S.; KHANZADA, S.; MAHMOOD, T. (2016) **Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures**. Materials and Structures, v. 49, p. 857-868. DOI: 10.1617/s11527-015-0544-3
- ALVES, A.; SPECHT, L. P.; DRESCH, F., ECHEVERRIA, J. A. S. (2018) **Estudo acústico de tráfego rodoviário rodante sobre pavimentos em concreto asfáltico e com camada porosa de atrito na rodovia BR 158/RS**. Revista Transportes. DOI: 10.14295/transportes.v26i4.1410
- ALVES, A. (2019) **Comportamento mecânico, funcional e ambiental de misturas asfálticas porosas**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS – ASSHTO R30-02. **Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA)**. Washington, D.C., 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D 7064: **Standard Practice for Open-graded Friction Course (OGFC) Mix Design**. West Conshohocken, PA, 2021.
- _____. ASTM D 6390: **Standard test method for determination of draindown characteristics**. West Conshohocken, 2011.
- AHMAD, M.; MANNAN, U. A.; ISLAM, M. R. e TAREFDER, R. A. (2018) **Chemical and mechanical changes in asphalt binder due to moisture conditioning**. Road Materials and Pavement Design, 19 (5), pp. 1216-1229. DOI: 10.1080/14680629.2017.1299631
- ARRUDA, S. M. (2021) **Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande, PB.

- ASLI, H.; AHMADINIA, E.; ZARGAR, M.; KARIM, M.R. (2012) **Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder**. Construction and Building Materials, v. 37, p. 398-405. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) NF-P98-254-2: **Essais Relatifs aux Chaussés – Mémoire de Propriétés Liées à la Perméabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2: Détermination du Pourcentage de Vides Communicantes des Matériaux Liés**. 1993.
- BANERJI, A. K.; CHAKRABORTY, D.; MUDI, A.; CHAUHAN, P. (2022) **Characterization of waste cooking oil and waste engine oil on physical properties of aged bitumen**, Materials Today: Proceedings 59 1694–1699. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.401
- BAO, S.; LIU, Q.; RAO, W.; YU, X.; ZHANG, L. (2020) **Synthesis and characterization of calcium alginate-attapulgit composite capsules for long term asphalt self-healing**. Construction and Building Materials, 20, 120779. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120779
- BARABASZOVA, K. C.; MARTYNKOVA, G. S.; SULCOVA, K. (2016) **Mechanical Treated Vermiculite Particles – Surface and Size Characteristics**, Adv. Sci. Lett. 22 (3), 681–684. DOI: 10.1166/asl.2016.6903.
- BARROS, A. G. (2020) **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande, PB.
- BELL, C. A.; SOSNOVSKE, D. (1994) **Aging: Binder Validation**. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington-DC.
- BENLI, A.; KARATAS, M.; ANIL TOPRAK, H. (2020) **Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures**. Construction and Building Materials, v. 239, p. 117895, abr. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117895
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. (2022) **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos). Rio de Janeiro, RJ. Brasil.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **SUMÁRIO MINERAL**. Brasília, 2015. 146 p.
- BROWNRIDGE J. (2010) **The role of an asphalt rejuvenator in pavement preservation: use and need for asphalt rejuvenation**. Compendium of papers from the first international conference on pavement preservation, p. 351– 364.
- BURR, B. L.; DAVISON, R. R.; GLOVER, C. J.; BULLIN, J. A. (1990) **Solvent removal from asphalt**, Transportation Research Record, 1269.
- CAMILLO, J. (2012) **Diversidade genética, conservação in vitro de germoplasma e análise do conteúdo de DNA nuclear em palma de óleo {Elaeis guineensis Jacq. e Elaeis oleifera (Kunth) Cortés}**. Tese de Doutorado. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília, DF.

