



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UAEC
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGECA
Área de Concentração: Geotecnia

MATEUS VALDEVINO DE SIQUEIRA

**INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE**

Campina Grande – PB

2023

MATEUS VALDEVINO DE SIQUEIRA

**INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE.**

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

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Lêda
Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Izabelle
Marie Trindade Bezerra.

Campina Grande – PB
2023

S618i

Siqueira, Mateus Valdevino de.

Influência da umidade e do envelhecimento térmico em misturas asfálticas à quente / Mateus Valdevino de Siqueira. - Campina Grande, 2023.

125 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, Profa. Dra. Izabelle Marie Trindade Bezerra."

Referências.

1. Geotecnia. 2. Protocolo de Envelhecimento de Misturas Asfálticas. 3. Envelhecimento de Longo Prazo. 4. Temperatura. 5. Umidade. 6. Propriedades Mecânicas. 7. Mistura Asfáltica. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. II. Lima, Izabelle Marie Trindade Bezerra da Costa. III. Título.

CDU 624.13(043)

INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO EM
MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE

MATEUS VALDEVINO DE SIQUEIRA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 07 / 07 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Profª Dsc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Orientadora

Profª Dsc. Izabelle Marie Trindade Bezerra da Costa Lima
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Co-orientadora

Profª Dsc. Carina Silvani
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Examinador interno

Profº Dsc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Examinador interno

Profº Dsc. Fabiano Pereira Cavalcante
JBR Engenharia Ltda
Examinador externo



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 MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): MATEUS VALDEVINO DE SIQUEIRA/ COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^a IZABELLE MARIE TRINDADE BEZERRA DA COSTA LIMA - UAEC/UFCG - COORIENTADORA, DR.^a CARINA SILVANI - PPGECA/UFCG - EXAMINADORA INTERNA, DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG – EXAMINADOR INTERNO, DR. FABIANO PEREIRA CAVALCANTE – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 18/2023). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO EM DISTINTAS MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / NA SALA 02 DO BLOCO CT, LABORATÓRIO DE PAVIMENTOS, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA PRESENCIAL, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA 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 DISSERTAÇÃO, 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, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 07 DE JULHO 2023**



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 10/07/2023, às 08:16, 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 **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/07/2023, às 08:34, 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 **FABIANO PEREIRA CAVALCANTE, Usuário Externo**, em 10/07/2023, às 08:38, 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 10/07/2023, às 10:08, 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 10/07/2023, às 10:35, 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 **Mateus Valdevino de Siqueira, Usuário Externo**, em 10/07/2023, às 10:56, 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 **IZABELLE MARIE TRINDADE BEZERRA DA COSTA LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/07/2023, às 11:03, 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 **3491752** e o código CRC **E802A4A5**.

EPÍGRAFE

“Ave Maria, mãe de Deus, Jesus, nos dê força e
coragem pra carregar a nossa cruz.”

(Luiz Gonzaga)

Dedico este trabalho aos meus pais Edileide Valdevino e Samuel Muniz. Vocês são a luz nas minhas trevas, o porto durante a tempestade. Onde eu estiver, estarão comigo. Eu os amo!

AGRADECIMENTOS

Tornar-se mestre vai além da formação profissional, o trajeto para esse êxito perpassa por um aprendizado humano de proporções inimagináveis. Compreendi que sem o próximo, nada sou, nem serei. Diante disso, há de se agradecer a quem sempre esteve ao meu lado.

A Deus, pelo dom da vida, pela oportunidade de realizar os sonhos, pela saúde e pela fé, mesmo diante das tribulações. A Ele dedico e entrego todos os meus passos. És a minha fortaleza, meu protetor.

À minha orientadora, professora Lêda Lucena, por me desafiar cotidianamente e me forçar a buscar o meu melhor desempenho. Sua criticidade e disciplina são qualidades que levarei sempre comigo. Obrigado por me acompanhar nessa jornada!

À minha coorientadora, professora Izabelle Marie, por sua disponibilidade, atenção, carisma e proatividade. Grato por fazer parte dessa etapa!

Aos meus pais, Samuel e Edileide, pela minha formação, os quais nunca deixaram de ser esforçar e sacrificar em prol do meu desenvolvimento. Vocês são a minha certeza, a minha base, o meu amor incondicional, o meu exemplo. Lutarei por vocês até o meu último dia de vida. Nós três, sempre!

À minha namorada e companheira de vida, Rafaela, quem compartilhou de forma mais íntima essa caminhada. Você foi o meu combustível na alegria e o meu colo na tristeza. Obrigado pela paciência e por me ensinar diariamente o que é ser uma pessoa melhor. O bom da vida é viver ao seu lado, pois não há coisa mais sagrada que o verdadeiro amor.

Ao meu irmão Handerson Valdevino, o fiel escudeiro! Você é um anjo na Terra, o guerreiro do bem! Sua fidelidade e sua bondade são princípios marcantes em minha vida, eu te amo. Estarei com você em quaisquer situações. Tamo junto!

Às minhas melhores amigas e irmãs de vida, Anelise e Alice. Vocês foram presentes que a academia me proporcionou. Obrigado por sempre estarem ao meu lado. Com vocês, compartilhei inúmeros momentos, lembranças que sempre estarão gravadas na minha alma. Contem comigo para o impossível,

eu amo vocês!

Aos meus primos Alexandre Muniz e Bruno Valdevino por todo o companheirismo. Sou muito feliz quando estamos conversando sobre a vida. O nosso amor está no sangue compartilhado!

Aos demais familiares e grandes amigos pelo suporte direto ou indireto para a continuação dessa pesquisa.

À Gabi, Val e Mamady pelo acolhimento pessoal para a continuação dessa jornada. Vocês são pessoas incríveis!

Ao meu amigo Osires, pessoa de empatia rara! Obrigado por sua disponibilidade, atenção e carinho em tempo integral durante essa pesquisa. As universidades precisam de pessoas como você! Sua dedicação é uma característica fundamental para qualquer pesquisador.

Aos meus amigos Leonardo e Manoel por toda a ajuda nesse processo. Grato por abdicarem de vossos tempos para auxiliar na minha caminhada. Vocês ensinaram o que é ajudar o próximo mesmo diante de outras adversidades. Jamais esquecerei disso!

A Cacildo, Fabiano e ao professor Kennedy por me abrirem os caminhos da pavimentação mesmo quando eu ainda não tinha certeza da minha jornada.

A todos os professores do PPGECA, especialmente Ana Maria, a quem encontrei uma amiga na sua companhia.

Aos avaliadores internos e professores Adriano e Carina pela disponibilidade e criticidade positiva nessa pesquisa.

Ao químico Arthur por toda disponibilidade e conhecimento repassado.

Aos técnicos Edmilson, Ismael, Ildinho, Ladjane e Jadilson por todo o suporte.

Aos meus companheiros do LEP: Albaniza, Ana, Conrado, Daniel, Gilson, Jonny, José Daniel, Lara, Paulo, Pedro, Priscila, Sonaly, Talita, Thamires e Thiago. Grato pela disponibilidade e pelo auxílio prestado na compreensão de todo o processo!

Aos meus colegas de turma: Alcidiney, Aline, Bruna, Danylo, Gabriel, Juliette,

Renato, Samuel e Ingridy por dividirem os percalços diários e tornarem o ambiente mais leve.

Às empresas JBR Engenharia, Rocha Cavalcante e Vanguarda pelo fornecimento de materiais.

Ao CNPQ pela bolsa de estudos concedida.

Ao Laboratório de Materiais Multifuncionais e Nanocompósitos (LAMMEN/UFRN) pela realização do ensaio FTIR.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) por viabilizarem o curso de mestrado.

.

RESUMO

O processo de envelhecimento, inerente principalmente ao ligante asfáltico, ocorre de forma mais intensa no envelhecimento a curto prazo, todavia esse fenômeno perdura ao longo do tempo de serviço do pavimento. Nesse sentido, o efeito oxidativo na mistura asfáltica proporciona seu trincamento prematuro e uma compressão mais realista desse fenômeno é necessária para elaboração de projetos futuros. A simulação de envelhecimento em laboratório tem por objetivo representar as situações as quais os materiais estarão submetidos em campo e, portanto, avaliar o comportamento químico, reológico e mecânico. Diante disso, a temperatura e a umidade apresentam-se como variáveis importantes na análise do processo de envelhecimento de misturas asfálticas. Portanto, esta pesquisa avaliou o desempenho mecânico, reológico, químico e físico em misturas asfálticas compostas por Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 e Asfalto Modificado com Polímero (AMP) 55/75 em quatro condições distintas de envelhecimento: sem envelhecimento (i); envelhecimento térmico a curto prazo (ii); envelhecimento térmico a longo prazo (iii) e envelhecimento térmico a longo prazo incluindo umidade (iv). O estudo foi dividido em duas etapas: avaliação reológica, química e física dos ligantes; e investigação mecânica das misturas asfálticas. Na primeira etapa foram realizados os ensaios reológicos: Grau de Desempenho (PG); Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) e Varredura Linear de Amplitude (LAS) para as três condições iniciais de envelhecimento. Na segunda etapa foram realizados os ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Dano por Umidade Induzida (DUI), Módulo de Resiliência (MR), Módulo Dinâmico (MD) e Resistência à Deformação Permanente (*Flow Number*) e a análise química por meio da Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para as quatro condições de envelhecimento. Os resultados reológicos apontam, para ambos os ligantes, aumento na viscosidade, elevação do número de ciclos à fadiga em baixas deformações; elevação do PG e redução da compilância não-recuperável (MSCR). Ademais, o CAP 50/70 apresentou-se mais suscetível ao envelhecimento a longo prazo. Para as misturas asfálticas, o RT e MR aumentaram após o envelhecimento térmico e acréscimo da umidade. A resistência à deformação permanente elevou após o envelhecimento térmico, porém reduziu posteriormente com o incremento da umidade. O impacto térmico é insignificante quando analisado o DUI, entretanto, a inserção da umidade no envelhecimento provocou suscetibilidade à falha de adesão em mistura CAP 50/70; sendo irrisória em AMP 55/75. O MD elevou após envelhecimento térmico para ambos o ligante e a umidade atuou como efeito oxidativo na mistura com CAP 50/70. Por fim, o protocolo analisado considerando o efeito conjunto da umidade e temperatura regional demonstrou-se fundamental para uma avaliação efetiva a longo prazo do comportamento químico, reológico e mecânico de misturas asfálticas, visto que possui uma abrangência de simulação mais fidedigna em comparação aos métodos atuais de envelhecimento.

Palavras-chave: Envelhecimento de longo prazo. Umidade. Temperatura. Propriedades mecânicas. Protocolo de envelhecimento.

ABSTRACT

The aging process, mainly inherent to the asphalt binder, occurs more intensely in short-term aging, but this phenomenon persists throughout the pavement's service life. In this sense, the oxidative effect on the asphalt mix causes its premature cracking and a more realistic compression of this phenomenon is necessary for the elaboration of future projects. The simulation of aging in the laboratory aims to represent the situations to which the materials will be submitted in the field and, therefore, to evaluate the chemical, rheological and mechanical behavior. Therefore, temperature and humidity are important variables in the analysis of the aging process of asphalt mixtures. Therefore, this research evaluated the mechanical, rheological, chemical and physical performance of asphalt mixtures composed of Asphalt Binder (AB) 50/70 and Polymer Modified Asphalt (PMA) 55/75 under four different aging conditions: without aging (i); short-term thermal aging (ii); long-term thermal aging (iii) and long-term thermal aging including humidity (iv). The study was divided into two stages: rheological, chemical and physical evaluation of the binders; and mechanical investigation of asphalt mixtures. In the first stage, the rheological tests were carried out: Degree of Performance (PG); Asphalt binder creep and recovery determined under multiple stresses (MSCR) and Linear Amplitude Sweeping (LAS) for the three initial aging conditions. In the second stage, the mechanical tests of Tensile Strength by Diametral Compression (TS), Damage by Induced Moisture (LT), Modulus of Resilience (MR), Dynamic Modulus (MD) and Resistance to Permanent Deformation (Flow Number) and the chemical analysis using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for the four aging conditions. The rheological results indicate, for both binders, an increase in viscosity, an increase in the number of fatigue cycles at low strains; elevation of PG and reduction of non-recoverable compliance (MSCR). Furthermore, AB 50/70 was more susceptible to long-term aging. For asphalt mixtures, TS and MR increased after thermal aging and moisture addition. The resistance to permanent deformation increased after thermal aging, but reduced later with increasing humidity. The thermal impact is insignificant when analyzing the LT, however, the insertion of moisture in aging caused susceptibility to adhesion failure in AB 50/70 mixture; being negligible at PMA 55/75. The MD increased after thermal aging for both binder and moisture acted as an oxidative effect in the mixture with AB 50/70. Finally, the protocol analyzed considering the joint effect of humidity and regional temperature proved to be essential for an effective long-term evaluation of the chemical, rheological and mechanical behavior of asphalt mixtures, since it has a more reliable simulation range compared to current methods of aging.

Keywords: Long-term aging. Moisture. Temperature. Mechanical properties. Aging protocol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Segregação das frações do ligante asfáltico, com foco nas frações SARA	22
Figura 2 - Representação esquemática dos componentes dos asfaltos	23
Figura 3 - Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem,	25
Figura 4 - Sequência de reações para oxidação de policicloaromáticos	26
Figura 5 - Exemplo de formação de cetona e sulfóxido através da oxidação do carbono benzílico do asfalto	27
Figura 6 - Espectro FTIR típico de um ligante novo e um ligante envelhecido	30
Figura 7 - Evolução do envelhecimento por UV a diferentes espectros de radiação..	31
Figura 8 - Imagens ópticas de ligante 60/70 não envelhecido e envelhecido por diferentes tempos, na presença de luz ultravioleta, calor, oxigênio e umidade	34
Figura 9 - Fluxograma do processo metodológico	45
Figura 10 - Distribuição granulométrica dos agregados	47
Figura 11 – Mistura asfáltica CAP 50/70 antes (a) e após aplicação do dope no ligante asfáltico (b)	48
Figura 12 - Distribuição granulométrica das curvas inferior, intermediária e superior	54
Figura 13 – Determinação do teor de ligante para o ligante CAP 50/70	56
Figura 14 – Determinação do teor de ligante para o ligante AMP 55/75	57
Figura 15 - Corpos de prova em estufa a 95°C por 9 dias para simulação do envelhecimento	59
Figura 16 - Simulador de chuva aplicado para o envelhecimento das misturas asfálticas	60
Figura 17 - Condicionamento de umidade nos corpos de prova.	61
Figura 18 - Resumo das variáveis aplicadas no protocolo de envelhecimento	66
Figura 19 - Espectros de FTIR para os ligantes asfálticos CAP 50/70 submetidos ao processo de envelhecimento	67
Figura 20 - Espectros de FTIR para o ligante asfáltico AMP 55/75 submetido ao processo de envelhecimento	68
Figura 21 - Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico U5070 e U5575.	71

Figura 22 - Viscosidade Rotacional para o CAP 50/70 e AMP 55/75 diante das três condições de envelhecimento térmico	72
Figura 23 - Viscosity Aging Index (VAI) dos ligantes asfálticos	73
Figura 24 - Parâmetro Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) para o ligante AMP 55/75 e CAP 50/70	74
Figura 25 - Índice de envelhecimento para o CAP 50/70 e AMP 55/75.....	75
Figura 26 - Taxa de cisalhamento versus deformação para os níveis de envelhecimento	79
Figura 27 - Curva Integridade (C) vs Dano (D).....	80
Figura 28 - Curvas de Wöhler para os níveis de envelhecimento dos ligantes asfálticos	81
Figura 29 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	84
Figura 30 - Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência.....	87
Figura 31 - Resultados do ensaio de Dano por Umidade Induzida	90
Figura 32 - Resultados do ensaio de Flow Number.....	93
Figura 33 - Curvas mestras das misturas asfálticas analisadas.....	98
Figura 34 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas a 4°C	98
Figura 35 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas a 20°C	99
Figura 36 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas a 40°C	99
Figura 37 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (4°C).....	101
Figura 38 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (20°C) ...	101
Figura 39 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (40°C) ...	102
Figura 40 - Correlação G^* do ligante e MR das misturas para os níveis de envelhecimento térmico: a) CAP 50/70, b) AMP 55/75	106
Figura 41 - Correlação de FN x Jnr ($3,2 \text{ kPa}^{-1}$) obtidos nos protocolos de envelhecimento em laboratório: a) CAP 50/70, b) AMP 55/75	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas comuns empregadas na análise de envelhecimento de ligante asfáltico	28
Tabela 2 - Grupos funcionais presentes nos ligantes asfálticos	29
Tabela 3 - Estudos acerca da influência da água em ligantes e misturas asfálticas.	35
Tabela 4 - Métodos de envelhecimentos em ligantes asfálticos	38
Tabela 5 - Comportamento mecânico de misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento de longo prazo.....	41
Tabela 6 - Coeficientes de ajustes CAI.....	44
Tabela 7 - Caracterização física dos agregados.....	46
Tabela 8 – Caracterização do ligante CAP 50/70 e AMP 55/75.....	49
Tabela 9 - Proporções de agregados para a mistura asfáltica CAP 50/70	54
Tabela 10 - Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial.....	55
Tabela 11 - Resumo dos parâmetros volumétricos da mistura de projeto (CAP 50/70)	55
Tabela 12 - Resumo dos parâmetros volumétricos da mistura de projeto (AMP 55/75)	56
Tabela 13 - Resumo das variáveis aplicadas no protocolo de envelhecimento	66
Tabela 14 - Índices de oxidação para as amostras de ligantes asfálticos submetidas aos protocolos de envelhecimento	69
Tabela 15 - Índices de oxidação para as amostras de ligantes asfálticos U5070 e U5575.....	71
Tabela 16 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos (PG e PG contínuo).....	74
Tabela 17 - Parâmetros obtidos no teste de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)	76
Tabela 18 - Classe de tráfego conforme Jnr a 3.2 kPa	77
Tabela 19 - Classificação do FFL consoante Nascimento (2016).....	82
Tabela 20 - Classificação do FFL dos ligantes envelhecidos	82
Tabela 21 - Teste t de Student - RT.....	86
Tabela 22 - Teste ANOVA - RT	86
Tabela 23 - Teste t de Student - MR.....	89
Tabela 24 - Teste ANOVA - MR.....	89
Tabela 25 - Teste t de Student - DUI	92

Tabela 26 - Teste ANOVA - DUI	92
Tabela 27 - Critérios de Flow Number para diferentes níveis de tráfego	95
Tabela 28 - Teste t de Student - FN.....	96
Tabela 29 - Teste ANOVA- FN	97
Tabela 30 - Teste t de Student - MD.....	103
Tabela 31 - Teste ANOVA - MD.....	104

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

%Rec	Percentual de Recuperação
°C	Graus Celsius
ϵ	Deformação
G*	Módulo de Cisalhamento Dinâmico
Jnr	Compilância não-recuperável
μm	Micrômetro
mm	Milímetro
ηm	Nanômetro
Nf	Número de ciclos até a ruptura
R ²	Coefficiente de determinação
SiO ₂	Dióxido de Silício
Si-OH	Grupo Silanol
W/m ²	Watt por metro quadrado
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Aging Index
AMP	Asfalto Modificado com Polímero
ANT	Associação Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente
CGS	Compactador Giratório Superpave
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EICM	Enhanced Integrated Climatic Model
ERTFO	Extender rolling thin film oven test
F	F de Snedecor
FN	Flow Number
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
GL	Grau de Liberdade
HiPAT	High Pressure Ageing Test
Hz	Hertz

LAS	Varredura Linear de Amplitude
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MAMs	Misturas Asfálticas mornas
MD	Módulo Dinâmico
MQ	Quadrados Médios
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla
MTFOT	Modified Thin Film Oven Test
NA	Não Aplicável
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NRTFO	Nitrogen Rolling Thin Film Oven Test
Pa	Pascal
PAV	Pressure Aging Vessel
PG	Grau de Performance
POB	Pressure Oxidation Bomb
RBV	Relação Betume Vazios
RFT	Rotating Flask Test
RPM	Rotações por Minuto
RT	Resistência à Tração por Compressão por Diametral
RTFO	Rolling thin film oven test
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SQ	Soma dos Quadrados
S-VECD	Simplified-Viscoelastic Continuum Damage
TMN	Tamanho Máximos Nominais
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UV	Radiação Ultravioleta
TFOT	Thin Film Oven Test
VAM	Volume Agregado Mineral
VECD	Teoria do Dano Contínuo Viscoelástico
Vv	Volume De Vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.1.3 Organização do Trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Composição química do ligante asfáltico	22
2.2 Envelhecimento de ligante asfáltico	24
2.2.1 Parâmetros para quantificação do envelhecimento	27
2.3 Fatores que influenciam no envelhecimento de ligantes asfálticos e de misturas asfálticas	31
2.3.1 Radiação ultravioleta	31
2.3.2 Umidade	33
2.3.3 Agregados minerais	37
2.4 Protocolos existentes de envelhecimento de ligantes e misturas asfálticas em laboratório	38
2.4.1 Simulação de envelhecimento em ligantes asfálticos	38
2.4.2 Simulação de envelhecimento em misturas asfálticas	40
2.5 Considerações finais	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 MATERIAIS	46
3.1.1 Agregados	46
3.1.2 Ligante Asfáltico	48
3.2 MÉTODOS	49
3.2.1 Protocolo de envelhecimento aplicado aos ligantes asfálticos	49
3.2.2 Ensaios aplicados aos ligantes asfálticos	51
3.2.3 Dosagem das misturas asfálticas	53
3.2.4 Protocolo de envelhecimento aplicado às misturas asfálticas	57

3.2.5	Ensaio aplicado às misturas asfálticas	61
3.2.6	Análise estatística	65
3.2.7	Síntese dos parâmetros abordados e nomenclatura utilizada.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	ANÁLISE QUÍMICA	67
4.1.1	Infravermelho – FTIR	67
4.2	ANÁLISE REOLÓGICA.....	72
4.2.1	Viscosidade Rotacional	72
4.2.2	Grau de Desempenho - PG.....	73
4.2.3	Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla – MSCR.....	76
4.2.4	Varredura Linear de Amplitude - LAS.....	78
4.3	ANÁLISE MECÂNICA	83
4.3.1	Resistência à tração por compressão diametral – RT	83
4.3.2	Módulo de Resiliência – MR.....	86
4.3.3	Resistência ao dano por umidade induzida – DUI.....	89
4.3.4	Resistência à deformação permanente – FN	93
4.3.5	Módulo dinâmico – MD.....	97
4.3.6	Correlação da rigidez e deformação permanente entre os ligantes e as misturas asfálticas.....	105
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	109
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
5.1.1	Sugestões para pesquisas futuras	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade e o desempenho das misturas asfálticas à quente são aspectos cruciais para o desenvolvimento de infraestruturas rodoviárias sustentáveis e economicamente viáveis. No entanto, ao longo do tempo, essas misturas estão sujeitas ao envelhecimento, um processo complexo que resulta na degradação progressiva das propriedades físicas, mecânicas e reológicas do ligante asfáltico (CZAJKOWSKI; PRZYJAZNY; BOCZKAJ, 2023).

Devido a característica orgânica do ligante asfáltico, esse é o material mais suscetível ao processo de envelhecimento dentro da misturas asfáltica (BARGHABANY *et al.*, 2022). Esse fenômeno ocorre distintamente para diferentes ligantes, todavia outros fatores são responsáveis, também, pelo envelhecimento quando analisado seu comportamento na mistura asfáltica. Nesse sentido, umidade; temperatura; espessura do revestimento; radiação ultravioleta (UV); volume de vazios (Vv), tipologia mineralógica do agregado, entre outros, atuam corroborando para o envelhecimento do ligante asfáltico (HOFKO *et al.*, 2015; HU *et al.*, 2022; OMAIREY; GU; ZHANG, 2021; OMAIREY *et al.*, 2022; QIN *et al.*, 2021).

A temperatura, associada ao tempo de exposição térmica, tem sido identificada como um dos fatores que mais influenciam o envelhecimento das misturas asfálticas (SAFAEI *et al.*, 2014). Isto posto, entende-se por “tempo de exposição térmica” o período o qual o ligante asfáltico está sujeito a temperaturas, seja elevada durante o processo de usinagem, seja durante as condições térmicas ao longo da vida útil.

A exposição térmica resultante das variações climáticas sazonais, da radiação solar direta, especialmente em regiões de alta incidência, e dos processo de produção, transporte e compactação, contribui para a aceleração do processo de envelhecimento. À medida que o ligante asfáltico é exposto a altas temperaturas por um período curto, assim como em menores temperaturas ao longo da vida de serviço, ocorrem alterações significativas em suas propriedades. Smith e Howard (2018) apontam que essas mudanças podem afetar negativamente a resistência ao cisalhamento, a elasticidade, a aderência, a coesão e a capacidade de suportar cargas repetidas.