- CAMPOS, O. S. (1998). **Análise de Comportamento de Trecho Piloto de Revestimento Poroso com Ligante Modificado por Polímero**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- CAPUTO, H. P. (1973). **Mecânica dos solos**. 3a Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ.
- CASADO, R.; LÓPEZ, V. B.; MONTOLIU, C. M.; IBÁÑEZ, V. C.; PEDRAJAS, J.; SANTARÉN, J., (2014). **Addressing durability of asphalt concrete by selfhealing mechanism**. *Procedia Social and Behavioural Sciences*, 162, 188–197. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.199
- CASADO, R.; LASTRA-GONZÁLEZ, P.; CASTRO-FRESNO, D.; PEREZ, L. M. (2021) **Synthesis, characterisation and mechanical impact of novel capsules using porous aggregates containing asphalt rejuvenator as an effective way to restore aged binder properties**. *International Journal of Pavement Engineering*, DOI: 10.1080/10298436.2021.1950718
- CAVALLI, M.C.; ZAUMANIS, M.; MAZZA, E.; PARTL, M. N.; POULIKAKOS, L. D. (2018) **Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with biobased rejuvenators**, *Compos. Part B Eng.* 141-174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.12.060.
- CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L. B., SOARES, J. B. (2015) **Guia Técnico - Utilização de Ligantes em Serviço de Pavimentação**. 1a ed. (ABEDA). 166p. Rio de Janeiro, RJ. Brasil.
- CHEN, H. e BAHIA, H. (2021) **Modelling effects of aging on asphalt binder fatigue using complex modulus and the las test**. *International Journal of Fatigue*, Vol. 146. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106150
- CHEN, X.; ZHU, H.; DONG, Q.; HUANG, B. (2017) **Case study: performance effectiveness and cost-benefit analyses of open-graded friction course pavements in Tennessee**. *Int. J. Pavement Eng.* 18 (11) 957–970. DOI: 10.1080/10298436.2016.1138112
- CHIA, G. S., LOPES, R., CUNHA, R. N. V., ROCHA, R. N. C. & LOPES, M. T. G. (2019) **Repetibilidade da produção de cachos de híbridos interespecíficos entre caiaué e dendezeiro**. *Acta Amazonica*, 39, 249-254. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00819
- CHU, L.; FWA, T.F. (2019) **Functional sustainability of single- and double-layer porous asphalt pavements**. *Constr. Build. Mater.* 197, 436–443. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.162.
- CINTRA, C. L. D. (2013) **Masonry mortar with thermo-acoustic insulating properties based on vermiculite and recycled rubber aggregates from wasted tires**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP.
- CLEMENTE, T. E., & CAHOON, E. B. (2009). **Soybean oil: Genetic approaches for modification of functionality and total content**. *Plant Physiology*, 151, 1030–1040. DOI: 10.1104/pp.109.146282

COSTA, W. W. M. L. (2019) Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido paraibano. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande, PB.

COSTA, D. B. (2022) **Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade à presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande, PB.

CRAVO, M. C. C. (2016) **Efeitos Do Envelhecimento Térmico E Fotoquímico De Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz De Agregados Finos.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER) ES 386: **Pavimentação – Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero – Camada Porosa de Atrito.** Rio de Janeiro, RJ, 1999.

_____. DNER - ME 383: **Desgaste por Abrasão de Misturas Betuminosas com Asfalto Polímero – Ensaio Cântabro.** Rio de Janeiro, RJ, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) ME 130: **Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro.** Rio de Janeiro, RJ, 2010.

_____. DNIT – ME 131: **Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola.** Rio de Janeiro. 2010.

_____. DNIT – ME 155: **Material asfáltico – Determinação da penetração.** Rio de Janeiro. 2010.

_____. DNIT – EM 129: **Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico.** Rio de Janeiro. 2011.

_____. DNIT– ME 135: **Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência,** Rio de Janeiro, RJ, 2018.

_____. DNIT– ME 180: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida,** Rio de Janeiro, RJ, 2018.

_____. DNIT– ME 136: **Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral,** Rio de Janeiro, RJ, 2018.

_____. DNIT– ME 413: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas.** Brasília, 2019.

_____. DNIT– ME 427: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas.** Brasília, 2020.

_____. DNIT– ME 411: **Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas.** Brasília, 2021.

- _____. DNIT– ME 428: **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados**. Brasília, 2022.
- DRESCH, F. (2016) **Comportamento de Misturas Asfálticas Tipo Camada Porosa de Atrito (CPA)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS.
- DOMINGOS, M.; PAMPLONA, T.; FAXINA, A.; GIGANTE, A. (2012) **Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho**. Revista Transportes, v. 20, n. 2, p. 15–22. DOI: 10.4237/transportes.v20i2.560
- DUMAN, O.; TUNÇ, S.; POLAT, T.G. (2015) **Determination of adsorptive properties of expanded vermiculite for the removal of C. I. Basic Red 9 from aqueous solution: Kinetic, isotherm and thermodynamic studies**, Appl. Clay Sci. 109–110, 22–32. DOI: 10.1016/j.clay.2015.03.003.
- ELKASHEF, M., WILLIAMS R. C., COCHRAN, E. W (2018) **Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures**. International Journal of Fatigue. Vol. 108, Pag. 90-95. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.11.013
- ELKASHEF, M.; PODOLSKY, J.; WILLIAMS, R. C.; COCHRAN. E. W. (2018) **Introducing a soybean oil-derived material as a potential rejuvenator of asphalt through rheology, mix characterisation and Fourier Transform Infrared analysis**, Road Mater. Pavement Des. 19 (8) 1750–1770, DOI: 10.1080/14680629.2017.1345781.
- EL-SHORBAGY, A. M.; EL-BADAWY, S. M.; GABR, A. R. (2019) **Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement**. Construction and Building Materials, v. 220, p. 228-237. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.180
- FERREIRA, W. L. G. (2015) **Análise do fluxo d'água em revestimentos asfálticos com diferentes permeabilidades**. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- FOGEIRO, J. S. **Cidade Esponja - Aplicação do Conceito e Métodos no Bairro Marechal Gomes da Costa, Porto**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, PT.
- GALDINO, L. M A. (2022) **Drenagem urbana na área da Praça da Cruz Vermelha: um estudo de caso da aplicação do conceito de cidades esponjas para atenuação de alagamentos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- GAMA, D. A. (2013) **Utilização do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande, PB.
- GARCÍA, A. *et al.* (2010) **Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete**. Journal of Hazardous Materials, 184, 603– 611. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.078

- GARCIA, E.S.H. (2017) **Análise da redução da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes em função da redução do volume de vazios**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- GE, D.; YOU, Z.; CHEN, S.; YOU, L. (2017) **Using DSR and FTIR to evaluate asphalt binder extracted and recovered from asphalt mixtures**, in 1st Congress on Technical Advancement. Duluth: Congress on Technicãl Advãncement, pp. 89–105.
- GENCEL, O. *et al.* (2014) **Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results**. Energy and Buildings, v. 70, p. 135–144. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.047
- GOH, S. W.; YOU, Z. (2012). **Mechanical properties of porous asphalt pavement materials with warm mix asphalt and RAP**. Journal of Transportation Engineering, v. 138, n. 1, p. 90-97. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000307
- GU, F.; MA, W.; WEST, R. C.; TAYLOR, A. J.; ZHANG, Y. (2019) **Structural performance and sustainability assessment of cold centralplant and in-place recycled asphalt pavements: a case study**. Journal of Cleaner Production. v. 208, 20. Pg. 1513-1523. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.222
- GUILHERME, D. D. P.; CABRAL, K. C.; SOUZA, W. R. M. (2020) **Estudo do uso de vermiculita expandida nas propriedades mecânicas de argamassas leves**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v.25, n.4. DOI: 10.1590/S1517-707620200004.1194
- GUIMARÃES, J. M. F. *et al.* (2013) **Desagregação e permeabilidade de concretos asfálticos drenantes com ligantes modificados**. IAG279-01-2013. Programación de Trabajos Técnicos XVII Cila 2013, Casa Santo Domingo, Antigua Guatemala, Lunes.
- HASSAN, A. T. & TODD, L. K. (2017) **Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen**, Road Mater. Pavement, 131–140. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304257.
- HESP, S. A. M.; SHURVELL, H. F. (2010). **X-ray fluorescence detection of waste engine oil residue in asphalt and its effect on cracking in servisse**. International Journal of Pavement Engineering, v. 11, n. 6, p. 541-553. DOI: 10.1080/10298436.2010.488729
- HOSPODKA, M.; HOFKO, B.; BLAB, R. (2018) **Impact of distillation temperature on the solvent residue and viscoelastic properties of asphalt binders**. Road Materials and Pavement Design, 19(6), pp. 1275–1287. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304234.
- HUNG, A. M., GOODWIN, A. e FINI, E. H. (2017) **Effects of water exposure on bitumen surface microstructure**. Construction and Building Materials, 135, 682–688. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.002
- HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. (2015) The Shell Bitumen Handbook. 6^a edition, London, England, ICE Publishing.
- HUURMAN, R. M.; MO, R.; WOLDEKIDAN, M. F. (2011) **Unravelling porous asphalt concrete towards a mechanistic material desing tool**. Road Materials and Pavement Design, 11:3, 583-612. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690295

- JACQUES, G. E. (2018) **Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- JALKH, R.; EL-RASSY, H.; CHEHAB, G. R.; ABIAD, M. G. (2018) **Assessment of the physicochemical properties of waste cooking oil and spent coffee grounds oil for potential use as asphalt binder rejuvenators**. Waste and Biomass Valorization, v. 9, n. 11, p. 2125-2132. DOI: 10.1007/s12649-017-9984-z
- JAVID, M.A. (2016) **Effect of polymer modification on rheological properties of asphalt**. Journal of Civil Engineering Research, v. 6, n. 3, p. 55-60. DOI: 10.5923/j.jce.20160603.02
- JI, J.; YAO, H.; SUO, Z.; YOU, Z.; LI, H.; XU, S.; SUN, L. (2017) **Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 3. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001769
- JING, R. (2019). **Ageing of Bituminous Materials: Experimental and Numerical Characterization**. Tese de Doutorado. Delft University of Technology. Holanda.
- JOHNSON, C. D.; WORRALL, F. (2007) **Novel granular materials with microcrystalline active surfaces-Waste water treatment applications of zeolite/vermiculite composites**. Water Res. 41 (10) 2229–2235. DOI: 10.1016/j.watres.2007.01.047.
- KAMISAH, Y., ADAM, A., WAN NGAH, W. Z., GAPOR, M. T., AZIZAH, O., & MARZUKI, A. (2005). **Chronic intake of red palm olein and palm olein produce beneficial effects on plasma lipid profile in rats**. Pakistan Journal of Nutrition, 4, 89–96. DOI: 10.3923/pjn.2005.89.96
- KANDHAL, P. (2002) **Design, construction, and maintenance of open-graded asphalt friction courses**. Informations Series 115. National Asphalt Pavement Association. Lanham, MD.
- KARGARI, A.; ARABANI, M.; MIRABDOLAZIMI, S. M. (2022) **Effect of palm oil capsules on the self-healing properties of aged and unaged asphalt mixtures gained by resting period and microwave heating**. Construction and Building Materials 316, 125901. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125901.
- KING, R.; HARVEY, G. G.; COOK, J. (2007) **Improved porous friction courses (PFC) on asphalt airfield pavements**. Ridgeland: Burns Cooley Dennis, Inc. 157 p. Airfield Asphalt Pavement Technology Program.
- KLENZENDORF, J. B.; CHARBENEAU, R; ECK, B; BARRETT, M. (2011) **Measurement and Modeling of Hydraulic Characteristics of Permeable Friction Course (PFC)**. American Society of Civil Engineers, p.1-11.
- KNABBEN, R. M. (2012) **Estudo do Ruído Pneu Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimentos de Pavimento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- KNABBEN, R.; TRICHÊS, G.; GERGES, S.; VERGARA, E. (2016). **Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures**. Applied Acoustics. 114. p. 266-274. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.08.008.