Durante o período de exposição térmica ocorre a perda dos componentes voláteis presentes no ligante asfáltico que causa redução na quantidade de componentes leves responsáveis pela flexibilidade do ligante, de maneira a aumentar

a viscosidade e reduzir a aderência com os agregados. Uma das principais consequências do envelhecimento térmico do ligante asfáltico é a oxidação desse material que resulta no aumento da rigidez do ligante, diminuindo sua capacidade de deformação e tornando-o mais suscetível a trincas e falhas (RAMADÃ; SAAD, 2017).

Além da temperatura, a umidade é um fator importante a ser considerado na avaliação do envelhecimento do ligante asfáltico. A presença da água pode ter efeitos significativos nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do ligante, influenciando seu desempenho e durabilidade ao longo do tempo (HUANG; GLASER; TURNER, 2012). Nesse sentido, a ocorrência de precipitações pluviométricas, água subterrânea ou até mesmo condensação interna - vapor d'água - nas camadas asfálticas pode desencadear reações químicas e físicas que alteram a estrutura molecular do ligante.

A interação entre a umidade e o ligante pode resultar em processos de hidrólise, oxidação, lixiviação e expansão volumétrica, de maneira a comprometer significativamente a resistência e a ductilidade do material. (FREITAS; FERREIRA; CASTELO BRANCO, 2019). Quando o ligante asfáltico entra em contato com a umidade, pode ocorrer o processo de absorção (penetração da água dentro da estrutura do ligante) e/ou adsorção (a água acumula na superfície do ligante).

A umidade também afeta negativamente a aderência entre o ligante asfáltico e os agregados, diminuindo a resistência ao cisalhamento e aumentando a probabilidade de desprendimento do ligante da superfície dos agregados. Esse comportamento pode resultar em perda de coesão e na formação de vazios e trincas na mistura asfáltica (COSTA, 2022).

Nesse cenário, a presença de umidade pode afetar o desempenho mecânico da mistura asfáltica, visto que o processo oxidativo promove enrijecimento do ligante, de maneira a induzir uma maior afinidade do agregado à água, descolando a película do ligante asfáltico. Diante disso, Xiu, Luo e Liu (2021) verificaram que esse comportamento pode contribuir para a ocorrência de falhas como trincas de fadiga e redução na capacidade de resistência à deformação permanente.

Diferentes metodologias são avaliadas em campo e laboratório com a finalidade de compreender o impacto de cada variável de forma isolada, bem como os efeitos combinados. Esse entedimento é importante não só para melhoramento dos materiais, mas também para maior acertividade na definição dos elementos envolvidos na execução de um pavimento rodoviário. Entretanto, há a necessidade de aprimoramento das técnicas atuais com vista a mitigar a insuficiência representativa

inerente ao processo de simulação em laboratório. O acréscimo de variáveis, a ampliação de materiais analisados, assim como um maior banco de dados são fundamentais para compreensão dos efeitos do envelhecimento de misturas asfálticas. Essa pesquisa avaliou a influência da umidade e do envelhecimento térmico no comportamento de misturas asfálticas à quente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito do envelhecimento térmico a longo prazo e a influência da umidade no comportamento químico, reológico e mecânico de ligantes e misturas asfálticas à quente convencional e modificada por polímero SBS.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar as mudanças químicas ocasionadas tanto pelo envelhecimento térmico como pela umidade nos ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75 mediante ensaio FTIR.
- Investigar reologicamente o efeito do envelhecimento térmico a longo prazo em ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75.
- Analisar o desempenho mecânico de misturas asfálticas compostas por CAP 50/70 e AMP 55/75 submetidas ao envelhecimento térmico a longo prazo.
- Estudar a influência da umidade nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas compostas por CAP 50/70 e AMP 55/75.

1.1.3 Organização do Trabalho

Essa dissertação é composta por 5 capítulos, sendo apresentada a seguir uma breve descrição dos assuntos abordados em cada um deles.

- Capítulo 1 – compreende a Introdução, Objetivos e Organização do trabalho;
- Capítulo 2 – aborda a Fundamentação Teórica, com os conceitos relacionados à química do ligante; os métodos usuais para quantificar o envelhecimento nesse material; as variáveis significativas para o envelhecimento de misturas asfálticas e os principais protocolos para simular envelhecimento de ligante e mistura asfáltica em laboratório.
- Capítulo 3 – consiste na descrição dos métodos experimentais e/ou

procedimentos de ensaios utilizados, bem como os materiais e equipamentos aplicados.

- Capítulo 4 – expõe-se os resultados obtidos com as devidas discussões;
- Capítulo 5 – apresenta-se as conclusões do trabalho com sugestões para pesquisas futuras.

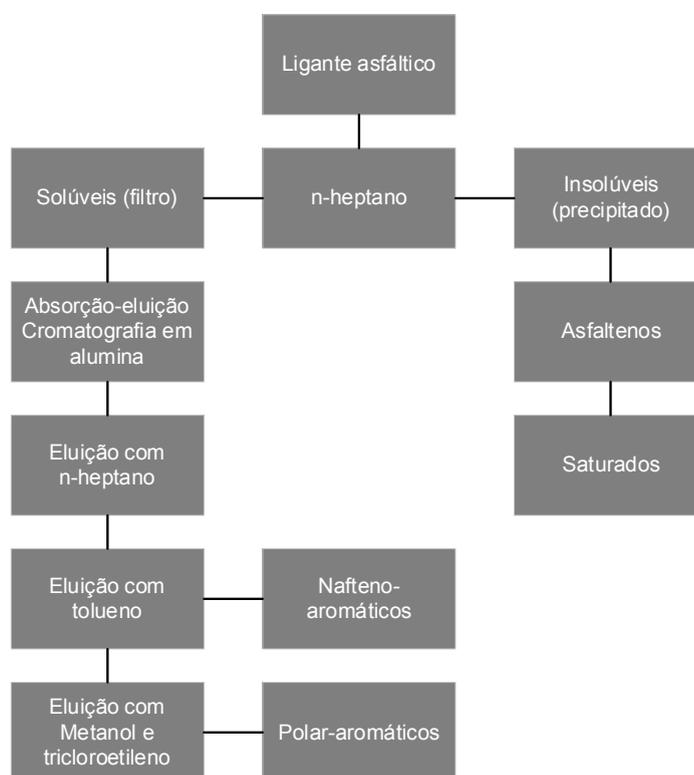
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são compiladas informações sobre os temas discutidos obtidas a partir do embasamento literário. Serão abordados tópicos relativos a química do ligante asfáltico, parâmetros para quantificação do envelhecimento, metodologias de envelhecimento de ligantes e misturas asfálticas.

2.1 Composição química do ligante asfáltico

O ligante asfáltico é caracterizado como um aglutinante de cor escura, não volátil, obtido por destilação ou refino do petróleo, composto por hidrocarbonetos e contém heteroátomos, como oxigênio, nitrogênio, enxofre, vanádio, níquel, entre outros (CRAVO, 2016). Nesse sentido, Marinho (2017) aponta que devido à elevada complexidade química, a metodologia mais utilizada para a separação e avaliação das frações do ligante asfáltico é a técnica SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas, Asfaltenos). A Figura 1 apresenta as frações constituintes do ligante asfáltico.

Figura 1 - Segregação das frações do ligante asfáltico, com foco nas frações SARA



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Segundo Bernucci *et al.* (2022) os principais compostos químicos do ligante asfáltico extraídos pelo SARA são:

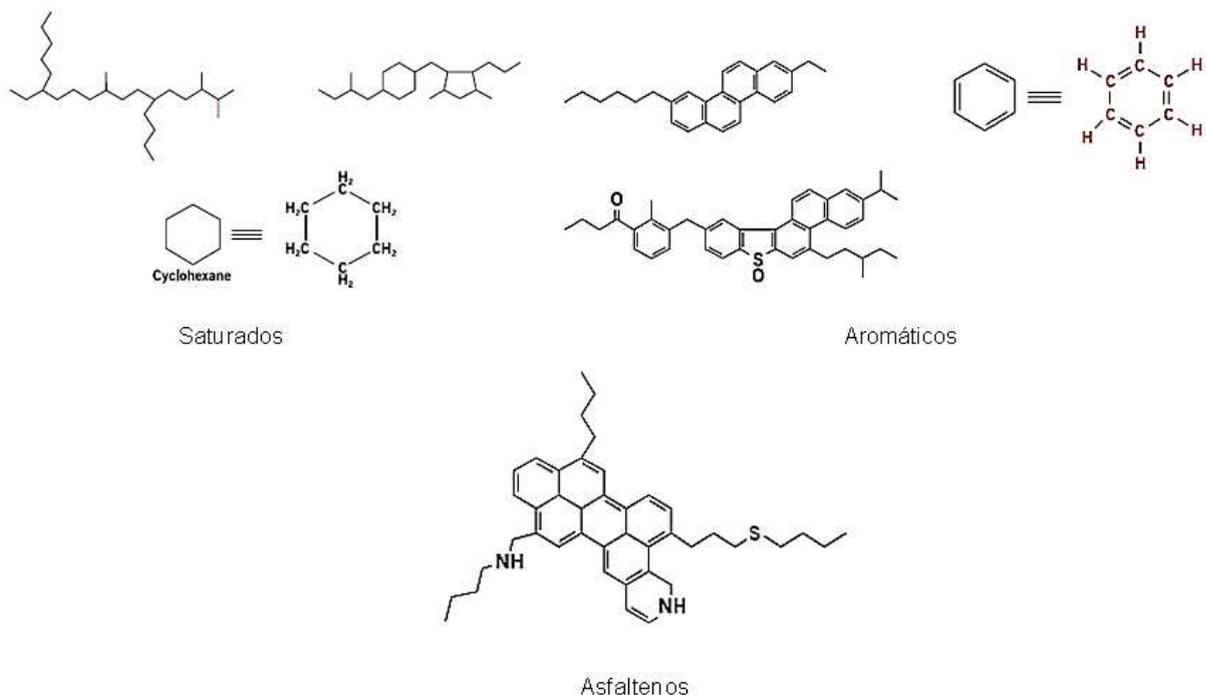
- Asfaltenos: aglomerados constituídos por compostos polares e polarizáveis que se formam por meio de associações intermoleculares. Esses aglomerados são

constituídos por hidrocarbonetos naftênicos condensados e cadeias saturadas de comprimento reduzido. Eles se apresentam na forma de sólidos amorfos de cor preta ou marrom e formam de 5 a 25% do ligante asfáltico. O quantitativo e a forma do asfaleno rege a elasticidade e viscosidade do material.

- **Aromáticos:** componentes de baixa massa molar encontrados em maior proporção no asfalto (40 a 65%) e desempenham o papel de dispersão e peptização dos asfaltenos. Eles constituem um líquido viscoso amarelo polar, com cadeias de carbono não saturadas.
- **Saturados:** são cadeias retas e ramificadas de hidrocarbonetos, sendo óleos viscosos não polares transparentes (5 a 20% do asfalto).
- **Resinas:** compostos constituídos principalmente por hidrogênio e carbono, com uma pequena quantidade de oxigênio, enxofre e nitrogênio. Apresentam-se como sólidos ou semissólidos de cor marrom-escuro, possuindo uma natureza polar e alta adesividade. O comportamento do ligante como solução (sol) ou gelatina (gel) é governado pelas proporções de resinas e asfaltenos.

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática dos componentes químicos dos ligantes asfálticos comentados anteriormente.

Figura 2 - Representação esquemática dos componentes dos asfaltos



Fonte: Adaptado de Shell (2015)

Conforme Whiteoak (1991), os componentes do ligante asfáltico apresentam as seguintes características:

- Os compostos saturados têm um efeito adverso na suscetibilidade térmica do ligante asfáltico. Em maior proporção, eles promovem o amolecimento do produto.
- Os componentes aromáticos atuam como plastificantes, contribuindo para a melhoria das propriedades físicas do ligante asfáltico.
- As resinas têm um impacto negativo na suscetibilidade térmica, similar aos compostos saturados. No entanto, elas auxiliam na melhoria da ductibilidade e na dispersão dos asfaltenos.
- Os asfaltenos influenciam positivamente a suscetibilidade térmica e aumentam a viscosidade do ligante asfáltico.

2.2 Envelhecimento de ligante asfáltico

A compreensão do envelhecimento dos ligantes asfálticos é importante para determinar a vida útil de um pavimento, uma vez que é um dos principais causadores da redução prematura deste. Isso ocorre devido às alterações no comportamento reológico e na composição química do material provocadas pelo processo de envelhecimento (ZHANG *et al.*, 2018).

Nesse cenário, o envelhecimento promove um aumento da rigidez do ligante asfáltico, verificado pelo aumento da viscosidade ao longo do tempo, associado as temperaturas e tempo de exposição os quais o material encontra-se submetido (AN *et al.*, 2022). Dessa forma, o excesso de rigidez pode promover o trincamento antecipado da mistura asfáltica. Entretanto, a mitigação do efeito de deformação permanente em rodovias sujeitas a elevado tráfego e temperatura é um aspecto positivo para o desempenho mecânico de misturas betuminosas envelhecidas (CRAVO, 2016).

Diante disso, alguns fatores impactam no enrijecimento do ligante asfáltico, desde o seu processo de usinagem até o fim da vida útil de serviço (MORAES, 2014; PETERSEN, 2009):

(a) Oxidação: reação do oxigênio com o ligante, cuja intensidade depende da composição do material e da temperatura, sendo o principal responsável pelo endurecimento irreversível do asfalto.

(b) Volatilização: evaporação das frações mais leves dos ligantes quando sujeitos a temperaturas acima do ponto de ebulição (aproximadamente 150°C). Processo significativo no momento da usinagem de misturas asfálticas.

(c) Polimerização: é a reação de combinação de moléculas menores para formar compostos de maior massa molar, o que resulta em um progressivo endurecimento do material.

(d) Tixotropia: é o fenômeno no qual o material de estrutura coloidal muda seu estado de gel para sol ou vice-versa.

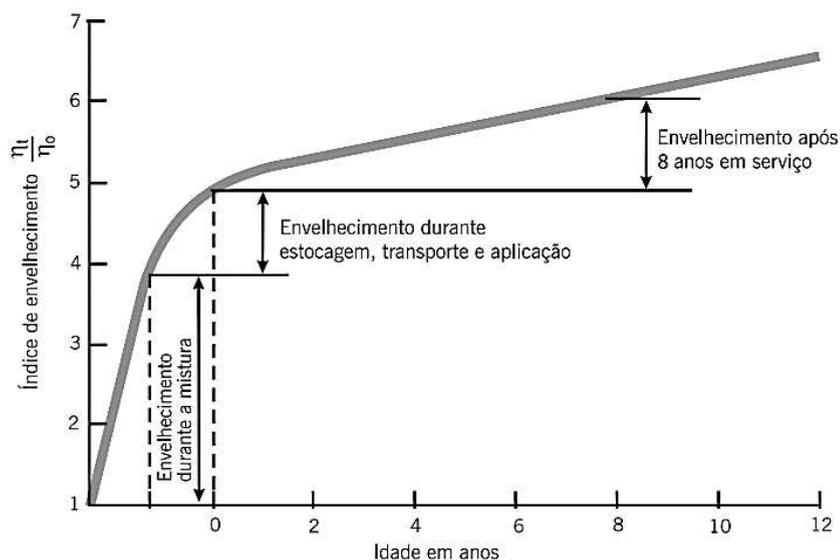
(e) Sinerese: é a separação dos líquidos menos viscosos dos mais viscosos da estrutura coloidal do ligante asfáltico, causada pela contração ou rearranjo da estrutura do material devido às suas mudanças físicas e químicas.

(f) Separação: é a remoção dos constituintes oleosos, resinas ou asfaltenos do ligante, processo da adsorção de agregado poroso.

O processo de envelhecimento de ligantes asfálticos ocorre em duas etapas: envelhecimento a curto prazo (i) – período de usinagem, transporte e compactação das misturas asfálticas; e envelhecimento a longo prazo (ii) – durante a vida útil do pavimento (NASCIMENTO, 2015; TAKAHASHI, 2020).

A Figura 3 apresenta a correlação entre o tempo de serviço do ligantes asfáltico e o seu índice de envelhecimento.

Figura 3 - Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo e durante vários anos de serviço



Fonte: Bernucci *et al.*, 2010

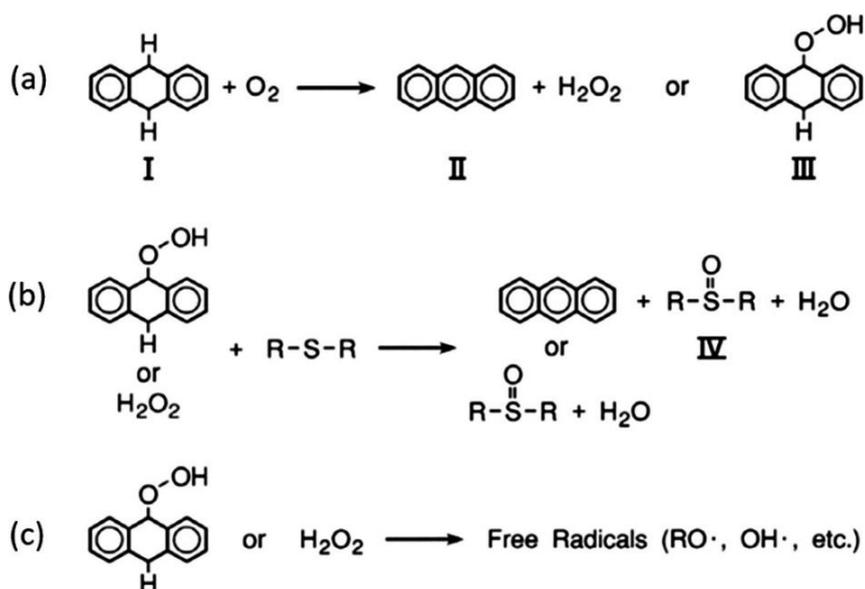
Evidencia-se o efeito do envelhecimento de forma significativa no período de curto prazo e posterior evolução em menor gradiente no envelhecimento a longo prazo. Durante a fase de usinagem, é adicionada uma camada fina de ligante asfáltico (com espessura entre 6 e 19 micros) sobre os agregados minerais previamente

aquecidos. Esse processo ocorre em altas temperaturas, normalmente superiores a 150°C, e em um tempo de exposição relativamente curto. Durante essa etapa, há uma rápida volatilização das frações de aromáticos e um aumento na fração de asfaltenos (FERDENÁNZ-GÓMEZ *et al.*, 2013).

No envelhecimento do ligante asfáltico em um curto espaço de tempo, tanto a volatilização quanto a oxidação ocorrem em paralelo. Enquanto a volatilização é predominantemente um fenômeno físico que culmina na perda dos componentes voláteis do ligante asfáltico (avaliada pelo percentual de perda de massa antes e após o ensaio de RTFO), a oxidação é um processo químico que pode gerar consequências mais complexas no comportamento reológico do material, tornando-o mais difícil de ser mensurado. À medida que o ligante asfáltico sofre oxidação grupos carbonila (C=O) são formados, aumentando a polaridade do composto e tornando-o mais propenso a se associar com outros compostos polares. (NASCIMENTO, 2015; WOO *et al.*, 2008).

O efeito da oxidação térmica foi analisado por Petersen e Glauser (2011), os quais ilustraram a dualidade do mecanismo de oxidação do ligante. O primeiro, correspondente a policíclicos aromáticos e possui uma rápida oxidação. Esse processo é verificado na Figura 4 por meio do di-hidro-antraceno. Durante a primeira reação, o oxigênio reage com hidroaromáticos para formar hidroperóxido, que pode reagir com sulfetos para gerar sulfóxidos, sofrer aromatização ou decompor-se em radicais livres.

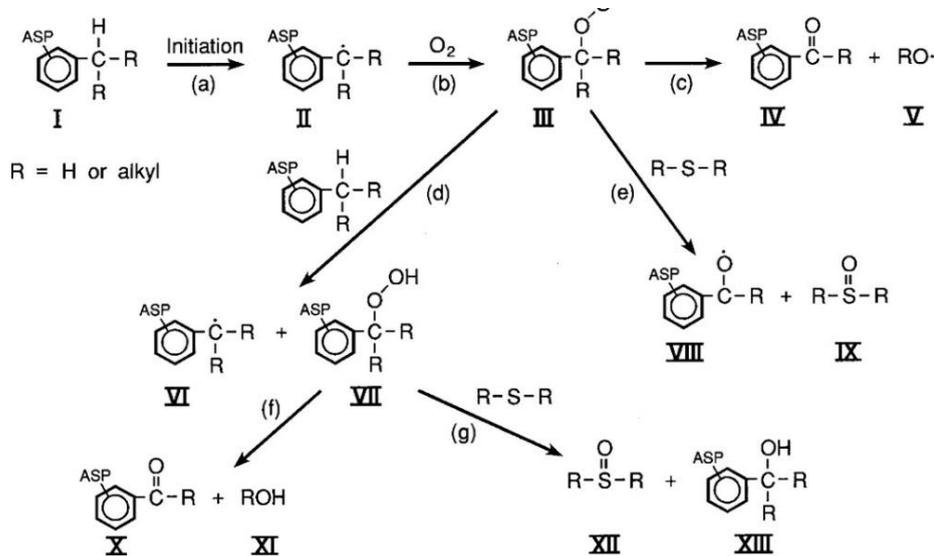
Figura 4 - Sequência de reações para oxidação de policicloaromáticos



Fonte: Adaptado de Petersen (2009)

Posteriormente, ocorre o segundo período de reações (cinética mais lenta) as quais envolvem carbonos benzílicos, resultando principalmente na formação de cetonas e grupos funcionais sulfóxido. A formação de cetonas durante a oxidação do ligante asfáltico está correlacionada, indiretamente, com o aumento de asfaltenos e sua viscosidade. A Figura 5 apresenta um modelo do envelhecimento oxidativo do ligante asfáltico.

Figura 5 - Exemplo de formação de cetona e sulfóxido através da oxidação do carbono benzílico do asfalto



Fonte: Adaptado de Petersen (2009)

2.2.1 Parâmetros para quantificação do envelhecimento

O envelhecimento provoca um incremento na viscosidade e no ponto de amolecimento, resultando na diminuição da capacidade de penetração do ligante. Sendo assim, torna-se possível estabelecer índices de envelhecimento para quaisquer propriedades físicas avaliadas (CONG *et al.*, 2016; TAUSTE *et al.*, 2018).

Essa resposta física do envelhecimento é função de alterações químicas na estrutura do ligante asfáltico por meio do processo de envelhecimento. Diante disso, análises para verificação da formação de grupos oxigenados; distribuição das frações genéricas; morfologia e tamanho de moléculas são fundamentais para compreender o desempenho reológico do ligante e, por conseguinte, da mistura asfáltica (LOPES *et al.*, 2014; SUN *et al.*; 2014; TAKAHASHI, 2020).

Nesse sentido, o estudo de Weigel e Stephen (2017) avaliou as quatro frações (SARA) por meio do seu peso molecular médio utilizando combinações lineares. Os autores verificaram que o comportamento físico, reológico e o processo de envelhecimento de um ligante asfáltico pode ser derivado de análise SARA. Além

disso, constatou-se que a influência dessas frações reduz com a diminuição da temperatura.

Sendo assim, o envelhecimento de ligantes asfálticos pode ser avaliado quantitativamente (direto ou indireto) por diversas técnicas. A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais métodos abordados na literatura.

Tabela 1 - Técnicas comuns empregadas na análise de envelhecimento de ligante asfáltico

Técnica	Tipologia de análise	Parâmetros analisados
Microscopia de força atômica (AFM)	Microscopia	Microestrutura e propriedades micromecânicas do betume
Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	Químico	Quantidade de grupos carbonilas e sulfóxidos ou quantidade de grupos butadieno
Cromatografia de Camada Fina com Detecção de Ionização de Chama (TLC_FID)	Químico	Teor de saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos
Cromatografia de permeação em gel de alta pressão (HP-GPC)	Químico	Número de grupos químicos e peso molecular médio
Teste de Ponto de Amolecimento	Empírico	Aumento de temperatura de amaciamento ou índice de envelhecimento
Teste de penetração	Empírico	Incremento de Penetração ou Taxa de Envelhecimento
Brookfield ou determinação da viscosidade rotacional	Reológico	Índice de envelhecimento de viscosidade em diferentes temperaturas
Reologia de cisalhamento dinâmico (DSR): teste de varredura de frequência	Reológico	Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*). Ângulo de fase (δ)
Teste de reologia de cisalhamento dinâmico (DSR): determinação de $G^*/\sin\delta$	Reológico	Resistência à Deformação Plástica
Teste de reologia de cisalhamento dinâmico (DSR): determinação de $G^*\sin\delta$	Reológico	Resistência à fadiga

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

- **Espectroscopia no Infravermelho - FTIR**

A espectroscopia de infravermelho é uma técnica que possibilita a identificação dos grupos funcionais presentes em uma substância. O procedimento se baseia na

aplicação um feixe de luz infravermelha contendo múltiplos comprimentos de onda direcionado a amostra. Os compostos químicos presentes no material absorvem a radiação em determinadas faixas de comprimento de onda, resultando em uma redução na transmitância da luz (PORTUGAL, 2016).