- KODRAT, I.; SOHN, D.; HESP, S. (2007) **Comparison of polyphosphoric acid – modified asphalt.** Research Board, v. 1998, p. 47–55. DOI: 10.3141/1998-06
- KOKSAL, F., GENÇEL, O., KAYA, M. (2015) **Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures.** Construction and Building Materials, v. 88 pp. 175-187. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021
- KOKSAL, F.; MUTLUAY, E.; GENÇEL, O. (2020) **Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene.** Construction and Building Materials, v. 236, p. 117789. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117789
- LASTRA-GONZÁLEZ, P.; INDACOECHEA-VEGA, I.; CALZADA-PÉREZ, M.A.; CASTRO-FRESNO, D.; CARPIO-GARCÍA, J. (2017) **Analysis of the skid resistance and adherence between layers of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste.** Construction and Building Materials 133, 163–170. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.063
- LEE, T. (2012) **Removal of heavy metals in storm water runoff using porous vermiculite expanded by microwave preparation.** Water, Air, Soil Pollut. 223 (6) 3399–3408, DOI: 10.1007/s11270-012-1119-3.
- LEI, Z.; BAHIA, H.; YI-QIU, T. (2015) **Effect of bio-based and refined waste oil modifiers on low temperature performance of asphalt binders.** Construct Build Mater 86:95–100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.106
- LI, H.; B. DONG, W. WANG, G. ZHAO, P. GUO, Q. MA, (2019) **Effect of waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt.** Applied Sciences 9 (9) 1767. DOI: 10.3390/app9091767.
- LI, M.; ZHAO, Y.; AI, Z.; BAI, H.; ZHANG, T.; SONG, S. (2021) **Preparation and application of expanded and exfoliated vermiculite: A critical review.** Chemical Physics. DOI: 10.1016/j.chemphys.2021.111313
- LIMA, A. T. (2003) **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente.** Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- LIU, X.; ZHANG, Z.; YANG, X. e LIU, Z. (2018) **Influence of asphalt chemical composition on moisture susceptibility of asphalt mixtures.** Petrol Sci. Technol., 36 (16), pp. 1258-1264. DOI: 10.1080/10916466.2018.1468775
- LU, X.; ISACSSON, U. (2002) **Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology.** Constr. Build. Mater. 16 (1) 15–22. DOI: 10.1016/S0950-0618(01)00033-2
- LYONS, K. R.; PUTMAN, B. J. (2013) **Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures.** Construction and Building Materials, v. 49, p.772-780. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.076
- MA, L.; VARVERI, A.; JING, R.; ERKENS, S. (2021) **Comprehensive review on the transport and reaction of oxygen and moisture towards coupled oxidative ageing and moisture damage of bitumen.** Construction and Building Materials, 283, p. 122632. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122632

- MAIA, R. S.; ALECRIM, C. M. C.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; ARAÚJO, V. M. C.; REIS JÚNIOR, H. S. R. (2019) **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.** Comunicação técnica apresentada no XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Balneário Camboriú-SC, Brasil.
- MANSOUR, T. N.; PUTMAN, B. J. (2013) **Influence of Aggregate Gradation on the Performance Properties of Porous Asphalt Mixtures.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, n. 2, p.281-288. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000602
- MARINHO FILHO, P. G. T. (2017) **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.
- MARINHO FILHO, P. G. T. (2023) **Análise do comportamento reológico e do envelhecimento de ligantes asfálticos contendo nanofibrilas de celulose.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.
- MASSEY, B. S. (2002). **Mecânica dos fluidos.** Tradução: Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- MEDEIROS, M. A.; SANSIVIERO, M.T.C.; ARAÚJO, M.H.; LAGO, R.M. (2009) **Modification of vermiculite by polymerization and carbonization of glycerol to produce highly efficient materials for oil removal.** Appl. Clay Sci. 45 (4) 213–219. DOI: 10.1016/j.clay.2009.06.008.
- MEDEIROS, A. F.D; PIMENTEL, R. L.; MELO, R. A. (2018) **Quantificação do efeito benéfico de passagem inferior como barreira acústica.** Revista Transportes. v. 26, p. 63-74. DOI: 10.14295/transportes.v26i3.1622
- MELO NETO, O. M; SILVA, I., M.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, L. F. L.; DUARTE, A. M.; LIMA, R. K. B. (2022). **Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid.** Construction and Building Materials. 349. 128728. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128728.
- MENAPACE, I.; MASAD, E. (2018). **The influence of moisture on the evolution of the microstructure of asphalt binders with aging.** Road Materials and Pavement Design, 1–16. DOI: 10.1080/14680629.2018.1491882
- MEURER FILHO, E. (2001) **Estudos de granulometria para concretos asfálticos drenantes.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.
- MIAO, C.; TANG, Y.I.; ZHANG, H.; WU, Z.; WANG, X. (2014) **Harmful algae blooms removal from fresh water with modified vermiculite.** Environ. Technol. (United Kingdom) 35 (3) 340–346. DOI: 10.1080/09593330.2013.828091.
- MICAELO, R.; AL-MANSOORI, T.; GARCÍA, Á. (2016) **Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules.** Construction and Building Materials, v. 123, p. 734–744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.095

- MOLENAAR, A., HAGOS, E., VAN DE VEN, M. (2010) **Effects of aging on the mechanical characteristics of bituminous binders in PAC**. J. Mater. Civ. Eng. 22, 779e787. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000021
- MOTTA, L. M. G.; TONIAL, I.; LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. (1996) **Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada. Instituto Brasileiro do Petróleo – IBP.
- MOTTA, L. M. G.; F. L. B. RIBEIRO; S. F. ESTEFEN (2010) **Relatório Final: Estudo Comparativo do Comportamento de Fadiga de Misturas Betuminosas com Diferentes Teores de Asfalto**. Convênio PEC 8650, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- MOUILLET, V.; FARCAS, F.; BATTAGLIA, V.; BESSON, S.; PETITEAU, C.; LE CUNFF, F. (2010) **Identification et dosage des fonctions oxygénées présentes dans les liants bitumineux: Analyse par spectrométrie infrarouge transformée de Fourier: Method d'essai**, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 69.
- MULLAPUDI, R. S.; NOOJILLA, S. L. A.; REDDY, K.. (2020). **Effect of initial damage on healing characteristics of bituminous mixtures containing Reclaimed asphalt material (RAP)**. Construction and Building Materials. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120808.
- MUNIZ, M. F.; ROSENO, J. L.; CARVALHO, J. C. (2004). **Anisotropia das propriedades hidráulicas de asfaltos drenantes com agregados calcários**. In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ.
- NABIZADEH, H., HAGHSHEENAS, H. F., KIN, Y-R., ARAGÃO, F. T. S. (2017) **Effects of rejuvenators on high-rap mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures**. Construction and Building Material. Pag. 65 – 73. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.101
- NASCIMENTO, L. A. H. (2021) **Apresentação Petrobrás - Nova função de transferência**. Reunião do dia 16/08/2021.
- NASCIMENTO, R. F. (2021) **Efeito da hidroxipropilmetilcelulose em argamassas leves térmicas à base de vermiculita expandida**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- NASCIMENTO, T. C. B.; FAXINA, A. L. (2017) **Avaliação dos efeitos da radiação ultravioleta sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com PPA e copolímeros SBS e SBR**. Revista Transportes, v. 25, n. 1, p. 73-81. DOI: 10.14295/transportes.v25i1.1100
- NASCIMENTO, T. C. B. (2015) **Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- NAYAK, P.; SAHOO, U. C. (2017) **Rheological, chemical and thermal investigations on an aged binder rejuvenated with two non-edible oils**, Road Mater. Pavement Des. 18 (3) 612–629. DOI: 10.1080/14680629.2016.1182058.
- NUÑEZ, J. Y. M.; DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. (2014) **Susceptibility of Lowdensity polyethylene and polyphosphoric acid-modified Asphalt binders to**

- rutting and fatigue cracking.** *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 509–514. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.002
- OLIVEIRA, C. G. M. (2003) **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas de concreto asfáltico drenante.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- PAMPLONA, T. F. (2013) **Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, SP.
- PESSATTO, V. G. M. (2005) **Estudo das Argamassas e Revestimentos contendo Vermiculita.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO.
- PINHEIRO, J. H. M. (2004) **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos úmido e seco).** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- PINHEIRO, G. S.; VASCONCELOS, K. (2022) **Procedimentos de extração e recuperação de ligantes asfálticos: uma revisão da literatura.** *Revista Transportes*. DOI: 10.14295/transportes.v30i1.2580
- PINTO, L. L. C. A. (2011) **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- PORTUGAL, A.; LUCENA, L.; LUCENA, A.; BESERRA DA COSTA, D. (2017) **Rheological performance of soybean in asphalt binder modification.** *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 4, p. 768–782. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.077
- PUTMAN, B. J.; KLINE, L. C. (2012) **Comparison of Mix Design Methods for Porous Asphalt Mixtures.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(11), 1359–1367. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000529
- PUTMAN, B. J.; LYONS, K. R. (2015) **Laboratory Evaluation of Long-Term Draindown of Porous Asphalt Mixtures.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s.l.], v. 27, n. 10, p.1-7. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.076
- QUEIROZ, B. O.; MELO, R. A. (2015) **Propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas asfálticas porosas com adição de politereftalato de etileno (PET).** In: 29º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Ouro Preto, MG.
- RAFIQ, W.; NAPIAH, M.; HABIB, N.Z.; SUTANTO, M.H.; ALALOUL, W.S.; KHAN, M.I.; MUSARAT, M.A.; MEMON, A.M. (2021) **Modeling and design optimization of reclaimed asphalt pavement containing crude palm oil using response surface methodology.** *Constr. Build. Mater.* 291, 123288. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123288
- RASHAD, A. M. (2016) **Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer.** *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 53–62. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019