Nesse sentido, Marinho (2017) aponta que a análise por FTIR é utilizada em compostos de matéria orgânica, polimérica e inorgânicos. O método permite a identificação dos compostos de carbolina (cetonas, anidridos dicarboxílicos e ácidos carboxílicos) e sulfóxidos que estão presentes no ligantes asfáltico após o processo de envelhecimento (SILVEIRA, 2018).

A Tabela 2, apresentada por Yao *et al.* (2016), fornece os grupos funcionais do ligante asfáltico que contêm a ligação carbonila (C=O), os quais servem como referência para a identificação dos números de onda.

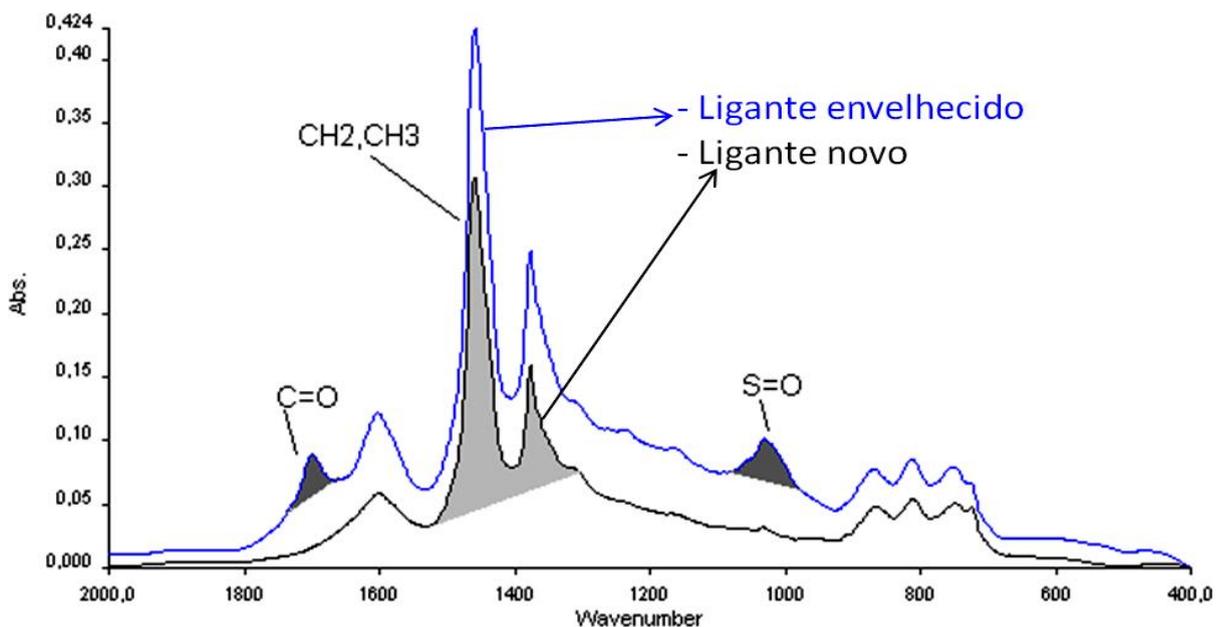
Tabela 2 - Grupos funcionais presentes nos ligantes asfálticos

Assinatura de banda	Número de onda (cm ⁻¹)
S=O alongamento do asfalto	1030
C=C alongamento (aromático) do asfalto	1603
C=O alongamento (conjugado) do asfalto	1700
C=O alongamento (carbonila) do asfalto	1670-1820
C=O alongamento (aldeído) do asfalto	1720-1740
C=O alongamento (amida) do asfalto	1640-1690
C=O alongamento (anidrido) do asfalto	1800-1830
C=O alongamento (éster) do asfalto	1735-1750
O-H alongamento do asfalto	3594-3735
C-H dobra simétrica de CH ₃ do asfalto	1376
C-H dobra assimétrica do -(CH ₂) _n - do asfalto	1437-1458
C-H alongamento simétrico (alifático) do asfalto	2853
C-H alongamento assimétrico (alifático) do asfalto	2954

Fonte: Yao *et al.* (2016)

A aplicação da técnica FTIR é regularmente aplicada para análise do envelhecimento de ligante asfáltico por meio do nível de oxidação (ZHANG *et al.*, 2019; YIHUA *et al.*, 2021). Diante disso, Gennessaux (2015) apresenta um resultado típico de FTIR para ligantes asfálticos em condição virgem e envelhecido, conforme Figura 6.

Figura 6 - Espectro FTIR típico de um ligante novo e um ligante envelhecido



Fonte: Gennessaux (2015)

Nessa perspectiva, uma das principais análises para avaliação quantitativo do efeito oxidativo nos espectros de funções oxigenadas (grupos carbolina, hidróxidos e sulfóxidos) ocorre por meio do método do limite fixo. Essa metodologia determina o percentual da área da banda de carbolina, hidróxido e sulfóxido em relação a área total das bandas, de acordo com as equações 1, 2 e 3.

$$I_{C=O} = \frac{\text{Área da banda de carbonila centrada em torno de } 1700 \text{ cm}^{-1}}{\sum \text{Área das bandas de espectro entre } 4000 \text{ e } 400 \text{ cm}^{-1}} \quad (\text{equação 1})$$

$$I_{S=O} = \frac{\text{Área da banda de carbonila centrada em torno de } 1030 \text{ cm}^{-1}}{\sum \text{Área das bandas de espectro entre } 4000 \text{ e } 400 \text{ cm}^{-1}} \quad (\text{equação 2})$$

$$I_{O-H} = \frac{\text{Área da banda de hidroxila centrada em torno de } 3200 \text{ cm}^{-1}}{\sum \text{Área das bandas de espectro entre } 4000 \text{ e } 400 \text{ cm}^{-1}} \quad (\text{equação 3})$$

A utilização do método das áreas permite identificar a progressão das áreas dos espectros analisados para verificação do processo oxidativo, determinando, portanto, os índices de sulfóxidos, carbonilas e hidroxilas. Michalica, Daucik e Zanzotto (2008) apontaram, ainda baseado no FTIR, a verificação do envelhecimento de ligante asfáltico por meio dos métodos de “vale a vale” e “dencovolução de Fourier”. Essas técnicas permitem uma análise sem a consideração de áreas negativas, todavia não são utilizadas de forma ampla atualmente.

2.3 Fatores que influenciam no envelhecimento de ligantes asfálticos e de misturas asfálticas

O envelhecimento de ligantes asfálticos, devido à temperatura, ocorre concomitantemente a outras variáveis. Esse processo perdura ao longo da vida útil do pavimento, sendo assim, a discussão de componentes da mistura asfáltica e intempéries atuantes são fundamentais para melhor compreensão desse fenômeno.

2.3.1 Radiação ultravioleta

A intensidade da radiação é regida pela energia associada ao comprimento de onda, sendo que comprimentos de onda menores possuem maior energia, resultando em uma interação mais vigorosa com o material exposto. No contexto do pavimento asfáltico, a presença da radiação ultravioleta (UV) no espectro solar desempenha um papel significativo como iniciadora de reações de degradação que ocorrem na superfície do pavimento (CRAVO, 2016).

O processo de foto-oxidação ocorre na faixa de onda entre 300 nm a 350 nm na luz solar, embora o método para simulação em laboratório ainda não possua normativa (HU *et al.*, 2018; TAUSTE *et al.*, 2018). Diante disso, Liu *et al.* (2022) avaliaram o efeito UV em distintos ligantes asfálticos em faixas de 320 nm a 400 nm; radiação de 8 W/m² após envelhecimento térmico a curto prazo. A Figura 7 apresenta a morfologia do ligante sobre as citadas condições:

Figura 7 - Evolução do envelhecimento por UV a diferentes espectros de radiação



Fonte: Liu *et al.* (2022)

Os autores observaram o processo de branqueamento à medida que ocorria o envelhecimento UV para maiores bandas, o que indicou uma carbonização da superfície do ligante asfáltico, condizente ao estudo de Das *et al.* (2014). Para comprimento de onda de 340 nm a 360 nm, foi possível verificar a formação predominante de fissuras, o que indica o comportamento mais significativo desse

espectro no envelhecimento de ligantes asfálticos. Por fim, indiretamente, os pesquisadores observaram a mitigação do surgimento de trincas em ligante SBS, o que pode ser um indicativo da menor suscetibilidade desse material ao envelhecimento UV.

Ademais, o efeito do envelhecimento por UV encontra-se fortemente correlacionado à temperatura. Entretanto, devido à ausência normativa, diversas metodologias foram empregadas utilizando uma faixa de variação de 25 a 80°C concomitantemente à radiação UV (FENG *et al.*, 2013; LIU *et al.*, 2014).

Zeng *et al.* (2015) avaliaram dois tipos de ligantes asfálticos (convencional e modificado com SBS) submetendo-os a três temperaturas (30°C; 50°C e 70°C) para envelhecimento paralelo com UV. Os autores observaram que para elevada temperatura (70°C), a associação com UV é capaz de promover taxas de redução de massa em quatro vezes para o ligante convencional e três vezes para o ligante com SBS. Esses valores correspondem a um aumento significativo da oxidação e degradação de polímeros, o que prejudica a análise isolada da radiação. Portanto, os autores indicaram a temperatura de 50°C para procedimento de envelhecimentos com UV.

Todavia, o impacto da radiação UV no ligante asfáltico é distinto quando esse material é analisado incorporado na mistura asfáltica. Dessa maneira, a profundidade; o volume de vazios; o tempo de exposição e iluminação adequada são algumas características fundamentais para compreensão do dano por radiação UV. Diante disso, o parâmetro “profundidade” é uma característica essencial para compreender a atuação da foto-oxidação no envelhecimento de ligantes asfálticos (YU; PANG; WU, 2012).

Desse modo, Zheng *et al.* (2018) propuseram o “modelo de envelhecimento por difusão”, explicando o transporte de moléculas asfálticas envelhecidas por UV para regiões inferiores da camada asfáltica. Os pesquisadores utilizaram o Teste de Espectrofotômetro Ultravioleta e o método “*peeling*” para verificar o efeito do envelhecimento UV em distintas espessuras. A transmitância do ligante asfáltico foi de 0% quando a espessura do asfalto estava em torno de 4,5 µm e que a presença de material envelhecido abaixo dessa espessura ocorreu por difusão do ligante da superfície.

De maneira similar, Chen, Zhang e Duan (2020) investigaram o gradiente de envelhecimento para amostras submetidas a distintos tempos de envelhecimento com

espessura de película 3 mm. Os autores extraíram três camadas (1 mm) dessa película mediante procedimento de “*peeling*” e avaliaram propriedades reológicas, distribuições de tamanhos moleculares e teores de grupos funcionais químicos. Os resultados indicaram que o efeito de envelhecimento UV em 6 dias é quase insignificante, mas que após 9 dias esse envelhecimento passa de 1 mm e alcança 2 mm para exposição a 15 dias.

Para essa pesquisa, a radiação UV não será abordada devido à profundidade de análise do envelhecimento na mistura asfáltica, uma vez que o efeito da UV torna-se menos significativo a depender da região da camada asfáltica. Um maior detalhamento está posto na metodologia, descrito no Item 3.2.1.

2.3.2 Umidade

A água, em seus distintos estados (sólida, água corrida e vapor de água), provoca efeito deletério no pavimento asfáltico. Comumente avaliada ao longo da vida útil da mistura asfáltica, o incremento da umidade ocorre, principalmente, por meio de fissuras provenientes do tráfego, de forma a locomover as partículas finas, bem como promover a redução da adesão.

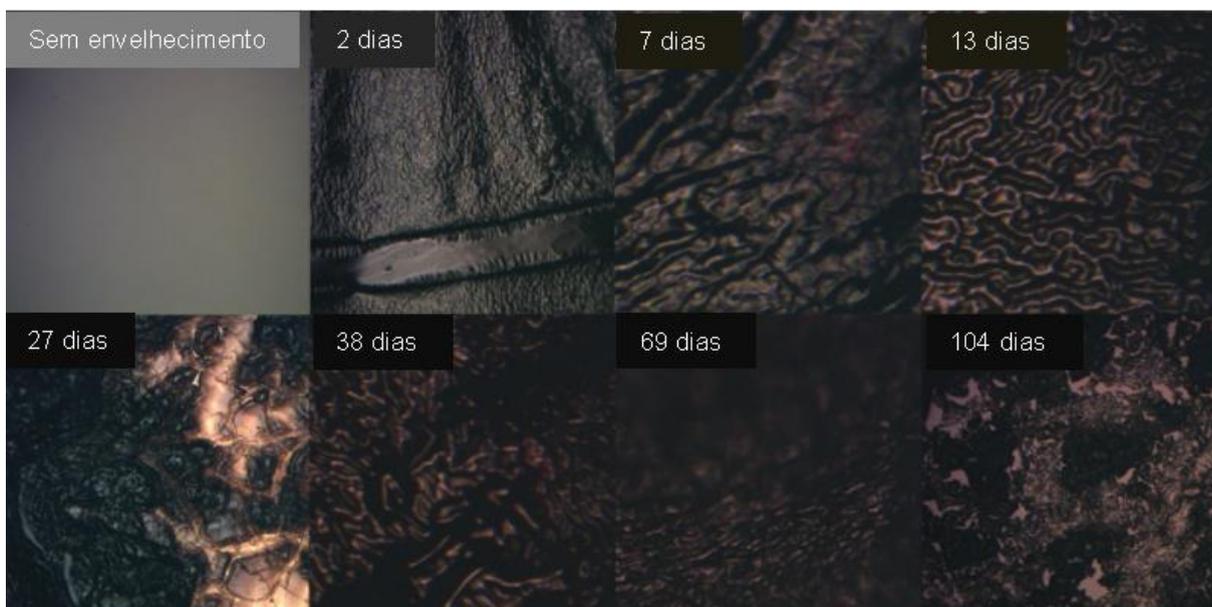
Acerca do dano provocado pela umidade em misturas asfálticas, classificam-se duas situações de falha: falha adesiva ou falha coesiva (KANITPONG; BAHIA, 2005; ABUAWAD; AL-QADI; TREPANIER, 2015; ZHANG *et al.*, 2015). Especificamente acerca da falha adesiva, Furlan (2006) descreve cinco possibilidades:

- Deslocamento: A presença de água induz o deslocamento da camada de ligante que recobre os agregados da superfície.
- Desprendimento: A umidade prévia nos agregados provoca o desprendimento do ligante asfáltico.
- Emulsificação espontânea: A água é incorporada ao ligante, promovendo a formação espontânea de uma emulsão.
- Pressão neutra: A água retida nos vazios da mistura saturada, combinada com as cargas impostas pelo tráfego, percola sob pressão, causando a desaderência do ligante asfáltico.
- Lavagem hidráulica: Sob condições úmidas, os ciclos de compressão e relaxamento induzidos pelo tráfego pesado resultam na expulsão do ar contido nos vazios da mistura, permitindo a penetração da água devido à criação de

um vácuo parcial.

O processo de envelhecimento por umidade é função do tempo e o processo oxidativo aumenta quando atrelado não só a umidade, mas também ao envelhecimento térmico e UV. Menapace e Masad (2018) analisaram a influência da oxidação (com ciclos de umidade) no ligante asfáltico por meio de câmera de envelhecimento acelerado e posterior captação de imagens ópticas, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Imagens ópticas de ligante 60/70 não envelhecido e envelhecido por diferentes tempos, na presença de luz ultravioleta, calor, oxigênio e umidade



Fonte: Menapace e Masad (2018)

Os autores verificaram que o processo de fissuras surgiu após a umidade (13 dias) e que ocorreu uma redução do quantitativo de material devido à presença da água, visto que a diferença de massa nas amostras analisadas ocorreu apenas após o procedimento de inserção da umidade. Esse comportamento é condizente com o estudo de Das *et al.* (2015) e Das *et al.* (2014), os quais afirmaram a existência de um filme constituído de compostos polares solúveis em água proveniente do envelhecimento que é removido após adição da umidade.

A ação deletéria da água tende a promover uma redução na capacidade mecânica da mistura e reológica do ligante asfáltico. Esse comportamento ocorre por meio da oxidação do ligante asfáltico com conseqüente fragilização para ruptura. Guo *et al.* (2022) verificaram que ligantes modificados com polímeros possuem maior adesão ao agregado e que esse comportamento aumenta a medida que amplia o teor de polímero em razão do surgimento de interações Van Der Waals.

A Tabela 3 apresenta um compilado de estudos acerca da influência da umidade e sua relação com o comportamento reológico dos ligantes e mecânico de misturas asfálticas.

Tabela 3 - Estudos acerca da influência da água em ligantes e misturas asfálticas

Autor	Análise	Material	Método	Resultado
Noguero, Quintana e Gómez (2014)	Influência da água na oxidação do ligante asfáltico	Ligante asfáltico convencional	Imersão de ligante asfáltico em água por t = 2, 4, 6, 8, 10 e 12 meses	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentos na rigidez e viscosidade do asfalto são observados após imersão em água destilada por um ano - A consistência do ligante muda e sua rigidez aumenta na presença de água - O envelhecimento e a oxidação são causados pela interação ar-asfalto ou ar-água-asfalto e pelo oxigênio da água
Zhang, Apeagyei e Grenfell (2015)	Influência da composição mineralógica do agregado na resistência à água da adesão agregado/ligante	<ul style="list-style-type: none"> - Ligante asfáltico - Agregados calcários e graníticos analisados 	Testes de tração aplicados (<i>peel</i> , PATTI e <i>pull-off</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Os efeitos do ligante na sensibilidade à umidade é menor do que o efeito dos agregados - A maioria das ligações agregado/ligante nas superfícies de falha transformaram-se de coesivas em adesivas com o tempo de condicionamento - As propriedades de absorção de umidade dos agregados dependem fortemente de certos minerais, incluindo argila, anortita e calcita
Chen <i>et al.</i> (2021)	Efeito da umidade no desempenho à fadiga em ligantes asfálticos	<ul style="list-style-type: none"> - Ligante convencional e modificado com SBS 	<ul style="list-style-type: none"> - 0%, 30%, 50% e 70% de umidade por 16 dias a 70°C - Aplicação do modelo S-VECD pelo ensaio LAS 	<ul style="list-style-type: none"> - O dano aumentou com o aumento da umidade - Quando o nível de deformação era de 10%, o Nf da maioria dos aglutinantes de teste diminuiria com o grau de envelhecimento - O modelo S-VECD para prever o Nf de ligantes após influência da água pode ser bem distribuído perto da linha de igualdade, mas o erro da vida prevista de baixa deformação foi maior do que a de alta deformação
Arabani e Rahimabadi (2023)	Análise da influência da umidade associada ao envelhecimento térmico	<ul style="list-style-type: none"> - Ligantes asfálticos PG58-22 e PG64-16 / - Agregados calcário e granítico 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicação do ensaio de Lottman modificado e Método de energia livre de superfície 	<ul style="list-style-type: none"> - O Envelhecimento do ligante asfáltico em todas as amostras reduziu a energia de adesão -Variações indicaram que o envelhecimento reduz a probabilidade de falha de coesão e aumenta a probabilidade de falha de adesão -Os valores de TSR diminuem devido ao envelhecimento

Guo <i>et al.</i> (2023)	Efeito do envelhecimento e umidade relativa na adesão entre ligante asfáltico e agregado mineral	- Ligante convencional e modificado com SBS - Agregado granítico	- Envelhecimento RTFO e PAV - Aplicação da teoria da energia de superfície e testes ultrassônicos	- O ligante asfáltico não foi sensível à variação da umidade relativa, mas a quantidade total de parâmetros de energia superficial do agregado mineral diminui linearmente com o aumento da umidade relativa - O trabalho de adesão entre o ligante asfáltico e o agregado granítico teve maior probabilidade de ser afetado por moléculas de água gasosas externas - Testes ultrassônicos mostraram que a água invadiu a interface entre o ligante asfáltico e o material agregado, acelerando a falha de adesão
-----------------------------	--	---	--	---

Fonte: Autoria própria (2023)

Uma das principais abordagens acerca do efeito deletério da água ocorre por meio de ciclos de gelo/desgelo. Ainda que não existente em regiões de clima tropical, a exemplo do Nordeste brasileiro, o referido processo é rotineiramente exercido em locais propensos a temperaturas abaixo de 0°C. Diante disso, o pavimento está sujeito a contínuas variações térmicas, as quais induzem o trincamento da mistura asfáltica (DIN; MIR; FARROQ, 2020).

Nessa perspectiva, a norma DNIT 180/2018 - ME avalia a sensibilidade à umidade de misturas asfálticas mediante o condicionamento acelerado em condições saturadas. Esse processo verifica a capacidade coesiva da mistura (estado seco) e da adesão (estado úmido) por meio da relação da resistência à tração. O procedimento objetiva induzir a formação de trincas com base na variação térmica (atuando como um catalisador) e verificar, conseqüentemente, a redução da resistência a longo prazo.

Diante disso, Costa (2022) analisou a variação do número de ciclos (1, 3 e 5) gelo/desgelo e seu impacto no comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas (25, 50, 70 e 100% de material fresado). O autor verificou uma redução de 13 a 45% da resistência à tração, a depender do teor de material fresado e aponta esse comportamento em razão do deslocamento do ligante asfáltico da superfície do agregado, em razão de falha adesiva.

Brondani (2019) verificou a influência do gelo/desgelo (2 ciclos) em misturas compostas por ligante CAP 50/70 e modificado com polímero. Após o processo de ciclagem, mediante realização do ensaio de Módulo Complexo, verificou-se redução da rigidez para quaisquer misturas. Por fim, o autor apontou expressivo afastamento

na curva de dano do CAP 50/70, indicando maior suscetibilidade à ação deletéria da água em relação às compostas por ligante modificado.

2.3.3 Agregados minerais

A influência da mineralogia do agregado por vezes é preterida, uma vez que a parte orgânica da mistura asfáltica é responsável significativamente pelo envelhecimento, e por consequência, rigidez e fragilização da camada asfáltica. Todavia, o tipo de agregado é de suma importância, visto que pode ser responsável pela absorção das frações polares do ligante, de maneira a retardar o processo de oxidação. Nessa perspectiva, os agregados calcários, por exemplo, possuem maior taxa de adsorção, razão da sua capacidade de atrair esses grupos funcionais em sua superfície, de maneira a mitigar o processo de envelhecimento ao longo do tempo (CURTIS; ENSLEY; EPPS, 1993; TAUSTE *et al.*, 2018).

De maneira distinta, outros tipos de minerais atuam como catalisadores no processo de envelhecimento do ligante asfáltico, a exemplo dos agregados compostos por granito e quartzo. Os citados minerais promovem uma oxidação mais acelerada do ligante, uma vez não possuem adequada adsorção, o qual deixa exposto por mais tempo as frações altamente polares, propensas ao processo de interação com oxigênio (ANDERSON *et al.*, 1994; READ; READ e WHITEOAK, 2003). Nessa perspectiva, o avanço em estudos acerca da influência do masticque asfáltico tornou-se relevante, uma vez que as propriedades relacionadas ao trincamento da camada asfáltica ocorre em razão da interface ligante/agregado. Esse comportamento é expressivo em regiões micro, com granulometrias abaixo de 0,075 mm (COUTINHO, 2012).

Ademais, a mineralogia do agregado está fortemente atrelada, no processo de envelhecimento, à ação da umidade. Cala *et al.* (2019) avaliaram três tipologias de agregados (quartzito; granodiorito e serpentinito) com ligante convencional submetidos a quatro ciclos de umidade (0, 1, 3 e 7 dias). Por meio do ensaio de arrancamento tipo “*pull-off*” foi verificado que agregados de origem quartzito apresentaram maior suscetibilidade ao deslocamento do ligante devido ao teor de sílica (carater ácido), indicando que o tipo de agregado interfere neste parâmetro.

A influência da origem mineral corresponde ao nível de acidez apresentado pelo agregado. A presença de grupos silanol (Si-OH) reagindo com água (H₂O) promove a liberação de hidrogênio (H⁺), de maneira a criar uma força de repulsão com

o ligante asfáltico, reduzindo a aderência (DONG *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*; 2018; CALA *et al.*, 2019). Diante disso, verifica-se a necessidade da compreensão conjunta dos fatores intrínsecos à mistura asfáltica, bem como as variáveis extrínsecas presentes no local de projeto, para análise do processo de envelhecimento.

2.4 Protocolos existentes de envelhecimento de ligantes e misturas asfálticas em laboratório

O processo de simulação de envelhecimento em laboratório ocorre, normalmente em duas categorias: análise isolada do ligante asfáltico, uma vez que esse é o material, presente na mistura asfáltica, mais suscetível à oxidação (1) ou investigação do desempenho da mistura asfáltica – análise global (2). Diante disso, apresenta-se, em seguida, os principais métodos de investigação, aplicações e suas limitações.

2.4.1 Simulação de envelhecimento em ligantes asfálticos

O processo de envelhecimento em ligantes asfálticos tem por finalidade analisar o processo de oxidação sofrido pelo material nas etapas de pré-compactação (curto prazo) e ao longo da vida útil (longo prazo).

A Tabela 4 apresenta um resumo acerca dos principais métodos de envelhecimento de ligantes asfálticos em laboratório, tanto para o curto prazo bem como para o longo prazo.

Tabela 4 - Métodos de envelhecimentos em ligantes asfálticos

Método de teste	Temperatura (°C)	Duração	Espessura do filme de ligante
Thin film oven test (TFOT)	163	5 h	3,2 mm
Modified thin film oven test (MTFOT)	163	24 h	100 mm
Rolling thin film oven test (RTFO)	163	85 min	1,25 mm
Extended rolling thin film oven test (ERTFO)	163	8 h	1,25 mm
Nitrogen rolling thin film oven test (NRTFO)	163	75 min	1,25 mm
Rotating Flask Test (RFT)	163	150 min	-
Shell microfilm test	107	2 h	5 mm
Modified Shell microfilm test	99	24 h	20 mm

Modified Shell microfilm test	107	2 h	15 mm
Rolling microfilm oven test (RMFOT)	99	24 h	20 mm
Modified RMFOT	99	48 h	20 mm
Tilt-oven durability test (TODT)	113	168 h	1,25 mm
Alternative TODT	115	100 h	1,25 mm
Thin film accelerated ageing test (TFAAT)	130 ou 113	24 ou 72h	160 mm
Modified rolling thin film oven test (RTFOM)	163	75 min	1,25 mm
Iowa durability test (IDT)	65	1000 h	3,2 mm
Pressure oxidation bomb (POB)	65	96 h	30 mm
Accelerated ageing test device/Rotating cylinder ageing test (RCAT)	70-110	144 h	2 mm
Pressure ageing vessel (PAV)	90-110	20 h	3,2 mm
High pressure ageing test (HiPAT)	85	65 h	3,2 mm

Fonte: Adaptado de Takahashi (2020) apud Airey (2003)

Dentre as metodologias apresentadas, comumente são aplicados o método do RTFO (envelhecimento a curto prazo) e PAV (envelhecimento a longo prazo), uma vez que são utilizados na especificação SUPERPAVE. Os procedimentos consistem:

- RTFO: aplica-se o processo de envelhecimento mediante injeção de calor (temperatura a 163°C) e reação com oxigênio por um período de 85 minutos conforme a norma ASTM D2872 (2022).
- PAV: o resíduo oriundo do RTFO é submetido a uma temperatura de 100°C por 20 horas, além da atuação de uma pressão de 2,07 MPa, conforme regido pela norma ASTM D6521 (2022).

O envelhecimento RTFO é aplicado de forma rotineira na comunidade científica e técnica, sendo utilizado para simulações em Misturas Asfálticas Mornas (MAMs) – com reduções de temperatura – e em Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ) para temperaturas convencionais (HOFKO; PUB, 2016; ARAFAT; WASIUDDIN, 2019; TIAN *et al.*, 2022). Entretanto, o método RTFO levanta críticas acerca principalmente da sua capacidade representativa para envelhecimentos de misturas modificadas com polímero, uma vez que 163°C pode não corresponder a uma adequada viscosidade para deslizamento da película de ligante no frasco de vidro (HOSSAIN; WASIUDDIN,

2019).

Nessa conjuntura, Yan, Huang e Tang (2017) avaliaram o RTFO perante o MTFOT em diferentes temperaturas de envelhecimento. Por meio de análise reológica e método FTIR, os autores verificaram a similaridade no índice de carbolina para definir uma indicação de fluidez. Como conclusão, atestaram que para um ligante modificado com polímero SBS (4,5%), mantendo-se o tempo de ensaio, a temperatura deveria ser elevada a 178°C.

De maneira similar, o envelhecimento com uso de PAV tem por finalidade simular o envelhecimento de 6 a 8 anos de vida de serviço do pavimento, entretanto questionamentos são realizados acerca da sua representatividade em relação ao envelhecimento em campo. Smith *et al.* (2018) avaliaram ligantes extraídos (2 e 4 anos) de duas espessuras distintas de um pavimento em relação a amostras produzidas em laboratório e submetidas ao PAV em diferentes períodos de envelhecimento. Os autores verificaram que o método atual possui coerência com camada mais profunda (5,0 a 6,3 cm), todavia amostras em superfície (1,3 cm) o procedimento é subestimado. Posto isto, observa-se uma defasagem nos métodos atuais para envelhecimento de ligantes asfálticos, o que pode indicar uma incompatibilidade com o envelhecimento ocorrido em análises com misturas asfálticas.

2.4.2 Simulação de envelhecimento em misturas asfálticas

O processo de envelhecimento de misturas asfálticas em laboratório tem por finalidade simular o dano que ocorre não só no processo de usinagem e compactação, mas também ao longo da vida útil do pavimento. De maneira distinta ao estudo de envelhecimento em ligantes asfálticos, uma análise global a nível de mistura permite compreender o efeito do esqueleto pétreo; relação de volume/vazios; profundidade da camada; umidade; tráfego; dentre outros.

Nesse sentido, o método usual para aplicação de envelhecimento em laboratório é conduzido pela norma AASHTO R30 (2010). Tal procedimento é dividido em duas etapas:

- STOA: a mistura asfáltica é posta solta em bandeja por um período de $4h \pm 5$ minutos a temperatura de $135^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. A cada hora é necessário revolver o material para garantir homogeneidade. Essa etapa corresponde à oxidação que ocorre na mistura, bem como absorção do ligante, durante a etapa de pré-compactação.
- LTOA: a amostra compactada deve ir à estufa por $120\text{ h} \pm 0,5\text{ h}$ a

temperatura de 85°C ± 3°C. Esse procedimento visa a representar a etapa de oxidação que ocorre ao longo da vida útil do pavimento.

Outra metodologia para etapa de envelhecimento a curto prazo é proposta pelo método SUPERPAVE. Nesse âmbito, o envelhecimento ocorre em estufa durante 2 horas à temperatura de compactação da mistura. Ressalta-se que para misturas compostas por agregados com absorção maior que 2%, esse período é de 4 horas à temperatura de compactação.

Entretanto, a análise de protocolos para envelhecimento de misturas asfálticas é comumente verificada em outras circunstâncias. A Tabela 5 apresenta um compilado de estudos os quais pesquisadores avaliaram o comportamento mecânico de distintas misturas asfálticas sob diferentes níveis de envelhecimento.

Tabela 5 - Comportamento mecânico de misturas asfálticas submetidas ao envelhecimento de longo prazo

Autor	Condição	Resultados
Rondon <i>et al.</i> (2012)	Em campo	- Aumento da rigidez da mistura, resistência a deformação permanente e resistência à fadiga durante os primeiros 29 meses de exposição ambiental - Tendência oposta observada entre 30 e 42 meses
Farrar <i>et al.</i> (2013)	Em campo	- Envelhecimento não limitado aos 25 mm superiores do pavimento - Gradiente de envelhecimento na mistura asfáltica observado em campo
West <i>et al.</i> (2014)	Em campo	- Menor Envelhecimento de mistura morna em relação ao CAUQ durante produção - Diferença reduzida entre mistura morna e CAUQ envelhecidas - Grau equivalente de ligante e absorção para misturas mornas e CAUQ após dois anos de envelhecimento
Tarbox e Sias Daniel (2012)	Laboratório (2 e 5 dias a 85°C)	- Maior resistência à deformação permanente com LTOA - Interdependência observada entre STOA e LTOA
Azari e Mohseni (2013)	Laboratório (2, 4 e 8 dias a 85°C)	- Maior rigidez com LTOA - Reduzida diferença na rigidez entre misturas mornas e CAUQ com LTOA
Brown and Scholz (2000)	Campo x laboratório (4 dias a 85°C)	- Rigidez: LTOA de 4 dias a 85°C equivalente a 15 anos de envelhecimento em campo nos Estados Unidos
Epps Martin <i>et al.</i> (2014)	Campo x laboratório (1 – 16 semanas a 60°C)	- Maior rigidez com envelhecimento em campo e LTOA de laboratório - Rigidez: Mistura morna = CAUQ, após seis a oito meses de envelhecimento em campo

		- Rigidez: STOA de duas horas a 135°C para CAUQ e duas horas a 116°C para mistura morna acrescida de LTOA de 4 a 8 semanas a 60 ° C = primeiro verão de envelhecimento em campo
Genessaux (2015)	Laboratório (STOA 4h a 85° + LTOA 9 dias a 85°C)	- Maior rigidez no LTOA, principalmente para WMA - Redução na vida de fadiga com o LTOA para HMA e WMA contendo RAP.
Zang <i>et al</i> (2021)	Laboratório (10 dias a 95°C + umidade + UV - diferentes camadas)	-Redução da vida de fadiga no LTOA para baixas temperaturas - Desempenho mecânico melhorou gradativamente em altas temperaturas
Cherkaoui <i>et al</i> (2022)	Laboratório (PAV - 3 a 9 dias)	- Tipo de ligante e teor de fíler foram as variáveis preponderantes no envelhecimento - Utilização de areia calcária reduziu o envelhecimento
Arruda (2021)	Laboratório (STOA 4h a 85° + LTOA 5 dias a 85°C)	- Aumento da rigidez e resistência à tração. - Acréscimo de capacidade de resistência à deformação permanente principalmente para altos teores de RAP
Costa (2022)	Laboratório (STOA 4h a 85° + LTOA 5 dias a 85°C + ciclo gelo-desgelo)	- Redução do desempenho de fadiga e SCB - Aumento da degradação da estrutura ao condicionamento Lottman

Fonte: Adaptado Yin *et al.* (2017)

Observa-se que o envelhecimento térmico a longo prazo possui a tendência crescente de enrijecimento das misturas para quaisquer protocolos avaliados. Todavia, um dos principais pontos de questionamentos para simulações de envelhecimento em laboratório é correlação dessa oxidação ao período correspondente em campo.

Nesse intuito, Yin *et al.* (2017) analisaram amostras produzidas em laboratório submetidas ao envelhecimento LTOA de três dias a 85°C ou duas semanas a 60°C e obtidas em campo de sete regiões distintas. Os autores correlacionaram-as por meio da rigidez (ensaio de módulo de resiliência), assim como da deformação permanente (ensaio HWTT) diante do conceito de dano cumulativo (em dias). Como resultado, verificaram que em regiões frias o LTOA a 85°C corresponde a 12 meses de serviço, enquanto que para regiões quentes, 23 meses. Para o LTOA a 60°C, o período de serviço foi de 7 meses para climas frios e 12 meses para climas quentes.

Em outra análise, Sirin *et al.* (2018) avaliaram o envelhecimento para condições muito quentes (Catar) mediante extração de mistura asfáltica em campo (revestimento e base) e execução de amostras em laboratório. Os autores aplicaram o LTOA em amostras compactadas (85°C) e soltas (135°C) por intervalos de 0 a 120 dias em estufa e utilizaram o módulo dinâmico para correlação campo e laboratório. Foi

verificado que para camada de revestimento é necessário um envelhecimento de 75 dias em laboratório, enquanto para a base, 45 dias (ambos com amostra compactada) para promover rigidez similar ao campo. Todavia, esse tempo reduz a 3 e 2 dias para revestimento e base, respectivamente, quando a amostra está em estado solto.

Logo, verifica-se que o processo de envelhecimento a longo prazo em laboratório deve considerar as variações climáticas, ou seja, uma única combinação de tempo/temperatura pode superestimar ou subestimar o desempenho mecânico dos pavimentos. Diante disso, a NCHRP Report 871 (2017) apresentou um método laboratorial para envelhecimento a longo prazo com a finalidade de substituir o procedimento da AASHTO R30 (2010), mantendo, entretanto, o procedimento de 4h a 135° para o STOA.

O estudo abrangeu a investigação de 18 misturas asfálticas, tanto para CAUQ quanto MAMs obtidas de uma vasta variação climática nos EUA e Canadá em campo e correlacionadas em laboratório. O envelhecimento proposto ocorre a temperatura de 95°C, uma vez que causa redução significativa no tempo de envelhecimento (laboratório) em relação a temperatura de 85°C, assim como o uso de misturas soltas durante o período de oxidação em estufa.

O tempo de exposição térmica a longo prazo (em dias) é calculado pela equação 4:

$$t_{owen} = CAI = \sum_{i=1}^N D X A X \exp\left(-\frac{E_a}{RT_i}\right) / 24 \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

t_{owen} = duração necessária de envelhecimento em laboratório a 95°C para corresponder ao envelhecimento em campo (dia).

CAI = índice de envelhecimento climático.

D = fator de correção de profundidade.

A = fator de frequência (pré-exponencial) (sem unidade).

E_a = energia de ativação (kJ/mol).

R = constante de gás universal (kJ/mol•K).

T = temperatura horária do pavimento obtida do EICM na profundidade de interesse (Kelvin).

O nível de envelhecimento é razão da espessura em análise, em outras palavras, o processo oxidativo reduz à medida que aumenta a profundidade, havendo um fator de correção para ajuste da avaliação. Diante disso, o relatório apresenta os

valores das variáveis aplicadas ao cálculo do CAI (Tabela 6).

Tabela 6 - Coeficientes de ajustes CAI

Análise de profundidade	Fator de correção da profundidade (D)	Equação de Arrhenius, Pré-exponencial Fator (A)	Equação de Arrhenius, Energia de Ativação E_a
Superfície (6 mm)	1,0000	1,40962	13,3121
20 mm	0,4565	1,40962	13,3121
Camadas mais profundas (abaixo de 20 mm)	0,2967	1,40962	13,3121

Fonte: NCHRP Report 871 (2017)

Nesse contexto, a aplicação da citada metodologia foi abordada no estudo de Li *et al.* (2020), o qual analisou o efeito do LTOA por meio de diversos protocolos (variação de tempo, estado de compactação e temperatura) em uma elevada variedade de misturas. Os autores utilizaram o ensaio de módulo dinâmico para quantificar o impacto desse envelhecimento e verificaram que o uso de mistura solta elimina o efeito de gradiente térmico, assim como provoca maior rigidez frente às misturas compactas. Além disso, apontam maior eficiência do método do Report 871 (2017), uma vez que endurece o material com mais eficiência em relação à norma AASHTO R30 (2010), visto que 95°C oxida a mistura consideravelmente mais rápido que 85 °C.

2.5 Considerações finais

Diante do exposto neste capítulo, verificou-se que o envelhecimento do ligante é inerente ao processo de produção de misturas asfálticas e que esse fenômeno perdura ao longo da vida útil do pavimento. Tal comportamento ocorre em função da ação de variáveis como temperatura, umidade, mineralogia do agregado e radiação UV.

Os métodos atuais para previsão de desempenho não consideram de forma abrangente as condições climáticas presentes na região de projeto. Dessa forma, as simulações de envelhecimento térmico em laboratório divergem sobre a temperatura de ensaio; estado de compactação das amostras e tempo de exposição térmica. Além disso, não existe normativa a qual aborde o efeito da inclusão de umidade no envelhecimento a longo prazo de misturas asfálticas.

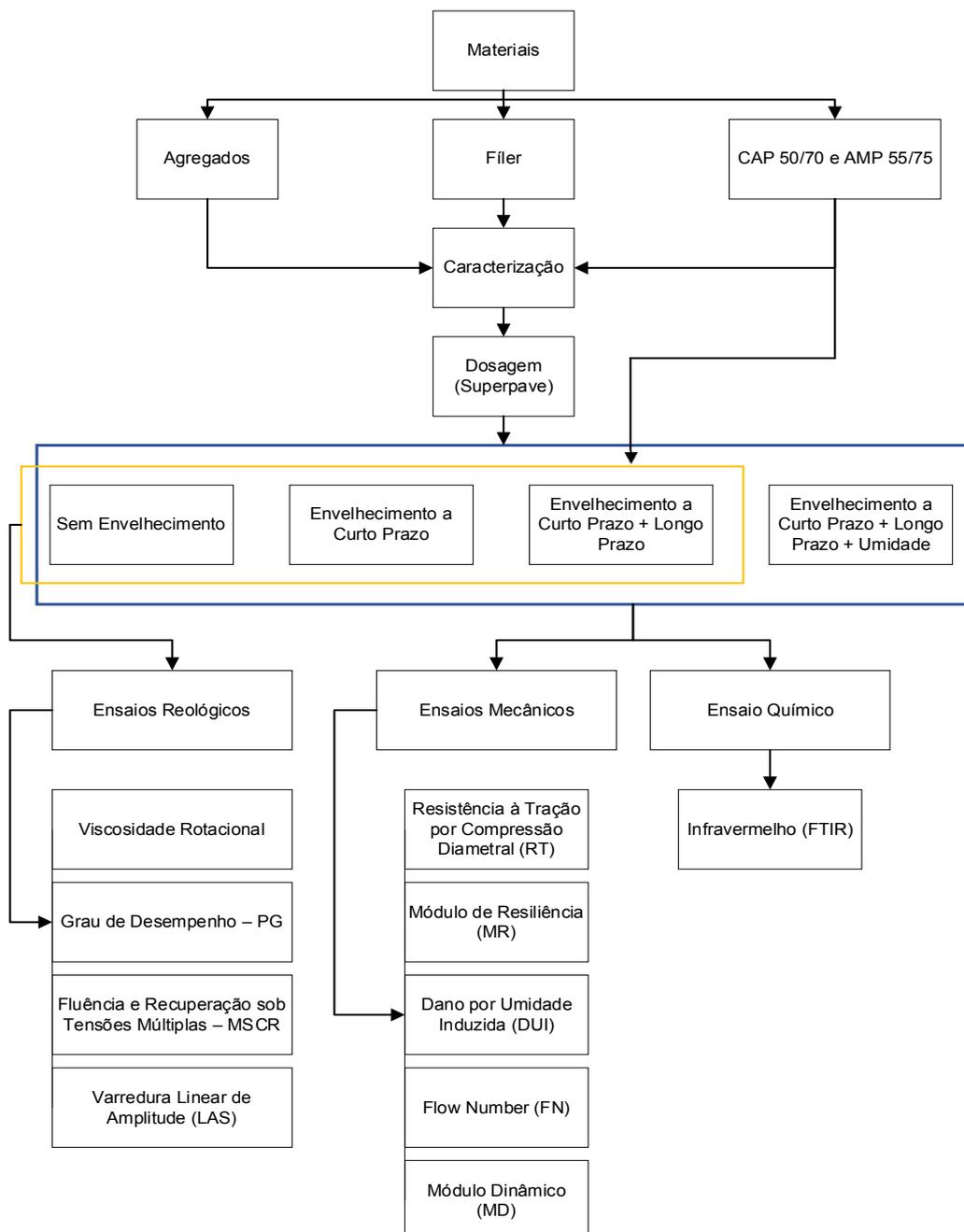
Posto isto, a elaboração e análise de protocolos de envelhecimento em materiais aplicados à infraestrutura viária são de suma importância para o desenvolvimento de projetos fidedignos ao desempenho em campo. Nesse aspecto,

a presente pesquisa busca contribuir bibliograficamente para o aprimoramento dos processos em laboratório acerca da representação do envelhecimento térmico e da influência da umidade por simulação de chuva no comportamento reológico, químico e mecânico de ligantes e misturas asfálticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, metodologias e normas adotados. A Figura 9 apresenta o fluxograma com as etapas de realização deste estudo.

Figura 9 - Fluxograma do processo metodológico



Fonte: Autoria própria (2023)

Esta pesquisa avaliou três situações de envelhecimento térmico de forma reológica para os ligantes asfálticos (CAP 50/70 e AMP 55/75). Posteriormente, ocorreu uma investigação das propriedades mecânicas (misturas asfálticas) tanto para o envelhecimento térmico, aplicando os dois ligantes mencionados, bem como após influência da umidade. Uma análise química por FTIR foi utilizada para melhor discussão dos resultados.

3.1 MATERIAIS

A presente seção aborda os materiais utilizados nessa pesquisa, os quais incluem os agregados (brita 19.0 mm, brita 12.0 mm, pó de pedra e areia), fíler, cal hidratada, CAP 50/70 e AMP 55/75.

3.1.1 Agregados

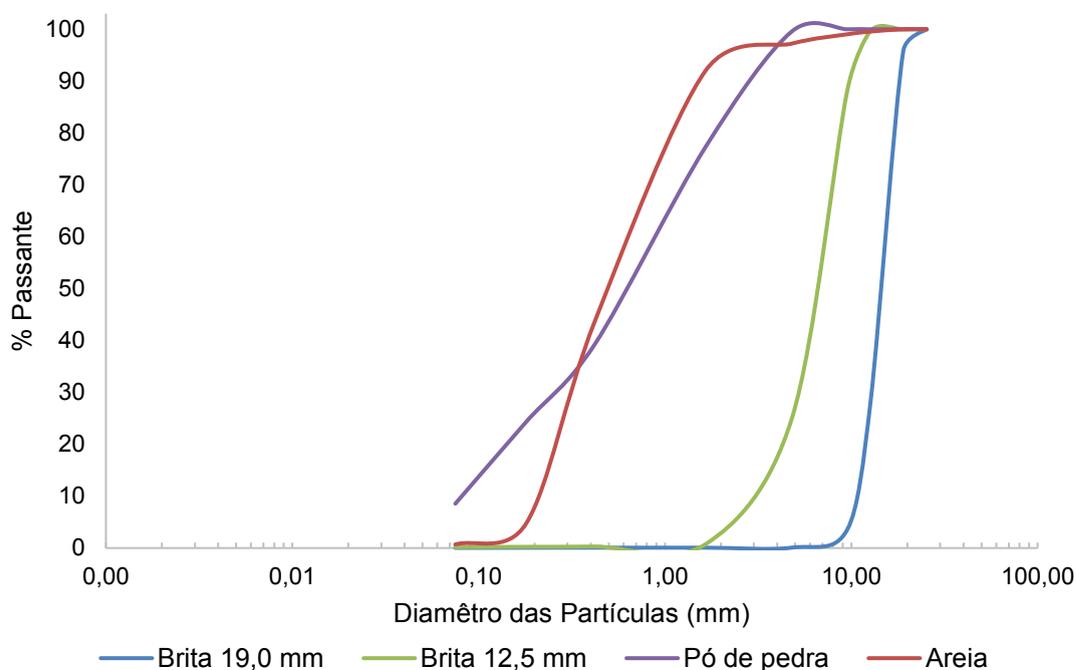
Nesta pesquisa foram utilizados agregados virgens de origem granítica provenientes da empresa Rocha Cavalcante, localizada na cidade de Campina Grande-PB. A brita granítica apresentou tamanhos máximos nominais (TMN) de 19.0 mm e 12.5 mm e além dela foi disponibilizado o pó de pedra granítico. A areia quartzosa utilizada foi adquirida no comércio local. As propriedades físicas dos agregados estão disponíveis na Tabela 7 e as distribuições granulométricas foram obtidas por meio de ensaios de análise granulométrica por peneiramento (DNIT- ME 412/2019), como apresentado na Figura 10. O fíler utilizado foi a Cal Hidratada CH-1, também adquirido em comércio local.

Tabela 7 - Caracterização física dos agregados

Ensaio	Norma	Materiais			
		Brita 19 mm	Brita 12.5 mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm ³)		2,778	2,625	2.542	2,661
Massa específica aparente (g/cm ³)	DNIT 411/2019 DNIT 413/2019	2,735	2,612	2.430	2,603
Absorção (%)		0,56	1,06	0,75	0,12
Equivalente de areia (%)	DNIT 054/1997	-	-	67,38	75,24
Índice de Forma	DNIT 424/2020	0,678	0,665	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT 035/1998	20,22	21,66	-	-
Adesividade	DNIT 078/1994	Insatisfatória	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 10 - Distribuição granulométrica dos agregados



Fonte: Autoria própria (2023)

O não atendimento da adesividade na brita 19.0 mm ao ligante asfáltico CAP 50/70 pode ser explicada pelo caráter sílico, ácido e hidrofílico do agregado granítico e impacta no desempenho da mistura frente ao efeito da umidade (FROSSAD, 2021). Nesse contexto, é habitual o aspecto insatisfatório da adesividade na região paraibana, consoante demonstrado em pesquisas anteriores (ARRUDA, 2021; NETO, 2022).

Dessa forma, algumas soluções estão disponíveis para a mitigação do dano da umidade no agregado. A aplicação de cal hidratada possui a finalidade de reduzir a polaridade do agregado, com consequente mitigação da atração pela água (ANITELLI, 2013). Além disso, tem-se o dope – melhorador de adesividade, o qual fomenta a adsorção física ou reação química entre ligante/agregado para formar uma interface sólida nessa região (ZHANG *et al.*, 2019; SHU *et al.*, 2022).

Diante disso, concomitantemente ao uso de cal hidratada, aplicou-se o dope. A Figura 11 apresenta a diferença visual de corpos de prova sem dope (CP da esquerda) e com dope (CP da direita) para as amostras compactadas com CAP 50/70. Não foi introduzido dope nas misturas compostas por AMP 55/75, uma vez que o uso de polímero auxilia na capacidade adesiva do ligante ao agregado. Esse comportamento foi previamente verificado em teste por meio do ensaio de dano por umidade induzida

(DUI). O atendimento aos valores mínimos de 70% dispensaram a aplicação do melhorador de adesividade, de maneira a reduzir o número de variáveis do estudo. A discussão da adesividade por meio do DUI será avaliada no item 4.3.3

Figura 11 – Mistura asfáltica CAP 50/70 antes (a) e após aplicação do dope no ligante asfáltico (b)



Fonte: Autoria própria (2023)

O processo de dopagem foi realizado via misturador, com aplicação de 0,5% de dope para a massa de ligante asfáltico. O material foi fornecido pela empresa Instalfe. O CAP foi submetido a agitação de 580 rpm durante 20 minutos a uma temperatura de 140°C. O teor foi utilizado devido a aplicação comercial na região.