- REIS, E. (2002) **Vermiculita no Brasil – Situação Atual**. Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT)/ Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE).
- RINALDI, R.; GARCIA, C.; MARCINIUK, L. L.; ROSSI, A. V.; SCHUCHARDT, U. (2007) **Síntese de éster metílico: Uma proposta contextualizada de experimento para laboratório de química geral**. Química Nova, v. 30, n. 5, p. 1374-1380. DOI: 10.1590/S0100-40422007000500054
- RIVERA, C.; CARO, S.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; SÁNCHEZ, D. B. e KARKI, P. (2022) **Evaluation of the use of a HiMA binder to extend the durability of porous friction courses (PFC)**. International Journal of Pavement Engineering. DOI: 10.1080/10298436.2021.2024186.
- SABESP. **Programa de Reciclagem de Óleo de Fritura da Sabesp (2010)**. São Paulo.
- SALES, P. M. (2015) **Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do CCBit**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.
- SANCHEZ, L. M.; CARO, S.; KIM, Y.R. (2020) **Coupled effects of ageing and moisture on the fracture properties of Permeable Friction Courses (PFC)**. International Journal of Pavement Engineering, 1–13. DOI: 10.1080/10298436.2020.1784417
- SANTOS, F.B.; FAXINA, A.L.; SOARES, S. A. (2021). **Soy-based rejuvenated asphalt binders: Impact on rheological properties and chemical aging indices**. Construction and Building Materials. 300. 124220. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124220.
- SANTOS, K. P.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; SILVA, J. A. A.; COSTA, S. C. F. E. (2015) **Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo**. Revista Matéria, v. 20 n. 2. p. 501-513. DOI: 10.1590/S1517-707620150002.0050
- SCHMIDT, P. (2022) **Especiação de enxofre orgânico em cimento asfáltico de petróleo e suas frações**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Química Analítica, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- SCHNEIDER, D.; MENDES, G. T. L.; FRANZOZI, C. B. P.; MATTOS, J. R. G. (2019) **Comportamento hidráulico e mecânico de uma mistura asfáltica aberta enquadrada como camada porosa de atrito**. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Balneário Camboriú, SC.
- SCHLANGEN, E.; XU, S.; GARCÍA, Á.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J. (2017) **Self-Healing Asphalt: the cure for potholes**. Revista Estradas, n. 22, p. 98-104.
- SHA, A.; JIANG, W. (2018) **Design Philosophy and Architecture of Eco-friendly Porous Pavement Materials**. Journal of Highway and Transport. 31 (9), 1–6.
- SHARMA, A.; CHOUDHARY, R.; KUMAR, A. (2023) **Laboratory Investigation of Draindown Behavior of Open-Graded Friction-Course Mixtures Containing Banana and Sugarcane Bagasse Natural Fibers**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. DOI: 10.1177/03611981231170875

- SHEN, J.; AMIRKHANIAN, S.; MILLER, J.A. (2007) **Effects of rejuvenating agents on super pave mixtures containing reclaimed asphalt pavement**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 19, p. 376–384. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(376)
- SHEN, D. H.; WU, C. M.; HU, J. C. (2008) **Performance evaluation of porous asphalt with granulated synthetic lightweight aggregate**. Construction and Building Materials, v. 22, p. 902-910. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.008.
- SHI, C.; CAI, X.; YI, X.; WANG, T.; YANG, J. (2021) **Fatigue crack density of asphalt binders under controlled-stress rotational shear load testing**. Constr. Build. Mater. 272, 121899. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121899
- SHIRINI, B.; IMANINASAB, R. (2016). **Performance Evaluation of Rubberized and SBS Modified Porous Asphalt Mixtures**. Construction and Building Materials, Vol. 107, pp. 165–171. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.006.
- SILVA LOPES, A. M.; MELO NETO, O. M.; LUCENA, L. C. F. L.; NASCIMENTO, M. V.; SIQUEIRA, M. V.; SOUSA, T. M.; MONTEIRO, A. F. F. Impact of aging protocols on asphalt binder behavior: A laboratory and field study. Case Studies in Construction Materials. v. 19, 2023. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02629
- SILVA, A. F.; FLECK, E.; MELLO, M. I. S.; REIS, M. F. P. (2007) **Reciclagem - óleos de fritura**. Anais: Mostra de trabalhos / projetos dos técnicos de nível superior da prefeitura de Porto Alegre. Porto Alegre, RS.
- SILVA, C. E. B. D. (2005) **Estudo da Permeabilidade de Misturas Asfálticas de Graduação Aberta**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M.; (2020) **Estudo dos efeitos de produtos rejuvenescedores no comportamento físico, químico e reológico de ligante asfáltico envelhecido**. Revista Transporte. DOI: 10.14295/transportes.v28i3.1874.
- SIQUEIRA, M. V. (2023) **Influência da umidade e do envelhecimento térmico em distintas misturas asfálticas à quente**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande, PB.
- SOTOODEH-NIA, Z.; MANKE, N.; WILLIAMS, R. C.; COCHRAN, E. W.; POROT, L.; CHAILLEUX, E.; PRESTI, D. L.; CARRIÓN, A. J. D. B.; BLANC, J. (2019) **Effect of two novel bio-based rejuvenators on the performance of 50% RAP mixes—a statistical study on the complex modulus of asphalt binders and asphalt mixtures**. Road Materials and Pavement Design, v. 22, pp. 1-18. DOI: 10.1080/14680629.2019.1661276
- SOUSA, T. M.; LUCENA, A. E. F. L.; MELO NETO, O. M.; NÓBREGA, E. R. (2023) **Enhancing Workability and Sustainability of Asphalt Mixtures: Investigating the Performance of Beeswax as a Novel Additive for Warm Mix Asphalt**. Construction and Building Materials. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133306
- SOUZA, S. A (2008) **Avaliação da capacidade de escoamento da água em mistura asfáltica drenante: Proposta de ensaio de laboratório**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