3.1.2 Ligante Asfáltico

Os ligantes asfálticos utilizados nas misturas asfálticas foram de classificação CAP 50/70 e AMP 55/75. O primeiro foi obtido na empresa Rocha Cavalcante, localizada na cidade de Campina Grande. O segundo foi obtido na empresa Vanguarda sediada com obra na BR-230, no Estado da Paraíba. A opção do uso dessas tipologias de ligantes foi em razão da utilização habitual na região Nordeste do Brasil.

A Tabela 8 apresenta o resumo dos resultados de caracterização dos referidos ligantes asfálticos. Foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e recuperação elástica nas condições iniciais (sem envelhecimento) e após o envelhecimento de curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (Rolling Thin Oven Test – RTFO).

As propriedades reológicas de Grau de Performance (PG), Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla (MSCR) e Varredura de Amplitude Linear (LAS)

serão analisadas posteriormente (Item 4.2).

Tabela 8 – Caracterização do ligante CAP 50/70 e AMP 55/75

Ensaio	CAP 50/70			AMP 55/75	
	T (°C)	Antes RTFO	Após RTFO	Antes RTFO	Após RTFO
Penetração (mm-1) DNIT 155/10 – ME	-	54	37	62	44
Penetração retida (%)		68,5		-	
Varição de massa (%)		0,06		-	
Ponto de amolecimento (°C) DNIT 131/10 – ME		50,00	54,50	56,50	62,00
Recuperação elástica (%) DNIT 130/2010 – ME		-		85,00	82,50
Índice de Susceptibilidade Térmica (°C)		-1,02		0,87	
Viscosidade (cP) – NBR 15184/05	135	403,75	553,65	821,3	1186,6
	142	287,15	385,2	581,5	737,6
	150	201,5	263,39	407,1	501,5
	165	111,65	141,23	229,3	271,7
	177	73,25	90,75	153,7	177,3

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com a Tabela 8, ambos os ligantes atenderam as especificações da Agência Nacional de Petróleo (ANP). A temperatura de usinagem foi 155°C para o CAP 50/70 e a temperatura de compactação foi 143°C. Esses valores foram determinados dentro da faixa de viscosidade 170±20 cP e 280±30 cP conforme a NCHRP Report 15184 (2010). Para o ligante AMP 55/75, a temperatura de usinagem (165°C) e compactação (155°C) foi obtida mediante dados do fornecedor, uma vez que não há informação do percentual de polímero para o cálculo conforme a norma DNER-E 385 (1999).

3.2 MÉTODOS

A metodologia é dividida em duas partes, de maneira que na primeira etapa são apresentados os procedimentos para envelhecimento térmico do ligante asfáltico com os respectivos ensaios para essa verificação. Posteriormente, na segunda etapa, explana-se o método de dosagem para as misturas asfálticas; os protocolos de envelhecimento (térmico e com acréscimo de umidade) utilizados e os ensaios aplicados para essa análise.

3.2.1 Protocolo de envelhecimento aplicado aos ligantes asfálticos

O processo de envelhecimento do ligante asfáltico possuiu a finalidade de compreensão do comportamento reológico do material e sua consequente influência

no desempenho mecânico das misturas asfálticas. Diante disso, aplicou-se exclusivamente o envelhecimento térmico, tanto para o CAP 50/70, assim como para o AMP 55/75.

Nessa pesquisa foram avaliadas três condições de envelhecimento térmico: sem envelhecimento (1); envelhecimento a curto prazo (2) e envelhecimento a longo prazo (3). Nesse sentido, o objetivo foi verificar a progressão do efeito térmico no processo oxidativo em ligantes asfálticos. Adiante segue detalhamento dos citados intervalos.

- *Sem envelhecimento*

Material coletado sem processo prévio de envelhecimento (amostra de referência). Ainda que haja um envelhecimento intrínseco ao processo de aquecimento do ligante asfáltico, a fim de nomenclatura nessa pesquisa, considerou-se como amostra sem envelhecimento.

- *Envelhecimento a curto prazo*

O procedimento de envelhecimento a curto prazo ocorreu conforme a norma AASHTO T 240 (2021). Nesse sentido, tanto para o ligante CAP 50/70, assim como para o AMP 55/75, aplicou-se uma temperatura de 163°C durante 85 minutos.

- *Envelhecimento a longo prazo*

O método de envelhecimento à longo prazo foi adotado de acordo com o NCHRP Report 871 (2017). Descreve-se abaixo a especificação das variáveis adotadas:

- a) Período e temperatura de exposição térmica

A temperatura aplicada foi de 95°C e o tempo de envelhecimento em estufa é baseado no clima da região, conforme exposto na equação 4, no capítulo da Revisão Bibliográfica. Entretanto, devido à ausência de um banco de dados para a região de Campina Grande – PB, o período de exposição térmica foi simulado considerando uma região dos EUA com temperatura a qual mais se assemelha àquela cidade.

Diante disso, regiões com variações térmicas similares à Campina Grande-PB são identificadas no Sul da Flórida, assim como no Havaí. Portanto, estabeleceu-se o tempo de envelhecimento a longo prazo de 9 dias. Esse período corresponde ao envelhecimento de 8 anos de serviço numa análise realizada a 20 mm de profundidade da superfície. Conforme proposto no relatório 871 (2017), para esse nível de espessura, não se adota o envelhecimento por UV como fator contribuinte

para o método a longo prazo.

b) Processo de envelhecimento a longo prazo

O método de envelhecimento térmico em estufa ocorreu de forma cumulativa, ou seja, o envelhecimento a longo prazo (09 dias a 95°C) foi precedido pelo envelhecimento a curto prazo (85 min a 163°C). O material resultante da análise RTFO foi posto em um recipiente, com formação de uma película aproximada de 2 mm.

3.2.2 Ensaios aplicados aos ligantes asfálticos

Para análise do envelhecimento térmico nos ligantes asfálticos, foram realizados os seguintes ensaios reológicos: Viscosidade rotacional; Grau de Desempenho; Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas e Varredura Linear de Amplitude. A discriminação dos procedimentos desses ensaios está relatado a seguir.

Os parâmetros reológicos dos ligantes asfálticos CAP 50/70 e AMP 55/75 em diferentes níveis de envelhecimento (sem envelhecimento, envelhecimento térmico a curto prazo e envelhecimento térmico a longo prazo) foram determinados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Para essa análise, utilizou-se o equipamento DSR da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1) do LEP, bem como um viscosímetro rotacional disponível no mesmo laboratório para medir a viscosidade rotacional.

- *Viscosidade rotacional*: O ensaio foi conduzido de acordo com a norma NBR 15184 (2004). A metodologia envolveu a colocação de um cilindro com ranhuras padronizadas (*spindle*) dentro de uma cubeta contendo 8 gramas do ligante. Em seguida, aplicou-se um torque utilizando uma haste interligada ao cilindro. O ligante foi aquecido nas temperaturas pré-estabelecidas pela norma, que são 135°C, 150°C e 177°C, com rotações de 20, 50 e 100 rpm, respectivamente. O viscosímetro utilizado foi o modelo Brookfield DV-III ULTRA, conectado a um controlador de temperatura.

Por meio do ensaio reológico de viscosidade rotacional, é possível a obtenção do denominado “VAI - Viscosity Aging Index” (equação 5). A metodologia representa o percentual de acréscimo da viscosidade, devido ao processo de oxidação, para quaisquer níveis de envelhecimento (Zhang *et al.*, 2018)

$$VAI = \frac{\text{viscosidade (envelhecida)} - \text{viscosidade (não envelhecida)}}{\text{viscosidade (não envelhecida)}} \quad (\text{equação 5})$$

- *Grau de Desempenho (PG)*: O ensaio foi baseado na variação de temperatura,

começando a partir de 46 °C e aumentando em incrementos de 6°C. Durante o ensaio, foi analisado o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$, estabelecendo-se limites mínimos para cada incremento de temperatura. Para ligantes não envelhecidos a curto prazo, o valor mínimo permitido foi de 1,00 kPa, enquanto para ligantes envelhecidos que passaram pelo processo de simulação em estufa RTFO, o limite mínimo foi de 2,20 kPa. O ensaio foi concluído quando esses limites estabelecidos pela norma foram atingidos para o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$. As amostras utilizadas no teste tinham diâmetro de 25 mm e espessura de 1 mm.

As amostras que obtiveram PG foram analisadas pelo índice de envelhecimento (AI) – equação 6 – que utiliza o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ antes e após o procedimento de envelhecimento para avaliação do comportamento do ligante. De acordo com Asukar *et al.* (2016), o índice de envelhecimento desempenha um papel crucial ao evidenciar a susceptibilidade do material ao envelhecimento e descrever a evolução da rigidez ao longo dos diferentes estágios de vida útil do pavimento.

$$AI = \frac{G^*/\text{sen}\delta \text{ (envelhecido)}}{G^*/\text{sen}\delta \text{ (não-envelhecido)}} \quad \text{(equação 6)}$$

- *Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (MSCR)*: Assim como no ensaio de Grau de Desempenho (PG) mencionado anteriormente, foram preparadas amostras com as mesmas dimensões de 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura e submetidas a uma temperatura de ensaio de 64°C. Durante o ensaio, foram realizados 10 ciclos de tensão baixa (100 Pa) e 10 ciclos de tensão alta (3200 Pa). Para cada ciclo, foram determinados os valores de ϵ_0 , ϵ_c , ϵ_r , ϵ_1 e ϵ_{10} a partir da curva de deformação versus tempo. Com base nesses valores, foram calculados a porcentagem de recuperação elástica (%R), a compliância não recuperável (Jnr) e a sensibilidade aos níveis de deformação (Jnr diff).

- *Varredura Linear de Amplitude (LAS)*: A análise empregou a Teoria do Dano Contínuo Viscoelástico (VECD) e envolveu uma série de ciclos de carga, onde a amplitude de deformação foi aumentada de forma sistemática em uma frequência constante. Para esse ensaio, as amostras de ligante asfáltico confeccionadas possuíam um diâmetro de 8 mm e uma espessura de 2 mm.

O ensaio realizado envolveu duas etapas distintas nas amostras. Na primeira etapa foi realizada uma varredura de frequência para obter as propriedades reológicas

dos ligantes asfálticos. Esse procedimento foi executado a uma temperatura de 19°C, abrangendo as frequências de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 20,0 e 30 Hz, com uma deformação controlada de 0,1%.

Na segunda etapa, foi conduzida uma varredura de amplitude para quantificar o dano sofrido pelo ligante. Nesse caso, foram aplicados pequenos torques na mesma amostra em uma frequência constante de 10 Hz. O carregamento foi incrementado para garantir uma deformação variando até 30%. A cada 10 ciclos de carga, foram registrados os valores de tensão de cisalhamento aplicada, ângulo de fase e módulo complexo.

O ensaio LAS é realizado, normalmente, após o envelhecimento a curto prazo (inerente à execução de misturas asfálticas). Todavia, nesta pesquisa, tanto o ensaio LAS assim como o MSCR, foram realizados em condição "sem envelhecimento" a fim de verificar o efeito térmico ao longo das condições os quais os materiais foram solicitados.

3.2.3 Dosagem das misturas asfálticas

Foram avaliadas misturas asfálticas produzidas com CAP 50/70 e AMP 55/75; agregados naturais (brita granítica de 19.0 e 12.5 mm, pó de pedra granítica, areia) e cal hidratada. A dosagem das misturas asfálticas à quente foi realizada seguindo a metodologia SUPERPAVE com N de projeto de 100 giros, normatizada pela ASTM D6925 (2015). O nível de tráfego utilizado foi o alto e o tamanho máximo nominal (TMN) foi 19.0mm.

A dosagem da mistura asfáltica de referência foi realizada em três etapas:

- *Etapa 1:* Foi realizada a seleção de três diferentes composições granulométricas, por meio da combinação com os diferentes agregados, para atender aos requisitos da metodologia Superpave e aos limites estabelecidos para a faixa C do DNIT 031/2006 - ES. A Tabela 9 apresenta as proporções finais dos agregados escolhidos para cada uma das três composições estudadas. As três granulometrias da mistura dos agregados foram denominadas "curva inferior", "curva intermediária" e "curva superior" e são apresentadas graficamente na Figura 12, juntamente com a faixa C do DNIT para misturas asfálticas.

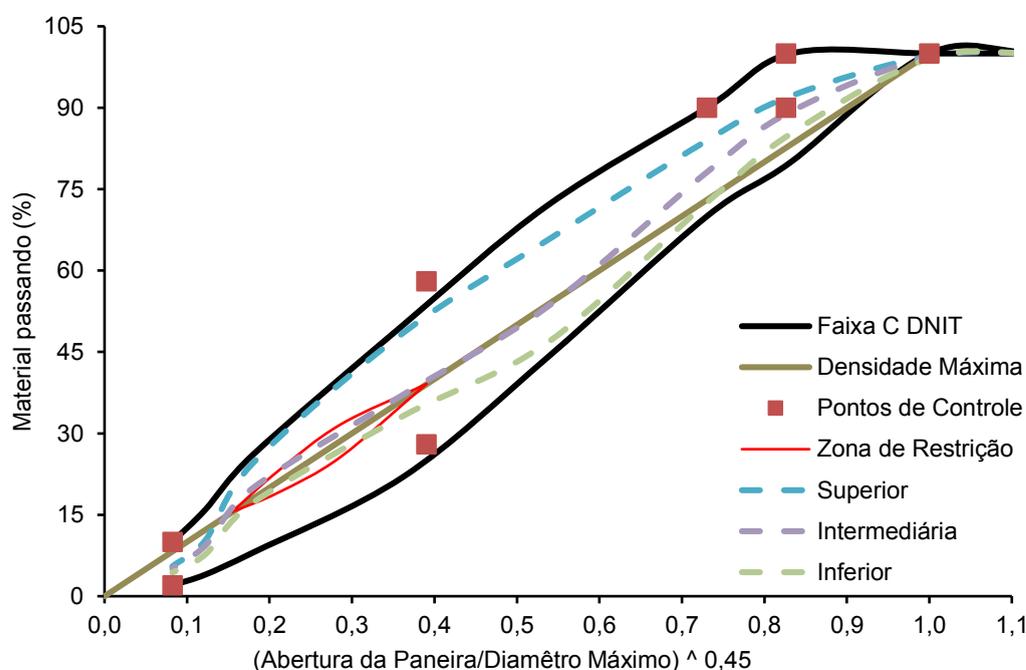
Tabela 9 - Proporções de agregados para a mistura asfáltica CAP 50/70

Materiais	Curva inferior	Curva intermediária	Curva superior
Brita 19,0 mm	21,0%	15%	11%
Brita 12,5 mm	36%	35%	25%
Areia	5%	0%	8%
Pó de pedra	36%	48%	54%
Fíler (cal)	2,0%	2%	2%

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 12 apresenta a distribuição granulométrica das curvas especificadas.

Figura 12 - Distribuição granulométrica das curvas inferior, intermediária e superior



Fonte: Autoria própria (2023)

- **Etapa 2:** Após terem sido obtidas as três composições granulométricas adequadas, seguiu-se com a compactação de corpos de prova (CP's) para cada uma das curvas geradas. Para isso, utilizou-se um teor de ligante inicial de 5% em peso total da mistura asfáltica (CAP 50/70) e compactou-se os CPs no Compactador Giratório Superpave (CGS) seguindo a norma ASTM D6925 (2015). Cada curva foi avaliada por meio de dois CPs, que foram submetidos a três compactações com diferentes números de giro: $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$. Essas aplicações correspondem, respectivamente, a 8 giros, 100 giros e 160 giros, que são indicados para tráfego médio a alto. O $N_{projeto}$ (100 giros para um V_v de 4%) foi utilizado para determinar o teor de ligante de projeto,

enquanto o $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ foram usados para avaliar a compactação da mistura. A Tabela 10 apresenta os parâmetros calculados para as três composições granulométricas avaliadas e as especificações de acordo com o critério SUPERPAVE.

Tabela 10 - Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial

N de projeto (100 giros)				
Parâmetro	Critério	Curva Superior	Curva Intermediária	Curva Inferior
Volume de Vazios	4%	4,5	3,82	3,52
VAM	> 11%	17,15	15,22	14,5
RBV	65% < RBV < 75%	76,52	74,05	73,15
P/A	0,6 a 1,2	1,04	1,11	1,21
%Gmm	96%	95,8	97,76	98,5

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nesses resultados, chegou-se à conclusão de que a composição intermediária atendeu aos requisitos de dosagem e apresentou um volume de vazios (Vv) próximo a 4%, além de atender os critérios de Relação Betume-Vazio (RBV), Volume Agregado-Mineral (VAM) e Relação Pó/Asfalto (P/A). Portanto, essa composição foi selecionada para determinar o teor de ligante asfáltico de projeto.

- *Etapa 3:* Após definir a curva granulométrica ideal para a produção de misturas asfálticas (intermediária), realizou-se um teste para determinar o teor ótimo de ligante, seguindo os critérios do método Superpave. Foram compactados dois corpos de prova para cada teor testado (4,10%, 4,60%, 5,10% e 5,60%) a fim de avaliar quais teores apresentavam parâmetros dentro dos critérios especificados. A Tabela 11 apresenta os parâmetros volumétricos para cada teor testado, incluindo os resultados da RBV e VAM.

Tabela 11 - Resumo dos parâmetros volumétricos da mistura de projeto (CAP 50/70)

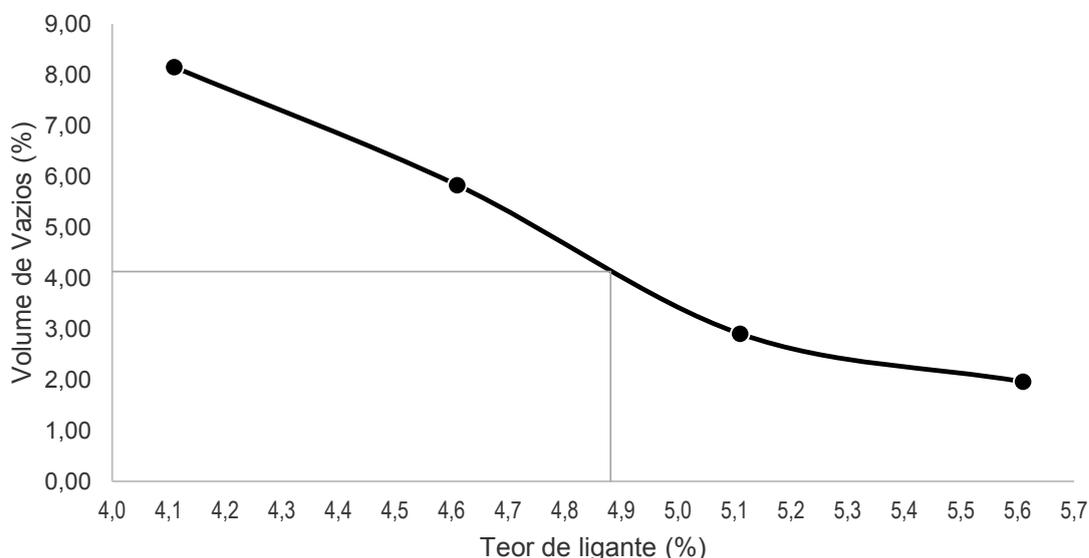
N de projeto (100 giros)				
Teor de ligante	4,1	4,6	5,1	5,6
Volume de Vazios	8,15	5,83	2,9	1,96
VAM	17,97	16,77	15,61	15,42
RBV	76,65	75,62	74,73	74,73
P/A	0,87	0,84	1,08	1,05
%Gmm	92,9	95,13	97,57	98,66

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nesses dados, gerou-se a curva de ligante x Vv (Figura 13) e determinou-se o teor de ligante asfáltico escolhido para a mistura asfáltica. O valor

adotado foi de 4,88% para o ligante CAP 50/70.

Figura 13 – Determinação do teor de ligante para o ligante CAP 50/70



Fonte: Autoria própria (2023)

O processo de dosagem do AMP 55/75 ocorreu de forma similar. Entretanto, optou-se pela repetibilidade da curva granulométrica, ou seja, adotou-se a mesma curva granulométrica do CAP 50/70 (etapa 1) com vista a fixar o esqueleto pétreo entre as duas misturas.

Posteriormente, o teor de ligante inicial AMP 55/75 (etapa 2) foi de 4,88% (similar ao CAP 50/70) e compactou-se 2 CP's para cada variação de teor de ligante (4,38%; e 5,38%), adaptado da metodologia SUPERPAVE (teor inicial e posterior variação do teor nos índices -0,5% e +0,5%). A compactação em +1% (em relação ao teor inicial) não foi realizada, uma vez que a única variável modificada foi o ligante asfáltico, tendo-se, portanto, com o teor inicial aplicado, um valor próximo ao teor ideal. A Tabela 12 apresenta os resultados dos parâmetros volumétricos para o $N_{projeto}$.

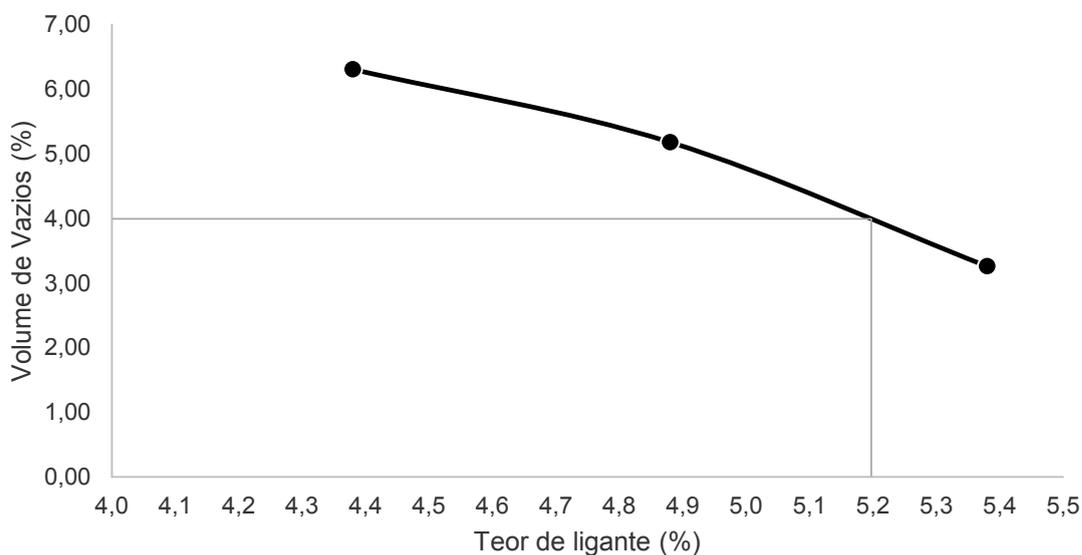
Tabela 12 - Resumo dos parâmetros volumétricos da mistura de projeto (AMP 55/75)

	N de projeto (100 giros)		
% Ligante	4,38	4,88	5,38
Volume de vazios	6,31	5,18	3,26
VAM	17,56	17,31	16,61
RBV	76,6	76,57	76,12
P/A	0,95	0,94	0,99
%Gmm	93,69	94,67	96,74

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nesses dados, o teor ótimo de ligante asfáltico escolhido para a mistura asfáltica foi de 5,22%, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Determinação do teor de ligante para o ligante AMP 55/75



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.4 Protocolo de envelhecimento aplicado às misturas asfálticas

O envelhecimento das misturas asfálticas teve por objetivo verificar o comportamento mecânico para amostras compostas por CAP 50/70 e AMP 55/75. Para isso, aplicou-se tanto o envelhecimento térmico, bem como o acréscimo de umidade.

3.2.4.1 Envelhecimento térmico executado nas misturas asfálticas

De forma similar ao envelhecimento térmico ocorrido nos ligantes asfálticos, aplicou-se esse procedimento nas misturas asfálticas, todavia com algumas modificações, conforme descrito abaixo.

- *Sem envelhecimento*

Nesse cenário, os componentes da mistura asfáltica foram aquecidos até a temperatura de usinagem. Após adição do ligante asfáltico e posterior mistura com os agregados e fíler (temperatura de 10°C a 15°C superior à temperatura do ligante), a mistura asfáltica retornou à estufa com o intuito de atingir à temperatura de compactação devido a perda de temperatura no processo manual de mistura. Após estabilização dessa temperatura, procedeu-se, imediatamente, a compactação.

- *Envelhecimento a curto prazo*

Adotou-se a metodologia proposta pelo método SUPERPAVE. Nesse cenário, o envelhecimento a curto prazo, após o procedimento de mistura exposto na etapa anterior, foi aplicado por 2 horas à temperatura de compactação (143°C – CAP 50/70;

153°C – AMP 55/75). As misturas foram postas soltas na estufa em bandejas e revolvidas a cada hora com o intuito de uniformizar o processo de envelhecimento.

O NCHRP Report 871 (2017) determina o envelhecimento a curto prazo conforme estabelecido na norma AASHTO R30 (2010). Nessa normativa, o envelhecimento ocorre por 4 horas a 135°C, porém tal procedimento não foi adotado nesta pesquisa, visto que o objetivo é envelhecer nas condições térmicas exigidas por cada tipo de ligante (maiores temperaturas para ligantes modificados).

- *Envelhecimento a longo prazo*

O método de envelhecimento à longo prazo foi adotado consoante o NCHRP Report 871 (2017). Descreve-se abaixo a especificação das variáveis adotadas:

- a) *Período e temperatura de exposição térmica*

Conforme abordado também no envelhecimento térmico dos ligantes asfálticos, 9 dias a 95°C foram utilizados para simular o processo de oxidação nas misturas asfálticas. A definição do período (dias), bem como da temperatura, possui a mesma justificativa aplicada aos ligantes.

- b) *Estado de compactação da amostra*

De forma distinta ao proposto na NCHRP Report 871 (2017), aplicou-se o envelhecimento a longo prazo nas amostras no estado compactado (Figura 15). Essa análise visa verificar o desenvolvimento das propriedades mecânicas de forma similar ao ocorrido em campo, onde após o envelhecimento a curto prazo (misturas soltas), o material é compactado. Metodologia semelhante é observada na norma AASHTO R30 (2010).

Figura 15 - Corpos de prova em estufa a 95°C por 9 dias para simulação do envelhecimento



Fonte: Autoria própria (2023)

O processo de envelhecimento térmico em estufa ocorreu de forma cumulativa, ou seja, o envelhecimento a longo prazo (09 dias a 95°C) foi precedido pelo envelhecimento a curto prazo (02 horas à temperatura de compactação).

3.2.4.2 Umidade

A influência da umidade ocorreu de maneira cumulativa ao envelhecimento térmico, ou seja, primeiramente foi aplicado o envelhecimento térmico a curto prazo, posteriormente a longo prazo e por fim a simulação de chuva. Os corpos de prova foram condicionados mediante ciclos de umedecimento e secagem. O citado procedimento visou simular o que ocorre em campo. Diante disso, aplicou-se a representação de chuva com uso do simulador de chuva do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

O equipamento (Figura 16) possui um sistema de pulverização de água mediante uma vazão pré-estabelecida. A base é composta de calha para coleta e circulação da água por meio do sistema de bombeamento.

Figura 16 - Simulador de chuva aplicado para o envelhecimento das misturas asfálticas



Fonte: Autoria própria (2023)

A intensidade pluviométrica aplicada foi equivalente a 8 anos de projeto, de maneira que cada 1 dia no simulador, buscou-se representar 1 ano em campo no município de Campina Grande – PB. Tal metodologia foi baseada no estudo de Zhang *et al.* (2021) que aplicaram um sistema de pulverização de água para uma vazão anual equivalente ao local de estudo.

Dessa forma, inicialmente, determinou-se a intensidade pluviométrica a ser aplicada de acordo com os dados obtidos na Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs). A média pluviométrica anual foi calculada considerando os quatro postos de coleta que abrangem o município de Campina Grande (Sítio Açude de Dentro, EMBRAPA, São José da Mata e INSA) ao longo dos últimos 8 anos. Diante disso, obteve-se um valor médio anual de 500 mm de chuva para o município, totalizando 4.000 mm de chuva para aplicação na simulação.

Uma vez que o processo de umedecimento em campo não ocorre de forma contínua, estabeleceu-se ciclos de umidade e secagem em oito períodos (1 ciclo por

dia). Com base na capacidade de aplicação do equipamento, atribuiu-se cinco horas de chuva por dia a uma intensidade pluviométrica de 100 mm/h (total de 500 mm). Dessa forma, cada ciclo foi composto por uma chuva de 100 mm/h por 5 horas, seguido de uma secagem ao ar por um período de 19 horas (Figura 17).

A isonomia da aplicação da água nos corpos de prova foi verificada por meio de uma calibração prévia do equipamento. Aplicou-se três valores distintos de vazão (l/min) para um tempo de 10 minutos. Nesse sentido, por meio de béquers, coletou-se os volumes de água obtidos e, por conseguinte, a identificação dos pontos de iguais vazões. Adotou-se uma vazão de 8 l/min para representar uma intensidade pluviométrica de 100 mm.

Acerca das amostras (corpos de prova), essas possuem geometria conforme o tipo de ensaio a ser submetido. Não houve controle volumétrico nas etapas anterior e posterior a umidade, uma vez que ocorreu desagregação de material após a simulação em chuva, o que não torna fidedigno o controle da umidade por esse parâmetro. Ademais, após etapa da umidade, os CP's foram secos ao ar por 24h e posteriormente ensaiados.

Figura 17 - Condicionamento de umidade nos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.5 Ensaios aplicados às misturas asfálticas

Para análise química do processo de oxidação em razão do envelhecimento

térmico e influência da umidade, foi realizado o ensaio Espectrometria no Infravermelho. Para avaliação mecânica das misturas asfálticas realizaram-se os seguintes ensaios: Resistência à tração por compressão diametral (1); Dano por umidade induzida (2); Módulo de Resiliência (3); Resistência à deformação permanente (4) e Módulo Dinâmico (5) . Em todos os casos, as amostras foram realizadas em condições de referência (sem envelhecimento) e após as simulações de envelhecimento térmico e por umidade.

- *Espectrometria do infravermelho (FTIR)*: Esta técnica 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). Foi utilizada na análise do ligante asfáltico para determinar níveis de oxidação, bem como determinar de maneira qualitativa e/ou semiquantitativa a presença de aditivos orgânicos.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Nanocompósitos (LAMMEN) localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O equipamento utilizado foi o Espectrômetro Bruker Vertex 70 com sonda ATR e as faixas (espectros) variaram de 4500 a 500 cm^{-1} .

Para a verificação do envelhecimento térmico (sem envelhecimento; curto prazo e longo prazo) foram obtidas amostras, exclusivamente, de ligante asfáltico (amostras puras). Entretanto, o ligante asfáltico, isolado, não foi submetido ao envelhecimento com influência da umidade. Nesse caso, apenas as misturas asfálticas foram submetidas ao procedimento completo de envelhecimento (térmico e posterior submissão à ação da água). Diante disso, para análise de oxidação do ligante por FTIR na condição de umidade, amostras foram coletadas diretamente da superfície dos CP's (por meio de raspagem) após o processo completo de envelhecimento.

- *Resistência à tração por compressão diametral (RT)*: A norma DNIT 136 (2018) é empregada para realizar o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) em misturas asfálticas. Nesse ensaio, são aplicadas duas forças diametralmente opostas a um corpo de prova cilíndrico usando frisos metálicos, gerando tensões de tração uniformes perpendicularmente ao diâmetro do corpo de prova.

O carregamento estático é incrementado gradualmente por meio de uma prensa mecânica, com uma taxa de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s e foi realizado na *Universal Testing Machine* (UTM) da marca *Shimadzu*. A carga de ruptura é registrada

por meio de um anel dinamométrico acoplado à prensa. Para cada composição de mistura asfáltica, são realizadas três amostragens em triplicata, e o resultado final do ensaio é determinado pela média dos valores obtidos nos corpos de prova.

- *Dano por umidade induzida (Lottman)*: O método de ensaio DNIT 180 (2018) é empregado para avaliar o potencial de deslocamento da película de ligante asfáltico em misturas asfálticas sob a influência da água em ciclos de gelo e degelo. Esse ensaio utiliza um medidor indireto de adesividade para considerar o efeito prejudicial da água nas propriedades de resistência mecânica da mistura asfáltica.

No ensaio, foram moldados seis corpos de prova para cada grupo de mistura asfáltica no CGS, com um diâmetro de 100 mm e altura aproximada de 68 mm. A norma DNIT 180 (2018) estabelece que os corpos de prova devem apresentar um volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$ para esse ensaio.

Os corpos de prova foram divididos em dois grupos, cada um contendo três corpos de prova. O primeiro grupo foi submetido a um processo de condicionamento por ciclos de gelo e degelo, enquanto o segundo grupo não foi condicionado. Ambos os grupos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A resistência à tração indireta do grupo condicionado foi denominada como " R_{tc} ", enquanto a do grupo não-condicionado foi denominada como " R_{tnc} ", sendo realizados na UTM *Shimadzu*. O resultado desse ensaio é expresso pela Resistência Retida à Tração (RRT), obtida pela razão entre R_{tc} e R_{tnc} em porcentagem.

- *Módulo de Resiliência (MR)*: A determinação da rigidez das misturas asfálticas foi realizada por meio do ensaio de compressão diametral sob carga repetida, seguindo a norma DNIT 135 (2018). Corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e aproximadamente 64 mm de altura foram CGS. No ensaio, uma carga no formato de onda *haversine* foi aplicada no plano diametral vertical do corpo de prova usando a máquina de ensaio UTM-25 da marca IPC Global®. A carga máxima aplicada correspondeu a 10% da força de ruptura obtida no ensaio de tração por compressão diametral. A frequência de carregamento utilizada foi de 1 Hz, onde cada ciclo consistia em 0,10 s de aplicação de carga seguido de 0,9 s de repouso.

A carga aplicada induziu uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação, resultando em um deslocamento diametral recuperável na direção horizontal. Para medir o deslocamento horizontal dos corpos de prova, foram utilizados dois transdutores do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) presos ao corpo de prova por meio de alças de referência. Todos os ensaios foram

conduzidos à temperatura ambiente de 25°C, e pelo menos três amostras de cada grupo de mistura asfáltica foram analisadas para garantir a representatividade dos resultados.

- *Resistência à deformação permanente (Flow number)*: O ensaio uniaxial de carga repetida foi realizado de acordo com o método de ensaio DNIT 184 (2018) para determinar a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. Corpos de prova cilíndricos com aproximadamente 150 mm de altura e 100 mm de diâmetro foram confeccionados no CGS, sendo preparadas três amostras para cada grupo de mistura. Antes do ensaio, os corpos de prova foram submetidos a um processo de aquecimento em estufa a uma temperatura de 60°C por um período de 3 horas, a fim de garantir a estabilização das amostras.

O ensaio foi conduzido utilizando a *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT) da marca IPC Global®. No ensaio, uma carga uniaxial cíclica compressiva de 204 kPa foi aplicada às amostras seguindo o formato de onda *haversine*, com uma duração de 0,1 s para a aplicação da carga e 0,9 s de repouso. O critério de parada adotado foi a realização de 7.200 ciclos de carregamento, correspondendo a aproximadamente 2 horas de ensaio, ou a atingir uma deformação de 50.000 microstrains, momento em que as amostras alcançaram a ruptura.

- *Módulo Dinâmico (MD)*: A determinação experimental do módulo dinâmico seguiu o método DNIT 416 (2019), envolvendo a aplicação de uma tensão de compressão senoidal em corpos de prova com dimensões de 150 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Os ensaios foram realizados em diferentes temperaturas e frequências de carga conforme especificações da norma.

Durante os ensaios, foram medidas a tensão aplicada e a deformação axial recuperável dos corpos de prova, sendo esses dados utilizados para o cálculo do módulo dinâmico. Para a análise do desempenho da mistura, uma série de ensaios foi conduzida em temperaturas de 4, 20 e 40°C, abrangendo frequências de carga de 0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz para cada temperatura.

Cada corpo de prova foi equipado com transdutores LVDTs e testado em todas as 18 combinações de temperatura e frequência de carregamento. Os testes foram realizados em sequência, começando pela temperatura mais baixa e progredindo para a mais alta. Dentro de cada temperatura, os ensaios iniciaram com a maior frequência de carregamento e seguiram para as menores. Para cada temperatura, uma carga de contato (P_{\min}) diferente foi aplicada, correspondendo a 5% de um valor típico de carga

dinâmica geralmente observado nessa temperatura.

3.2.6 Análise estatística

3.2.6.1 ANOVA

A análise de variância (ANOVA) de fator único foi utilizada neste estudo para avaliar as diferenças significativas entre as médias de diferentes grupos. O objetivo foi comparar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas frente aos protocolos de envelhecimento: sem envelhecimento; envelhecimento a curto prazo, envelhecimento a longo prazo; envelhecimento com influência da umidade.

Inicialmente, as propriedades de interesse foram medidas em cada uma das amostras de misturas asfálticas. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância de fator único, utilizando um nível de significância de $\alpha = 0,05$. O teste de normalidade dos dados foi verificado por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, e a homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Levene.

A análise de ANOVA foi realizada para cada uma das propriedades mecânicas estudadas. Todos os cálculos estatísticos foram realizados utilizando o software estatístico Excel (versão 2021) e os resultados foram considerados significativos quando $p < 0,05$.

O teste foi realizado para os dois grupos de misturas asfálticas: CAP 50/70 e AMP 55/75. Os ensaios mecânicos submetidos ao teste estatístico foram resistência à tração, resistência retida à tração, módulo de resiliência, resistência à deformação permanente e módulo dinâmico (1Hz).

3.2.6.2 Teste *t* de Student

A fim de verificar o comportamento das misturas quanto ao tipo de ligante constituinte da mistura asfáltica, realizou-se o teste estatística *t* de Student. Esse método foi utilizado neste estudo para comparar as médias de dois grupos independentes. O objetivo foi investigar se existiam diferenças significativas nas propriedades mecânicas entre dois tipos de misturas asfálticas: com CAP 50/70 e com AMP 55/75.

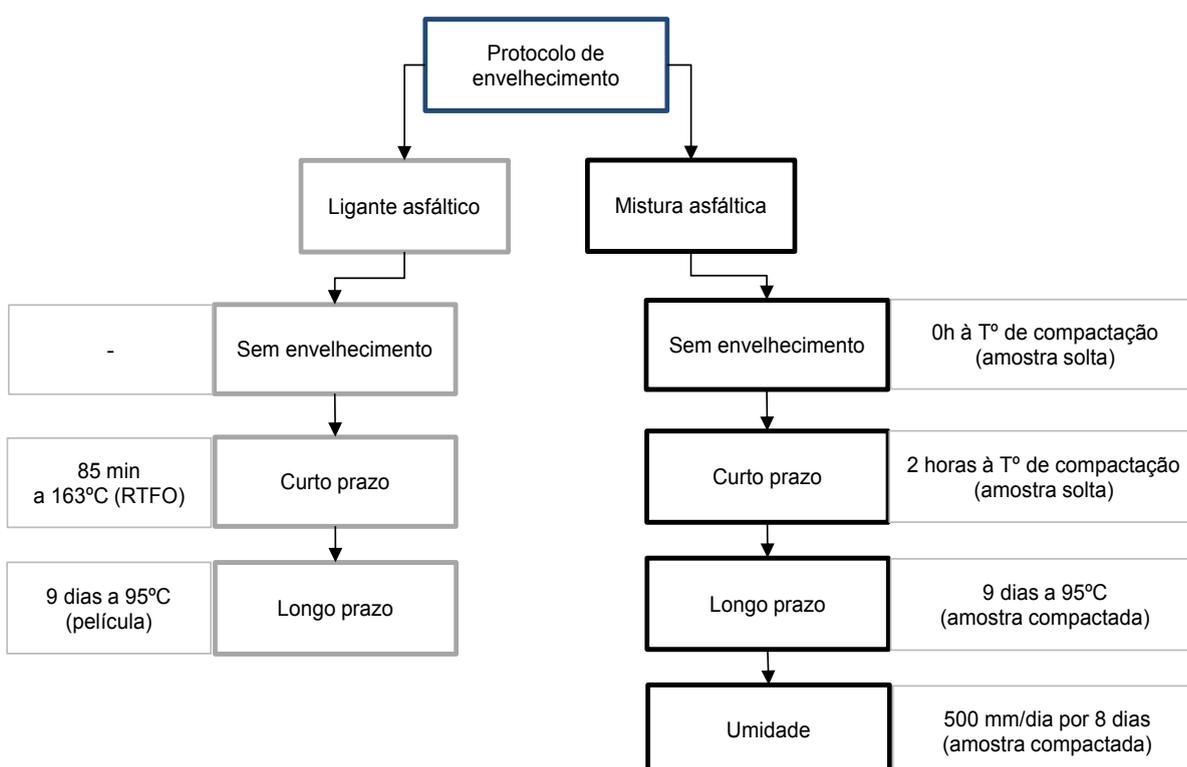
Antes de aplicar o teste *t* de Student, verificou-se a normalidade dos dados para cada grupo utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Utilizou-se um nível de significância de $\alpha = 0,05$ para determinar diferenças estatisticamente significativas. Todos os cálculos estatísticos foram realizados utilizando o software estatístico Excel (versão 2021).

Os resultados foram considerados significativos quando $p < 0,05$, indicando diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos. Realizou-se o teste para cada protocolo de envelhecimento entre os tipos de misturas (CAP 50/70 e AMP 55/75) a fim de verificar o comportamento das misturas frente a cada protocolo e suas diferenças.

3.2.7 Síntese dos parâmetros abordados e nomenclatura utilizada

A Figura 18 apresenta um resumo acerca dos parâmetros analisados para os dois tipos de misturas asfálticas.

Figura 18 - Resumo das variáveis aplicadas no protocolo de envelhecimento



Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 13 apresenta a nomenclatura utilizada nessa pesquisa de acordo com o tipo de ligante asfáltico e a condição de envelhecimento submetida.

Tabela 13 - Resumo das variáveis aplicadas no protocolo de envelhecimento

Identificação	Tipo de ligante asfáltico	Condição
R50/70	CAP 50/70	Sem envelhecimento
C50/70	CAP 50/70	Envelhecimento de curto prazo em estufa
L50/70	CAP 50/70	Envelhecimento de curto prazo + longo prazo em estufa
U50/70	CAP 50/70	Envelhecimento de curto prazo + longo prazo + umidade
R55/75	AMP 55/75	Sem envelhecimento

C55/75	AMP 55/75	Envelhecimento de curto prazo em estufa
L55/75	AMP 55/75	Envelhecimento de curto prazo + longo prazo em estufa
U55/75	AMP 55/75	Envelhecimento de curto prazo + longo prazo + umidade

Fonte: Autoria própria (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios empíricos, reológicos e químico dos ligantes asfálticos, além dos ensaios mecânicos das misturas asfálticas para as condições de envelhecimento propostas. As interpretações e discussões foram baseadas na literatura apresentada no capítulo de revisão bibliográfica.

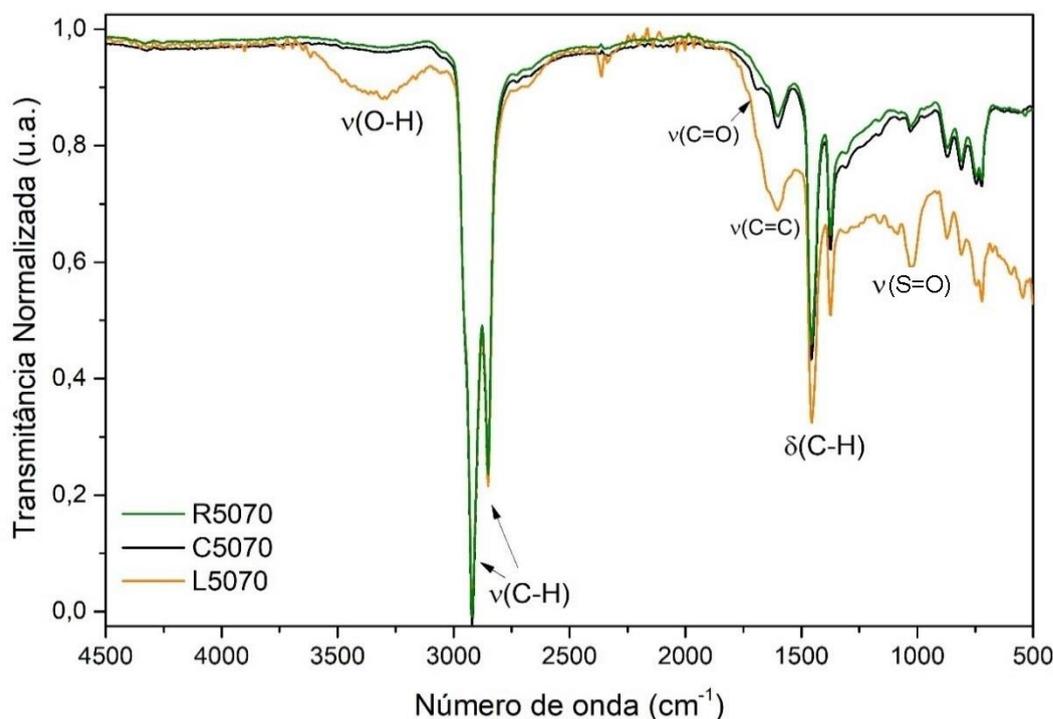
4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Esta seção apresenta os resultados e discussões da análise química referente aos ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75 nas condições de envelhecimento térmico por meio da análise de espectrometria por infravermelho.

4.1.1 Infravermelho – FTIR

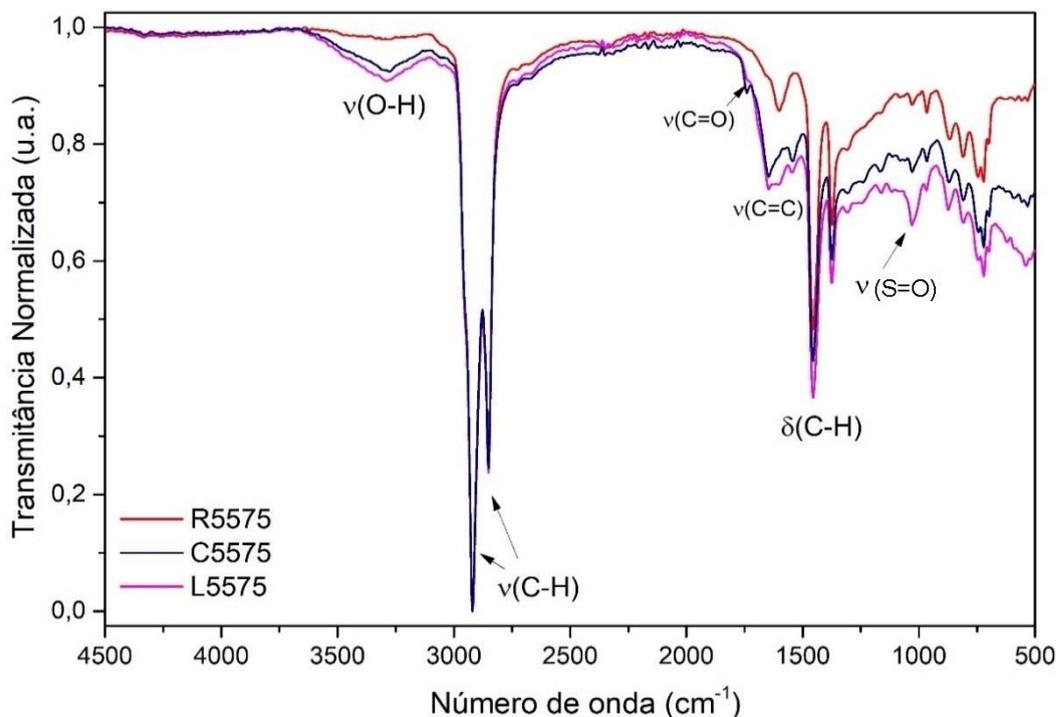
Na Figura 19 e na Figura 20 estão disponíveis os espectros de FTIR para as famílias do CAP 50/70 e AMP 55/75.

Figura 19 - Espectros de FTIR para os ligantes asfálticos CAP 50/70 submetidos ao processo de envelhecimento



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 20 - Espectros de FTIR para o ligante asfáltico AMP 55/75 submetido ao processo de envelhecimento



Fonte: Autoria própria (2023)

Os picos da composição dos ligantes (CAP 50/70 e AMP 55/75) estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos. Nesse sentido, caracterizam-se por picos de alta intensidade referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3000 e 2800 cm^{-1} .

Nessa citada 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 disso, ocorre 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 1478 cm^{-1} , sendo esse geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) em 1455 cm^{-1} . Diante disso, o aparecimento desse último está em conformidade com os picos deste grupo para deformação axial (2921 e 2850 cm^{-1}), enquanto que o pico em 1373

cm^{-1} , referente a deformação angular em grupos metila ($-\text{CH}_3$), está em conformidade com picos de deformação axial em 2952 e 2869 cm^{-1} .

Por fim, especificamente para o ligante AMP 55/75, há um pico em torno de 966 cm^{-1} , característico do polímero SBS (não presente no ligante 50/70), bem como pico em torno de 720 cm^{-1} . Esse pico 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 para ambos ligantes.

Nessa conjuntura, foram encontrados alguns picos relevantes para indicar um grau de oxidação para os processos de envelhecimento, como em regiões em torno de 1700 cm^{-1} , para estiramentos de carbonilas ($\text{C}=\text{O}$) ou em torno de 1030 cm^{-1} , para estiramentos de grupos sulfóxidos ($\text{S}=\text{O}$). Outra região em que foi encontrado sinal indicativo de funções oxigenadas foi entre 3200 e 3600 cm^{-1} , relativo à vibração em grupos O-H (hidroxilas). O comparativo entre os protocolos de envelhecimento assim como dos ligantes também está posto em anexo.