- SU, J.F.; SCHLANGEN, E. (2014) **Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt**. Chemical Engineering Journal, 198-199, 298–300. DOI: 10.1016/j.cej.2012.05.094
- SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JÚNIOR, F. I. (2013) **Drenagem subsuperficial de pavimentos conceitos e dimensionamento**. [s.l: s.n.]
- SWAYZE, G. A.; LOWERS, H.A.; BENZEL, W.M.; CLARK, R.N.; DRISCOLL, R.L.; PERLMAN, Z.S.; HOEFEN, T.M.; DYAR, M.D. (2018) **Characterizing the source of potentially asbestos-bearing commercial vermiculite insulation using in situ IR spectroscopy**. Am. Mineral. 103, 517–549, DOI: 10.2138/am-2018-6022.
- TABAKOVIĆ, A.; POST, W.; CANTERO, D.; COPUROGLU, O.; GARCIA, S. J.; SCHLANGEN, E. (2016) **The reinforcement and healing of asphalt mastic mixtures by rejuvenator encapsulation in alginate compartmented fibres**. Smart Materials and Structures, v. 25, n. 8, p. 084003. DOI: 10.1088/0964-1726/25/8/084003
- TAHERKHANI, H.; NOORIAN, F. (2018) **Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP)**. Road Materials and Pavement Design, v. 21, n. 5, p. 1-20. DOI: 10.1080/14680629.2018.1546220
- TAKAHASHI, M. M. (2020). Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- TAKASASHI, S.; PARTL, M. N. (1999). **Improvement of mix design for porous asphalt**. Report 113/11. Swiss Federal Laboratories of Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland.
- TAMURA, K.; SATO, H.; YAMAGISHI, A. (2015) **Desorption of Cs⁺ ions from a vermiculite by exchanging with Mg²⁺ ions: effects of Cs⁺-capturing ligand**, J. Radioanal. Nucl. Chem. 303, 2205–2210. DOI: 10.1007/s10967-014-3744-3.
- TANZADEH, R.; TANZADEH, J.; HONARMAND, M.; TAHAMI, S.A. (2019) **Experimental study on the effect of basalt and glass fibers on behavior of open-graded friction course asphalt modified with nano-silica**. Construction and Building Materials 212, 467–475. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.010
- TAREFDER, A., SENGOZ, H., ABDULSHAFI, M., & AHMED, A. (2019). **Selection of Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt based on Performance Grade and Temperature Susceptibility**. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(9), 04019174. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002784
- TEYMOURPOUR, P.; BAHIA, H. **Linear Amplitude Sweep Test: Binder Grading Specification and Field Validation**. Binder Expert Task Group Meeting, 2014.
- TORRES, P. R. B.; MELO NETO, O. M.; LUCENA, A. E. F. L.; SOUSA, T. M.; KRAU, M. (2024). **Enhancing Sustainability and Performance of Asphalt Binders: Unlocking the Potential of Unsegregated Residual Vegetable Oil**. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering. 48. DOI: 10.1007/s40996-024-01412-x.
- UCHOA, A. F. J.; SILVA ROCHA, W.; FEITOSA, J.P.M.; NOGUEIRA, R.L.; BRITO, D.H.A.; SOARES, J.B.; SOARES, S.A. (2021) **Bio-based palm oil as an additive for asphalt**