Para estes picos, nota-se à medida que ocorreram os processos de envelhecimento térmico nos ligantes, houve um aumento das intensidades. Esse fenômeno é indicativo de maior nível de oxidação, principalmente quando o ligante é exposto durante período prolongado ao seu envelhecimento (amostras L50/70 e L55/75).

Na Tabela 14 estão apresentados valores para índices de oxidação de regiões dos espectros relacionadas a funções orgânicas oxigenadas obtidos por integração de área de acordo com as equações 1, 2 e 3.

Tabela 14 - Índices de oxidação para as amostras de ligantes asfálticos submetidas aos protocolos de envelhecimento

Família	$I_{\text{C}=\text{O}}$ (%)	$I_{\text{S}=\text{O}}$ (%)	I_{OH} (%)	Total (%)	I_{966} (%)
R50/70	0,98	2,02	5,02	8,02	-
C50/70	1,07	2,01	5,47	8,55	-
L50/70	1,16	2,08	6,97	10,21	-
R55/75	1,04	1,64	5,30	7,98	1,89
C55/75	1,06	2,03	7,02	10,11	1,92
L55/75	1,62	2,38	7,00	11,00	1,99

Fonte: Autoria própria (2023)

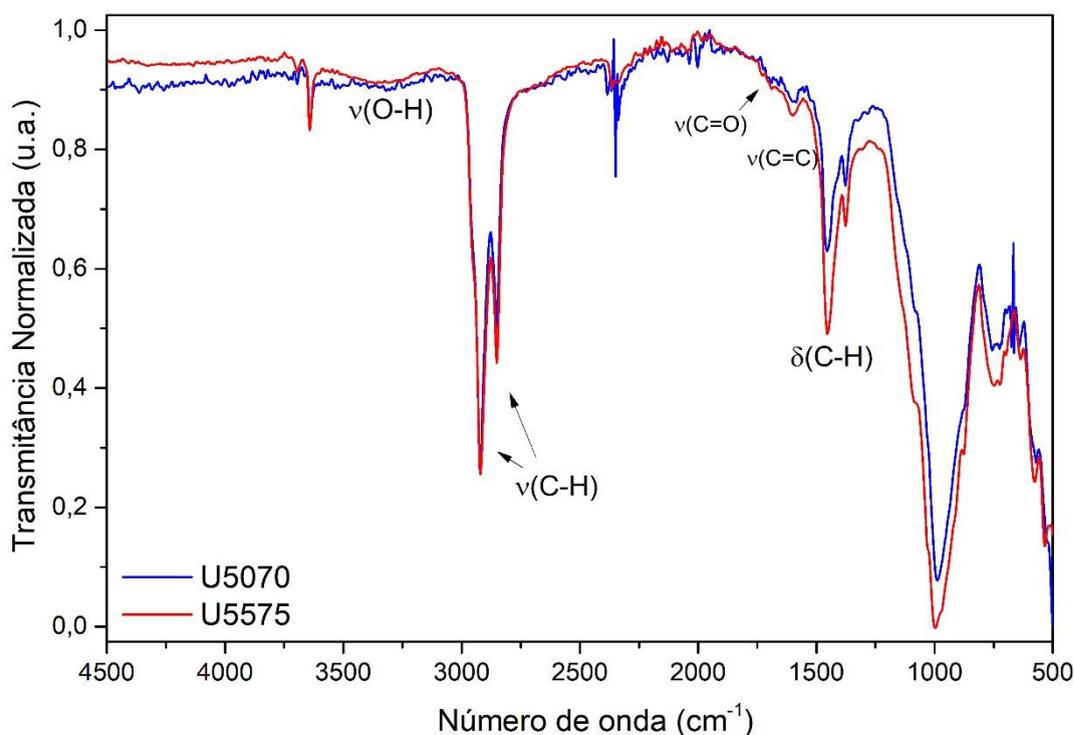
Os processos de envelhecimento térmico mais prolongados indicaram maiores valores de oxidação em comparação aos de curto prazo, sendo este padrão para ambos ligantes. Esse comportamento é observado pela progressão expressiva (maior percentual) das bandas de hidroxila, carbonila e sulfóxidos após o envelhecimento a longo prazo. Corroborando, adicionalmente, para esse entendimento, os estudos de Chowdhury, Mullapudi e Redy (2022) e Zhang *et al.* (2022).

Acerca especificamente do AMP 55/75, leves oscilações de área foram encontradas no pico 966 cm^{-1} , indicativo de ligação de polibutadieno, sendo a variação mais significativa no envelhecimento longo prazo (L55/75). Gao, Gu e Zhao (2013) verificaram resultado semelhante e apontaram que a degeneração do ligante modificado com SBS é causada principalmente pela reação oxidativa e ruptura da dupla ligação C=C.

Entretanto, tal comportamento (degradação do polímero SBS) não pode ser deduzido nessa pesquisa. O processo de oxidação dos grupos funcionais nas regiões (3200 e 3600 cm^{-1} ; 1700 cm^{-1} e 1030 cm^{-1}), elevaram a área total, o que comprometeu o processo comparativo. Nesse aspecto, aponta-se somente a existência dessa região.

Na Figura 21 estão disponíveis os espectros para as amostras U50/70 e U55/75. Nessas amostras, há presença de outros picos, como em torno de 1000 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} , porém não relacionados aos ligantes em si, mas relacionados à resquícios de agregados que foram aderidos às amostras. Diante disso, não foram computados valores para 1030 cm^{-1} , relacionado a oxidação (S=O), bem como o de 966 cm^{-1} , por estarem sobrepostos.

Figura 21 - Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico U5070 e U5575.



Fonte: Autoria própria (2023)

Para avaliar o grau de oxidação, conforme realizado também no envelhecimento térmico, foram computados apenas os picos de carbonilas e hidroxilas (Tabela 15).

Tabela 15 - Índices de oxidação para as amostras de ligantes asfálticos U5070 e U5575.

Família	I _{C=O} (%)	I _{OH} (%)	Total (%)
U5070	1,89	7,30	9,19
U5575	1,82	7,09	8,91

Fonte: Autoria própria (2023)

Os valores para carbonilas e hidroxilas são levemente superiores se comparados com as amostras L50/70 e L55/75. Tal comportamento pode ser devido a uma etapa a mais de envelhecimento (umidade), uma vez que é provável uma interação da água na superfície do ligante.

O processo de extração da amostra para essas famílias ocorreu diretamente da mistura asfáltica, o qual sofreu processo distinto de envelhecimento a curto prazo (2h à temperatura de compactação), bem como contato com agregados. Nesse intuito, Yan *et al.* (2020) apontou que o envelhecimento padrão RTFO (163°C) não foi comparável com o envelhecimento de curto prazo da mistura asfáltica e pouco

crescimento de carbonila/sulfóxido foi observado a partir do espectro de amostras submetidas a curto prazo.

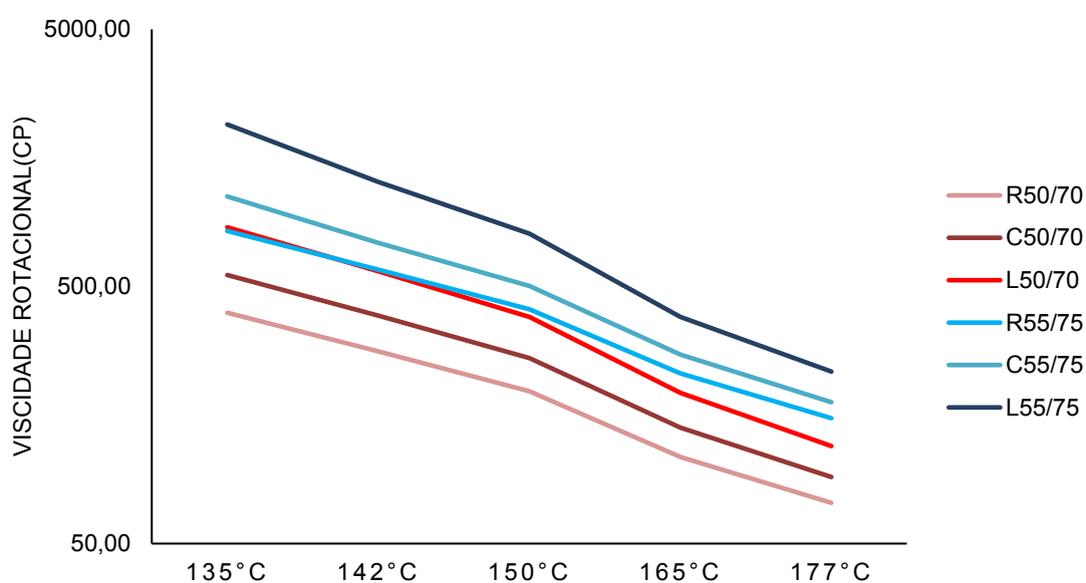
4.2 ANÁLISE REOLÓGICA

Os parâmetros reológicos dos ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75 foram examinados nas três condições de envelhecimento térmico, de acordo com o descrito no Item 3.2.1.

4.2.1 Viscosidade Rotacional

A Figura 22 apresenta os resultados obtidos para as temperaturas de viscosidade dos ligantes asfálticos nas situações: sem envelhecimento (R50/70; R55/75), envelhecimento a curto prazo (C50/70 e C55/75) e envelhecimento a longo prazo (L50/70 e L55/75).

Figura 22 - Viscosidade Rotacional para o CAP 50/70 e AMP 55/75 diante das três condições de envelhecimento térmico



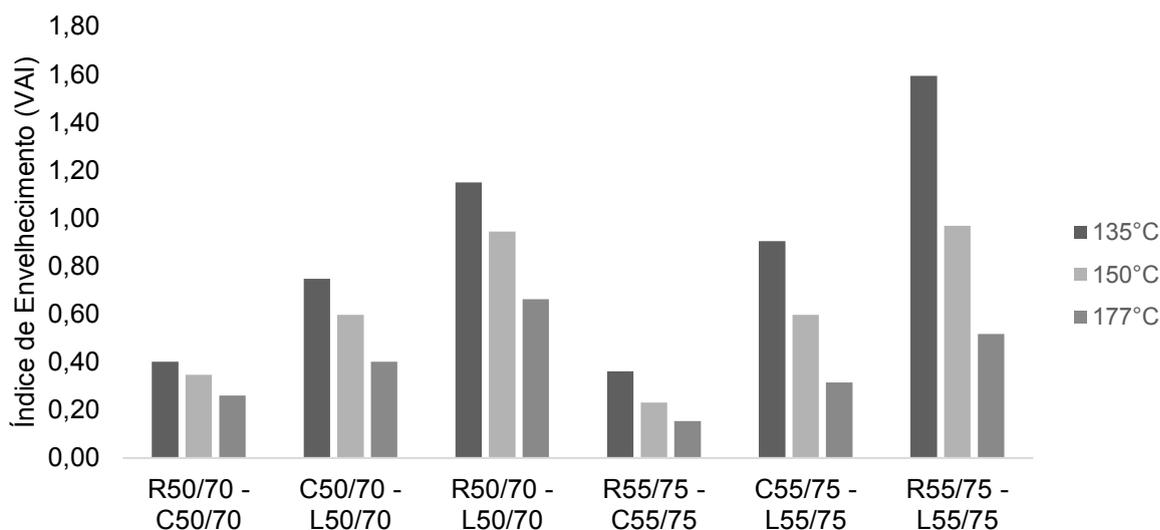
Fonte: Autoria própria (2023)

Observou-se um comportamento esperado, visto que o AMP 55/75 possuiu maior viscosidade frente ao CAP 50/70. Além disso, foi verificado uma progressão da viscosidade para as famílias sujeitas ao envelhecimento térmico.

O processo de envelhecimento promove volatilização e oxidação do material, de maneira a enrijecê-lo e torná-lo, portanto, mais viscoso. Para ambos os ligantes utilizados, a progressão da viscosidade ocorreu de maneira similar, o que não apontou um comportamento distinto significativo entre as famílias CAP 50/70 e AMP 55/75.

A fim de mensurar quantitativamente o impacto do envelhecimento na viscosidade, aplicou-se o “*Viscosity Aging Index*” (VAI) de acordo com a equação 5. Os resultados encontram-se apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Viscosity Aging Index (VAI) dos ligantes asfálticos



Fonte: Autoria própria (2023)

É possível observar um aumento contínuo nos valores de VAI, sendo o mais expressivo na família C55/75-L55-75 para o envelhecimento a longo prazo (L55/75). Comportamento semelhante foi observado no estudo de Zhu, Chen e Yu (2022), os quais verificaram maior viscosidade para ligante com SBS após o envelhecimento de curto prazo.

Entretanto, Hu *et al.* (2020) verificaram uma redução no VAI para ligante asfáltico modificado com SBS no envelhecimento a curto prazo (TFOT), e posterior aumento a longo prazo (PAV). Os autores atribuíram o dano da estrutura polimérica e a degradação do polímero como efeitos mais significativos que a oxidação do ligante, de maneira a reduzir a viscosidade. Tal comportamento (mitigação da viscosidade) não foi encontrado nessa pesquisa e o processo de degradação do SBS foi discutido na análise química.

4.2.2 Grau de Desempenho - PG

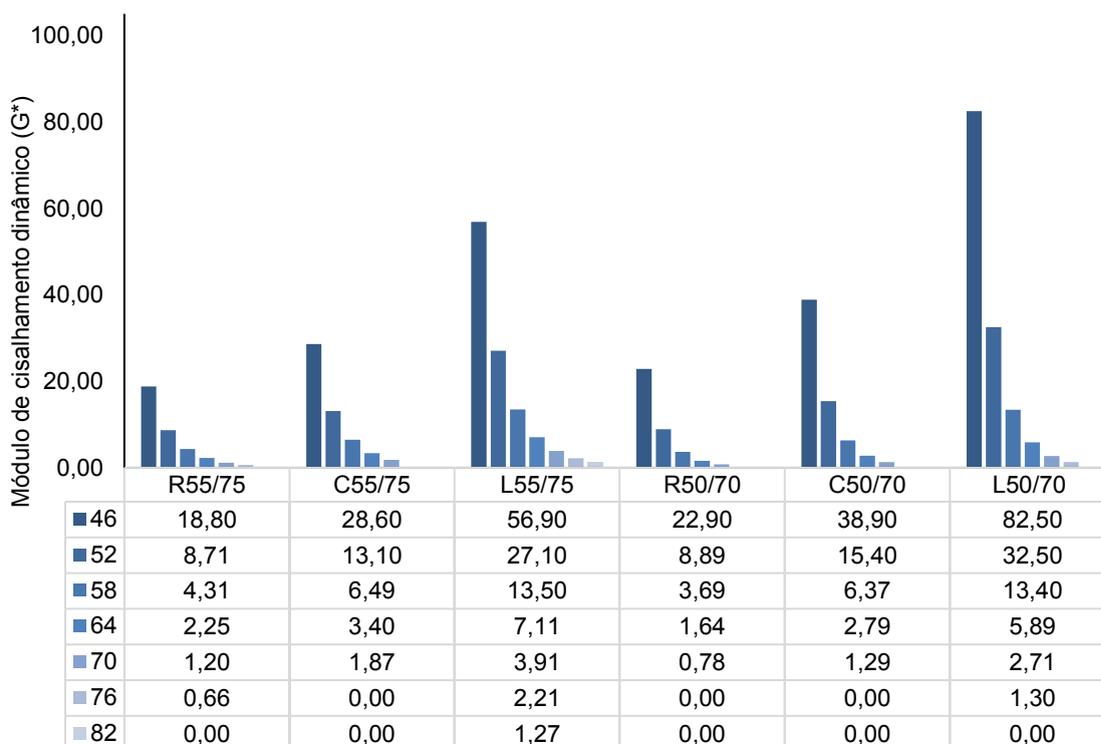
O Grau de Desempenho (PG), que delimita a temperatura máxima de utilização do ligante, e o módulo de cisalhamento complexo (G^*) - relacionado à rigidez do ligante e são apresentados na Tabela 16 e Figura 24, respectivamente, para os ligantes AMP 55/75 e CAP 50/70.

Tabela 16 - Grau de desempenho dos ligantes asfálticos (PG e PG contínuo)

	R55/75	C55/75	L55/75	R50/70	C50/70	L50/70
PG	70	70	76	64	64	70
PG contínuo	72	71	76	68	66	71

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 24 - Parâmetro Módulo de cisalhamento dinâmico (G^*) para o ligante AMP 55/75 e CAP 50/70



Fonte: Autoria própria (2023)

Observou-se que tanto o ligante AMP 55/75 quanto o CAP 50/70, as temperaturas de falha não modificaram após o envelhecimento a curto prazo. Todavia, o processo de envelhecimento a longo prazo (9 dias) alterou o desempenho do material, o qual, para o CAP 50/70, a classificação elevou para PG70, enquanto o AMP 55/75 apresentou uma classificação de PG76.

Esse comportamento está relacionado ao aumento de rigidez do ligante, uma vez que o processo de envelhecimento a longo prazo promove maior viscosidade do material devido ao aumento de frações pesadas (alfaltenos). Diante disso, o acréscimo de resistência ao material (maior PG) está relacionado tanto ao aumento do módulo de cisalhamento dinâmico, bem como da elasticidade (baixo ângulo de fase).

Nesse sentido, o estudo de Marinho (2017) também verificou tendência similar em amostras de CAP 50/70 e AMP 55/75 submetidas ao RTFO e posterior envelhecimento em campo por 3 meses. Para envelhecimento a curto prazo, o autor

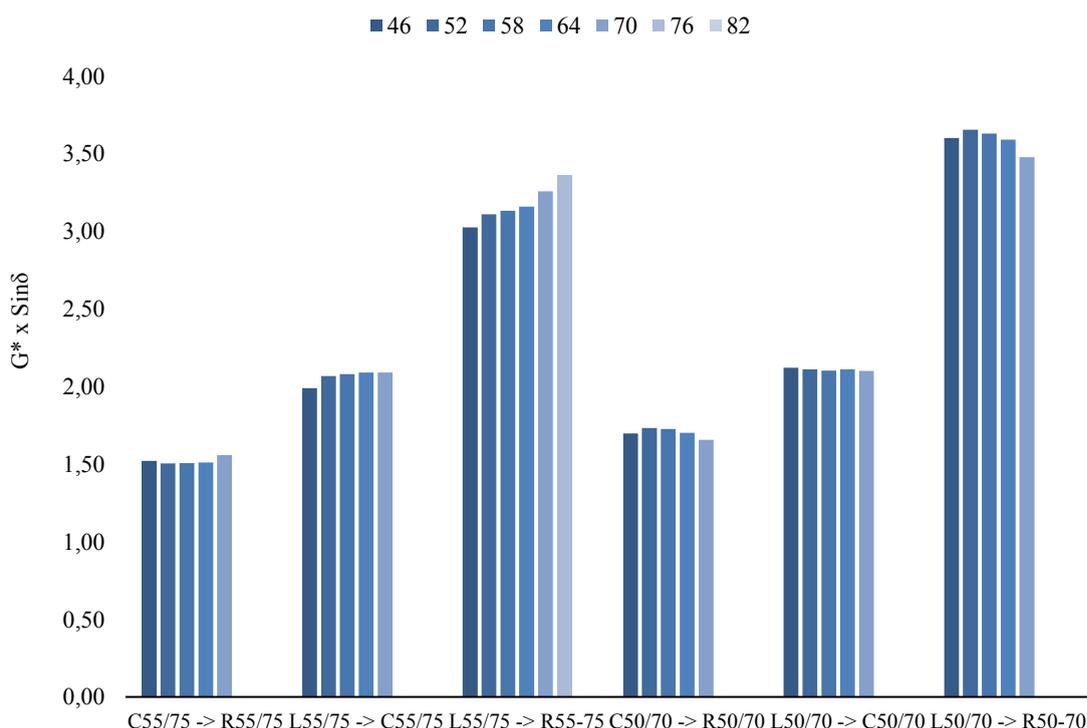
não identificou a mudança de temperatura de falha, entretanto, o envelhecimento tardio, após exposição térmica, umidade e radiação UV, enrijeceu o material e elevou sua temperatura de falha.

O processo de envelhecimento térmico promoveu um aumento gradual de rigidez para ambos os ligantes. O CAP 50/70 demonstrou-se mais suscetível ao endurecimento tanto para o envelhecimento a curto prazo, assim como para envelhecimento a longo prazo. Esse comportamento ocorreu em razão do processo oxidativo com a formação de grupos oxigenados.

À medida que a temperatura elevou, o ligante AMP 55/75 apresentou maior rigidez para quaisquer condições de envelhecimento analisadas, pois a presença da matriz polimérica permitiu maior elasticidade do material. Diante disso, Rosa Júnior (2015) também identificou que para maiores temperaturas, ligantes modificados com polímero apresentaram maior rigidez frente a ligantes convencionais.

A Figura 25 apresenta o Índice de Envelhecimento (AI) para os ligantes analisados.

Figura 25 - Índice de envelhecimento para o CAP 50/70 e AMP 55/75



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que houve um aumento no valores de IA à medida que ocorreu o envelhecimento térmico a curto e longo prazo. Essa tendência era esperada, uma vez que o ligante sofreu um processo de volatilização e enrijecimento mais severo a longo

prazo.

Para o CAP 50/70, houve uma maior suscetibilidade ao processo de envelhecimento térmico em relação ao AMP 55/75. Essa avaliação corrobora para a ação da matriz polimérica para os efeitos térmicos atuantes no ligante asfáltico. O estudo de Marinho (2017) reafirma essa tendência, visto que o autor identificou maiores valores de IA para ligante convencional (CAP 50/70) em relação a modificado com polímero (SBS) para envelhecimento em campo.

Ademais, verificou-se um aumento de IA para o AMP 55/75 à proporção que a temperatura foi elevada. Esse comportamento é divergente ao CAP 50/70 e está associado à elasticidade presente no ligante em razão do polímero SBS, ou seja, maior rigidez em temperaturas mais elevadas.

4.2.3 Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla – MSCR

O ensaio de MSCR teve por objetivo verificar o desempenho reológico do ligante asfáltico da deformação plástica. Diante disso, a Tabela 17 apresenta os dados obtidos do ensaio MSCR.

Tabela 17 - Parâmetros obtidos no teste de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

Família	Temperatura do ensaio (°C)	Percentual de recuperação (%)		Complância não recuperável Jnr (kPa ⁻¹)		Jnr, diff (%)
		0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	
R50/70	64	0,33	0	6,48	6,86	5,86
C50/70		5,45	0,33	3,66	3,98	8,74
L50/70		3,54	2	1,55	1,66	7,1
R55/75		65,94	31,29	1,02	2,39	134,31
C55/75		75	62,03	0,47	0,75	59,57
L55/75		67,87	60,61	0,16	0,2	26,71

Fonte: Autoria própria (2023)

De maneira inicial, avaliou-se a complância não recuperável para os níveis de 3.2 kPa. Nesse sentido, o AMP 55/75 apresentou uma redução de valores, os quais variaram de 2,39 (R55/75) a 0,20 (L55/75). O CAP 50/70, para mesma análise, manteve a tendência de redução do Jnr (6,86 - R50/70) à medida que aplicou-se as condições de envelhecimento (1,66 - L50/70).

Diante do exposto, é possível verificar que o processo de envelhecimento promoveu a oxidação do material, e, por conseguinte, maior rigidez. Esse comportamento, a nível de avaliação acerca do desempenho mecânico à deformação permanente e com base apenas na camada de mistura asfáltica, não promove

comportamento negativo ao longo da vida útil (DUBOIS, MEHTA E NOLAN, 2014; TAREFDER e YOUSEFI, 2015).

Com o propósito de quantificar a capacidade de carga do pavimento em relação ao volume de tráfego, a AASHTO M320 (2017) adotou uma classificação fundamentada no valor do parâmetro Jnr a 3.2 kPa. Os valores são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Classe de tráfego conforme Jnr a 3.2 kPa

Propriedade	Jnr (kPa ⁻¹)	Tipo de tráfego	Número de passadas em um eixo padrão
Jnr a 3.2 kPa na temperatura máxima de PG	2.0 – 4.0	Padrão (S)	<10 milhões
	1.0 – 2.0	Pesado (H)	>10 milhões
	0.5 – 1.0	Muito pesado (V)	>30 milhões
	0 – 0.5	Extremamente pesado (E)	>100 milhões

Fonte: AASHTO M320 (2017)

Os ligante asfálticos em sua condição inicial (sem envelhecimento) apresentam Jnr 3.2 kPa elevados, acima dos valores máximos permitidos (4.0) para os dois tipos de ligantes analisados (R50/70 e R55/75).