- binder: Chemical characterization and rheological properties**, Constr. Build. Mater. 285, 122883. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122883
- UGARTE, J. F. D. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. (2008) **Vermiculita**. In: Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações. 2ª. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. Cap. 38, p. 677-698.
- UZ, V. E; GÖKALP, I. (2020) **Sustainable recovery of waste vegetable cooking oil and aged bitumen: Optimized modification for short and long term aging cases**. Waste Management 110, 1–9. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.012.
- VIRGILIIS, A. L. C. (2009) **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- WAN, Y.; Y. FAN, J. DAN, C. HONG, S. YANG, F. YU, (2019) **A review of recent advances in two-dimensional natural clay vermiculite-based nanomaterials**, Mater. Res. Express. 6 (10) 102002. DOI: 10.1088/2053-1591/ab3c9e.
- WANG, F.; GAO, Z.; ZHENG, M.; SUN, J. (2016) **Thermal degradation and fire performance of plywood treated with expanded vermiculite**. Fire Mater. 40 (3) 427–433. DOI: 10.1002/fam.v40.310.1002/fam.2297.
- WANG, J.; WANG, F.; GAO, Z.; ZHENG, M.; SUN, J. (2016) **Flame Retardant Medium-Density Fiberboard with Expanded Vermiculite**. BioResources, 11. DOI: 10.15376/biores.11.3.6940-6947.
- WANG, Z; LI, X. (2018) **Mechanical Properties and Flame Retardancy of Rigid Polyurethane Foams Containing SiO₂ Nanospheres/Graphene Oxide Hybrid and Dimethyl Methylphosphonate**. Polym. Plast. Technol. Eng. 57 (9), 884–892, DOI: 10.1080/03602559.2017.1354251.
- WANG, C.; HOU, J.; MILLER, D.; BROWN, I.; JIANG, Y. (2019) **Flood risk management in sponge cities: The role of integrated simulation and 3D visualization**. International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 39, 101139. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101139
- WEI, H.; BAI, X.; QIAN, G.; WANG, F.; LI, Z.; JIN, J.; ZHANG, Y. (2019) **Aging mechanism and properties of sbs modified bitumen under complex environmental conditions**. Materials, 12, 1189. DOI: 10.3390/ma12071189
- WEN, R.; HUANG, Z.; HUANG, Y.; ZHANG, X.; MIN, X.; FANG, M.; LIU, Y.; WU, X. (2016) **Synthesis and characterization of lauric acid/expanded vermiculite as form-stabilized thermal energy storage materials**. Energy Build. 116, 677–683. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.01.023.
- WU, H.; YU, J.; SONG, W.; ZOU, J.; SONG, Q.; ZHOU, L. (2020) **A critical state-of-the-art review of durability and functionality of open-graded friction course mixtures**. Construction and Building Materials 237, 117759. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117759

- WURST, J. E.; PUTMAN, B. J. (2013) **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. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000611
- XIA, Z.; WANG, Z. (2019) **Rigid polyurethane/expanded vermiculite/ melamine phenylphosphate composite foams with good flame retardant and mechanical properties**. *E-Polymers*. 19, 563–573, DOI: 10.1515/epoly- 2019-0060.
- XU, H.; GUO, W.; TAN, Y. (2015a). **Internal structure evolution of asphalt mixtures during freeze–thaw cycles**. *Materials and Design*, 86, 436-446. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.073
- XU, H.; GUO, W.; TAN, Y. (2015b). **Permeability of asphalt mixtures exposed to freeze–thaw cycles**. *Cold Regions Science and Technology*, 123, 99-106. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.12.001
- XU, S.; TABAKOVIC, A.; LIU, X.; SCHLANGEN, E. (2018) **Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic**. *Construction and Building Materials*, 169:379-387. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.046
- XU, S., LIU, X., TABAKOVIC, A., SCHLANGEN, E. (2019). **Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete**. *Materials* 12, 168. DOI: 10.3390/ma12010168
- ZARGAR, M.; AHMADINIA, E.; ASLI, H.; KARIM, M. R. (2012) **Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 233, p. 254-258. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.021
- ZHANG, H.; YAO, Y. (2017) **Vermiculite addition to soil decreases N water pollution by over 30%**. *Environ. Chem. Lett.* 15 (3), 507–513. DOI: 10.1007/ s10311-017-0631-5.
- ZHANG, S.; LI, Y.; MA, M.; SONG, T.; SONG, R. (2018) **Storm Water Management and Flood Control in Sponge City Construction of Beijing**. *Water*. 10(8):1040. DOI: 10.3390/w10081040
- ZHANG, H.; LI, H.; ZHANG, Y.; WANG, D.; HARVEY, J.; WANG, H. (2018). **Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler**. *Construct. Build. Mater.* 160, 707e713. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.105
- ZHANG, R.; WANG, H.; JIANG, X.; YOU, Z.; YANG, X.; YE, M. (2018) **Thermal storage stability of bio-oil modified asphalt**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002237
- ZHANG, H.; ZHU, J.; ZHOU, W.; LIU, F.; LI, K. (2019) **Synthesis and thermal properties of a capric acid-modified expanded vermiculite phase change material**. *J. Mater. Sci.* 54 (3) 2231–2240. DOI: 10.1007/s10853-018-2988-7.
- ZHANG, J.; ZHANG, X.; LIANG, M.; JIANG, H.; WEI, J.; YAO, Z. (2020) **Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage**. *Construction and Building Materials*, v. 238. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117778

- ZHANG, J.; HUANG W.; ZHANG, Y.; CAI, Q.; YAN, C.; LV, Q. (2021) **Investigation on the durability of OGFC-5 ultra-thin friction course with different mixes.** Construction and Building Materials, v. 288. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123049.
- ZHAO, K.; WANG, Y.; LI, F. (2019). **Influence of ageing conditions on the chemical property changes of asphalt binders.** Road Materials and Pavement Design. DOI: 10.1080/14680629.2019.1637771