No ligante asfáltico AMP 55/75, o envelhecimento a curto prazo (C55/75) enquadrou o ligante a um nível tráfego “muito pesado” (0,75), enquanto que o envelhecimento tardio (L55/75) proporcionou a classificação de “extremamente pesado” (0,20). Nessa conjuntura, a combinação de ligantes asfálticos com polímero tipo SBS; processo de oxidação a longo prazo; bem como análise em temperaturas não críticas (PG 64, os quais dificilmente os pavimentos da região Nordeste do Brasil são submetidos) proporcionam elevada capacidade de resposta do material frente a deformações permanentes.

A respeito do CAP 50/70, o processo de envelhecimento a curto prazo (C50/70) o enquadrando para suporte de tráfego “padrão” (3,98). O envelhecimento tardio a 9 dias (L50/70) promoveu o enquadramento no tráfego “pesado” (1,66). Esse comportamento também foi verificado por Hao *et al.* (2020), os quais utilizaram ligantes de PG64 e PG76 (puros e modificados com SBS). Os valores de Jnr foram reduzidos ao passo que se ampliou o período de envelhecimento a curto prazo, assim como desempenho superior do asfalto modificado com polímero mesmo quando comparado ao ligante asfáltico puro em todas os períodos de envelhecimento. Para ambos os ligantes, ressalta-se a limitação dessa correlação, uma vez que as

condições para surgimento da deformação permanente também perpassam por características da mistura asfáltica e da estrutura do pavimento.

O envelhecimento promoveu uma maior rigidez ao ligante asfáltico, uma vez que ocorreu uma perda de frações leves devido ao processo de volatilização e oxidação (aumento do teor de asfalto). Comportamento semelhante foi observado por Takahashi (2020), a qual apontou menor suscetibilidade à deformação à medida que o ligante foi envelhecido. Mogawer *et al.* (2013) explana que o processo de envelhecimento não afeta negativamente à resistência do ligante à deformação, visto que ocorre uma tendência natural de aumento da rigidez.

Acerca do percentual de recuperação, atenta-se apenas ao ligante AMP 55/75, uma vez que o CAP 50/70 não apresenta níveis significativos dessa propriedade. Nesse sentido, houve uma pequena redução da recuperação elástica (9,5% para 0,1kPa e 2,5% para 3,2kPa) à medida que o ligante asfáltico foi envelhecido (C55/75 para L55/75). Martins (2014) destaca que o envelhecimento, devido ao aumento de rigidez, mitiga a capacidade de relaxamento a tensões e, conseqüentemente, diminuição da elasticidade. Essa redução, ainda que não comprometedor para o desempenho do ligante, pode estar associada à degradação da cadeia polimérica do SBS quando submetido ao envelhecimento.

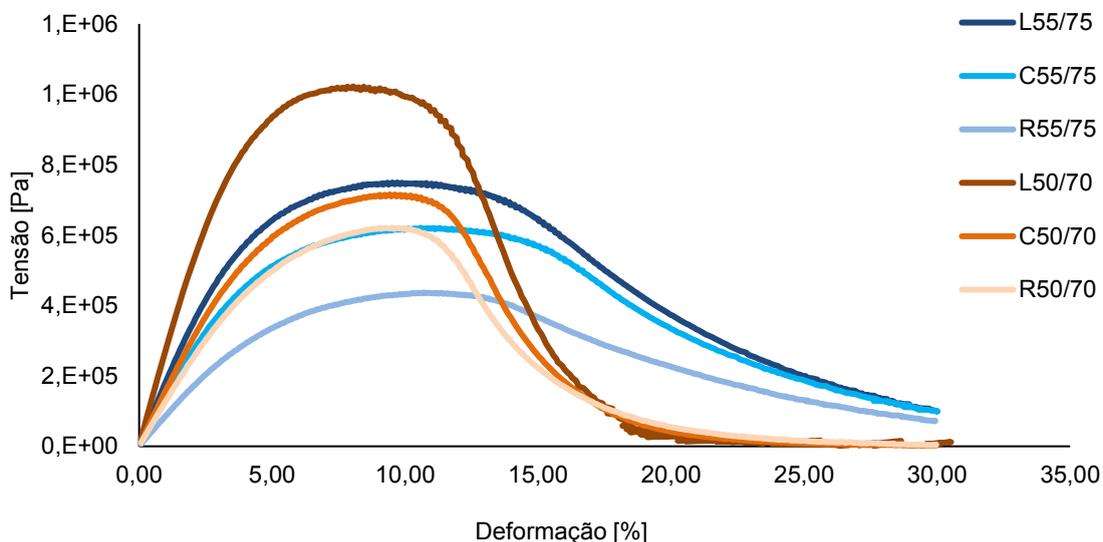
Para os níveis de Jnr_{diff}, ambos os ligantes apresentaram valores abaixo do permissível a norma AASHTO M320 (2017) – 75% nas condições de envelhecimento a curto e longo prazos. Tal comportamento indica baixa suscetibilidade a variações de tensões. Ou seja, ainda com o enrijecimento do ligante, o material se comporta uniforme para baixas e altas tensões.

Todavia, apenas a família R55/75, para ambas as temperaturas analisadas, apresentou valores acima de 75%. Nas duas tensões aplicadas (0.1kPa e 3.2kPa) o material apresentou baixos índices de suscetibilidade à deformação (Jnr 0.1kPa e JnR 3.2kPa). Entretanto, a ausência do processo oxidativo proporcionou um elevada variação de baixa para alta tensão.

4.2.4 Varredura Linear de Amplitude - LAS

O estudo da fadiga do ligante asfáltico ocorreu para os três níveis de envelhecimento térmico. Inicialmente, a Figura 26 apresenta as curvas de tensão cisalhante versus deformação.

Figura 26 - Taxa de cisalhamento versus deformação para os níveis de envelhecimento



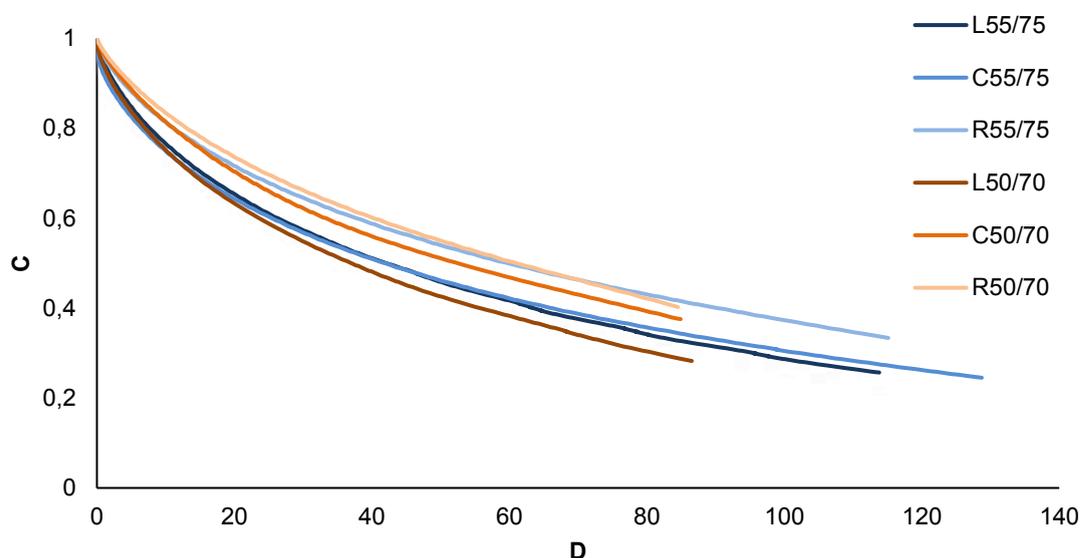
Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se um comportamento típico do CAP 50/70 e AMP 55/75. O ligante convencional apresentou características de fragilidade, ou seja, um pico de resistência com rompimento brusco ao aumento de deformação. O AMP 55/75, devido a inserção de polímero SBS, apresentou estabilidade na capacidade de suporte (tensão) para maiores níveis de deformação, devido à sua característica dúctil.

Todavia, comportamento atípico foi verificado à medida que se implementou o processo de envelhecimento. Tanto para o CAP 50/70, bem como para o AMP 55/75, houve um aumento de tensão para mesmo nível de deformação, o que não era esperado em razão do enrijecimento do ligante, conforme verificado na viscosidade e no módulo de cisalhamento dinâmico. Nesse caso, a geometria da amostra na realização do ensaio pode ser uma possível explicação para tal comportamento.

A Figura 27 apresenta as curvas de integridade (C) versus acúmulo de dano (S) dos ligantes asfálticos.

Figura 27 - Curva Integridade (C) vs Dano (D)



Fonte: Autoria própria (2023)

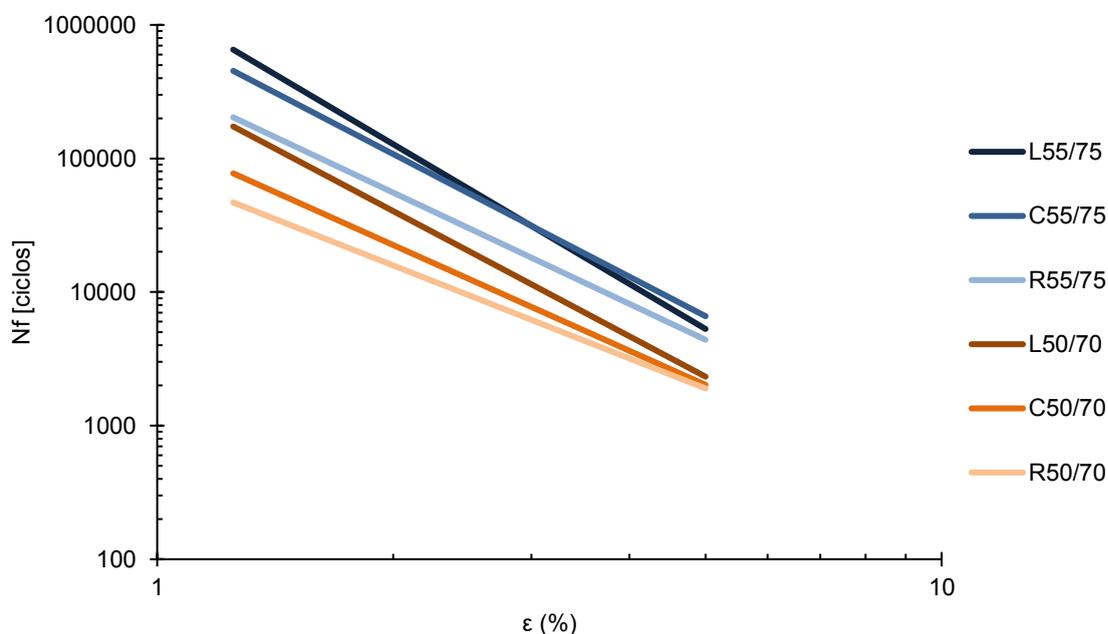
É possível verificar o deslocamento para baixo das curvas de famílias com CAP 50/70 frente ao AMP 55/75 quando analisado o mesmo nível de envelhecimento. Isto é, o AMP 55/75, para uma mesma condição de dano, possui maior integridade do material. Esse comportamento provavelmente ocorreu em razão da cadeia polimérica presente no AMP 55/75 e resultados obtidos por por Hasan *et al.* (2019) e Hassanpour-Kasanagh *et al.* (2020) reafirmam esse desempenho.

Observou-se que o processo de oxidação reduziu a resposta ao dano dos ligantes asfálticos. Nesse sentido, ocorreu um deslocamento das curvas para baixo à medida que o nível de envelhecimento aumentou. Infere-se que, possivelmente, as famílias envelhecidas possuam um prévio acúmulo de dano e que, devido a sua maior rigidez, o material pode se tornar mais suscetível ao trincamento após aplicação de carregamento.

De maneira semelhante, Marinho (2023) também observou redução da curva CS quando envelhecido o ligante asfáltico a 85°C por 5 dias em estufa, frente ao ligante base. Ressalta-se, entretanto, que a curva CS analisada isoladamente não pode prever ou comparar o desempenho de ligantes asfálticos frente à fadiga (YANG *et al.*, 2022).

Com a finalidade de averiguar a vida de fadiga, a Figura 28 apresenta as curvas de Wöhle dos ligantes asfálticos utilizados.

Figura 28 - Curvas de Wöhler para os níveis de envelhecimento dos ligantes asfálticos



Fonte: Autoria própria (2023)

O AMP 55/75 possuiu melhor desempenho à fadiga quando comparado ao CAP 50/70 dentro do mesmo nível de envelhecimento. Além disto, foi verificado ao passo que o ligante se tornou mais oxidado, elevou-se o número de ciclos suportados à fadiga (N_f de $L55/75 > C55/75 > R55/75$ e $N_f L50/70 > C50/70; R50/70$).

Esse comportamento foi divergente ao verificado na curva de CS. O melhoramento da fadiga na curva de Wöhle à medida que o ligante asfáltico é envelhecido também foi verificado por Oliveira (2022), o qual constatou que maiores períodos de envelhecimento em RTFO promove melhor resposta (maior N_f) ao ligante asfáltico.

Nesse cenário, observou-se na Figura 28 que quanto mais envelhecida uma família, mais acentuada é a inclinação da reta. Tal comportamento promove um ponto de conversão, de maneira a tornar o ligante menos oxidado, mais resistente à fadiga. Para a família L55/75 em relação à C55/75, esse ponto ocorreu em deformação aproximada de 2,5%, enquanto que C55/75 a respeito de R55/75 foi em cerca de 5% de deformação. Para a mesma análise nas famílias do CAP 50/70 essa convergência também ocorreu próximo a 5%.

O endurecimento do ligante asfáltico, portanto, melhorou a resposta à fadiga apenas para baixos níveis de deformação. Contribui-se para essa afirmação o estudo de Ziari, Amini e Golic (2020). Os autores avaliaram distintas misturas e ligantes asfálticos submetidos a envelhecimento curto prazo em RTFO e a longo prazo nas

metodologias PAV e estufa. Além da observação de resposta positiva à fadiga em amostras envelhecidas em regiões de pequenas deformações, apontaram a dependência do tipo de ligante para esse comportamento, conforme constatado também nesta pesquisa.

Nessa perspectiva, Underwood (2011) e Hintz *et al.* (2011) propuseram o fator de fadiga do ligante (FFL) com base na relação entre o LAS e a fadiga em misturas asfálticas, utilizando como base o modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado S-VECD.

A equação 7 apresenta o cálculo do FFL, o qual é proveniente da área abaixo das curvas de fadiga para os níveis de deformação 1,25% 2,50%.

$$FFL = \frac{(\log(N_{f1,25\%}) + \log(N_{f2,5\%}))}{2} \times (\log(0,025) - \log(0,0125)) \quad (\text{equação 7})$$

Onde: $N_{f1,25\%}$ é a vida de fadiga do ligante a 1,25% de deformação e $N_{f2,5\%}$ é a vida de fadiga do ligante a 2,5% de deformação.

Nesta conjuntura, Nascimento (2016) apud Possebon (2018) definiu limites para o FFL consoante banco de dados acumulado pela Petrobrás no Brasil. A citada classificação é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Classificação do FFL consoante Nascimento (2016)

Classificação	FFL (19°C)
1 – Baixo	$FFB \leq 1,22$
2 – Inferior	$1,22 \leq FFB \leq 1,31$
3 – Intermediário	$1,31 \leq FFB \leq 1,48$
4 – Superior	$1,48 \leq FFB \leq 1,57$
5 – Excelente	$FFB \geq 1,57$

Fonte: Adaptado de Queiroz (2022) apud Nascimento (2021)

A Tabela 20 apresenta a classificação dos ligantes asfálticos e seus respectivos níveis de envelhecimento aplicados nessa pesquisa.

Tabela 20 - Classificação do FFL dos ligantes envelhecidos

Família	FFL (19°C)	Classificação Nascimento (2016)
R55/75	1,47	Intermediário
C55/75	1,56	Superior
L55/75	1,59	Excelente
R50/70	1,30	Inferior
C50/70	1,35	Intermediário
L50/70	1,44	Intermediário

Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se o melhor desempenho do ligante à medida que sofre processos

de envelhecimento. O processo de envelhecimento permitiu o enquadramento do CAP 50/70 em desempenho intermediário (C50/70 e L50/70), enquanto que o AMP 55/75 apresenta classificação superior (C55/75) e avança para excelente (L55/75) ao longo da vida útil.

Apesar disso, atenta-se ao fato da metodologia FFL apresentar o cálculo da área para baixas deformações (até 2,5%). A ampliação da zona de deformação até 15%, conforme proposto por Chen e Bahia (2021), pode alterar as classificações em simulações de envelhecimento a longo prazo para maiores níveis de deformação.

A razão do melhoramento de resposta à fadiga para ligantes envelhecidos ainda não é compreendida de forma plena, conforme verificado nas curvas de CS e Wöhle. Nesse intuito, Jahangir, Little e Bhasin (2015) utilizaram a Microscopia de Força Atômica (AFM), assim como testes de penetração de fluência e constataram que as discrepâncias nas propriedades reológicas entre distintas fases microestruturais diminuem à medida que o ligante asfáltico envelhece. Isso implica que a distribuição interna de tensão nas amostras envelhecidas de ligante asfáltico tende a se tornar mais uniforme ao longo do tempo (YANG *et al.*, 2022).

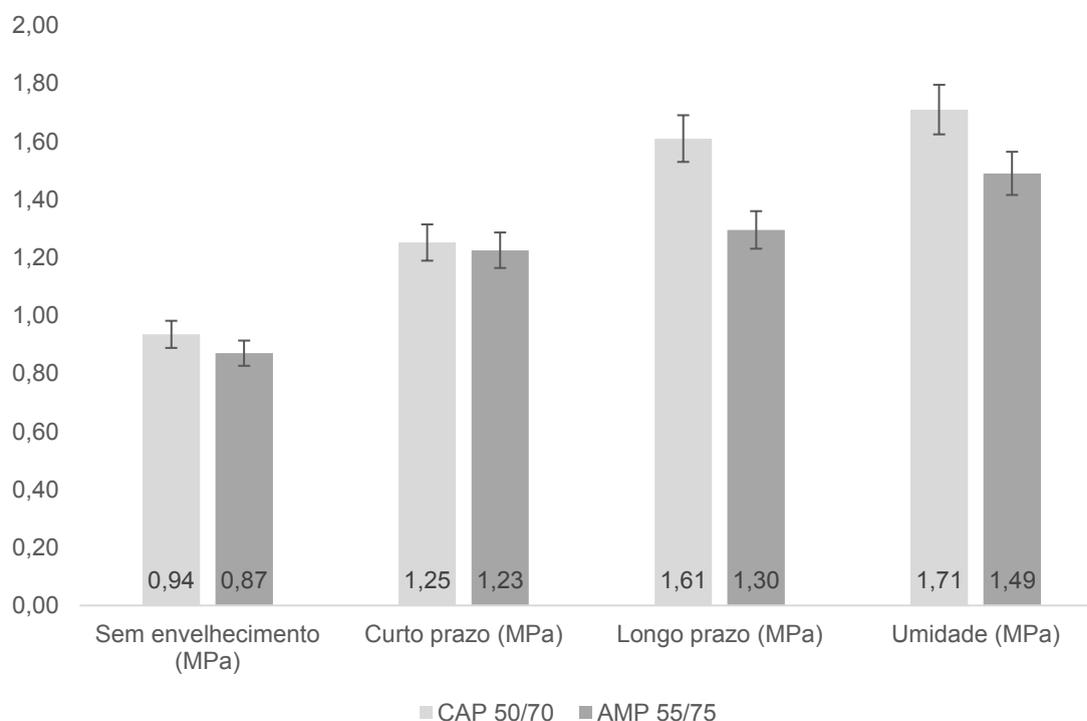
4.3 ANÁLISE MECÂNICA

Esta seção apresenta os resultados e discussões dos ensaios mecânicos referentes à mistura asfáltica sem envelhecimento e nas condições de envelhecimento (térmico a curto e longo prazo, além do acréscimo de umidade). Apresenta-se, concomitantemente, os valores para as amostras compostas pelos ligantes CAP50/70 e AMP 55/75.

4.3.1 Resistência à tração por compressão diametral – RT

A Figura 29 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT).

Figura 29 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Autoria própria (2023)

Inicialmente, acerca do envelhecimento térmico para as amostras compostas por CAP 50/70, verificou-se que todas as amostras apresentaram valores de RT que atendem à resistência à tração mínima de 0,65 MPa de acordo com a especificação de serviço DNIT 031/2006 para misturas asfálticas convencionais. O processo de envelhecimento térmico tende a aumentar significativamente a tensão suportada pelo material, uma vez que ocorre o enrijecimento do material após o processo de oxidação, conforme verificado pelo aumento de viscosidade.

A família sem envelhecimento, ainda que exposta minimamente à condição térmica, apresentou valor médio de 0,94 MPa. O envelhecimento a curto prazo provocou um aumento de 33%, enquanto que o de longo prazo provocou um ganho de RT de 71%, ambos em relação as amostras sem envelhecimento. Do mesmo modo, Costa (2022) também identificou a significância do acréscimo de RT ao curto prazo (comparado a famílias sem envelhecimento), pois, nas amostras analisadas, os valores convergem para os apresentados nesta pesquisa.

A resistência à tração após o envelhecimento de longo prazo aumentou em 29% em relação ao envelhecimento de curto prazo. Nesse aspecto, Arruda (2021) também verificou aumento similar dos valores de RT, todavia para amostras compactadas submetidas ao envelhecimento a longo prazo por 5 dias a 85°C,

conforme AASHTO R30 (2010). Essa circunstância pode ser um indicativo da influência do estado de compactação das amostras no envelhecimento a longo prazo, uma vez que o condicionamento a 9 dias a 95°C proporcionou envelhecimento semelhante a 5 dias a 85°C.

No que se refere ao envelhecimento térmico nas amostras constituídas por AMP 55/75, observou-se que todas as amostras apresentaram valores de RT que atendem à resistência à tração mínima de 0.70 MPa exigida consoante especificação de serviço DNIT-ME 385/99 para camada de rolamento. A família sem envelhecimento apresentou valor médio de 0,87 MPa. O envelhecimento a curto prazo provocou um incremento de 41%, similar ao encontrado nas misturas com CAP 50/70, porém o envelhecimento a longo prazo provocou um acréscimo de RT de 49%, ambos em relação a família L55/75.

A resistência à tração foi acrescida de 6% após o envelhecimento a longo prazo (L55/75), com relação ao valor após o envelhecimento de curto prazo (C55/75). Evidencia-se, portanto, a menor suscetibilidade do AMP quanto ao envelhecimento ao longo da vida útil. Essa resposta mecânica é corroborada pelo comportamento reológico do ligante asfáltico, uma vez que o AMP 55/75 apresentou menor módulo de cisalhamento dinâmico em relação ao CAP 50/70 para todas o envelhecimento a curto e longo prazos, assim como menor variação dessa rigidez entre o envelhecimento de curto prazo e longo prazo (C55/75 – L55/75).

Acerca da influência promovida pela umidade, observou-se um pequeno acréscimo de resistência à tração. Esse comportamento pode ser explicado pela oxidação do ligante asfáltico quando submetido ao contato com a água, conforme verificado em FTIR pelo aumento de grupos funcionais de hidroxila, carbolina e sulfóxidos.

De maneira semelhante, o estudo de Islam, Hossain e Tarefder (2015) também apresentou aumento de valores de RT para amostras expostas à umidade e à temperatura. Os autores verificaram que para baixo intervalo temporal em campo (menor que 30 dias), o impacto da umidade não provoca redução de resistência à tração, de maneira que a relação de oxidação formada pela água/ligante promoveu um enrijecimento da mistura asfáltica.

A Tabela 21 apresenta a análise estatística com o método Teste t de Student.

Tabela 21 - Teste t de Student - RT

	Sem envelhecimento	Curto prazo	Longo prazo	Umidade
Variância agrupada	0.0004375	0.00505	0.0008125	0.0016
Observações	3	3	3	3
Grau de liberdade	4	4	4	4
p-valor	0.01900518	0.688769983	0.000172477	0.002530808

Fonte: Autoria própria (2023)

Na análise por teste t de Student, observou-se que para todos os protocolos de envelhecimento, exceto curto prazo (C50/70 e C55/75), as misturas apresentaram diferença estatística significativa entre as médias observadas com p-valores abaixo do nível de significância de 5%.

Diante disso, verificou-se, principalmente para efeitos prolongados de envelhecimento (longo prazo e umidade), a maior resistência à tração de misturas com CAP 50/70. Esse comportamento pode estar atrelado a uma elevada rigidez, conforme verificado no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante.

A Tabela 22 apresenta a análise estatística com o método ANOVA.

Tabela 22 - Teste ANOVA - RT

ANOVA - CAP 50/70 RT						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor	F _{tab}
Entre grupos	1.130.006	3	0.376669	182.0755	1.06x10 ⁻⁷	4.066181
Dentro dos grupos	0.01655	8	0.002069	NA	NA	NA
Total	1.146.556	11	NA	NA	NA	NA
ANOVA - AMP 55/75 RT						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor	F _{tab}
Entre grupos	0.60315	3	0.20105	106.8704	8.56x10 ⁻⁷	4.066181
Dentro dos grupos	0.01505	8	0.001881	NA	NA	NA
Total	0.6182	11	NA	NA	NA	NA

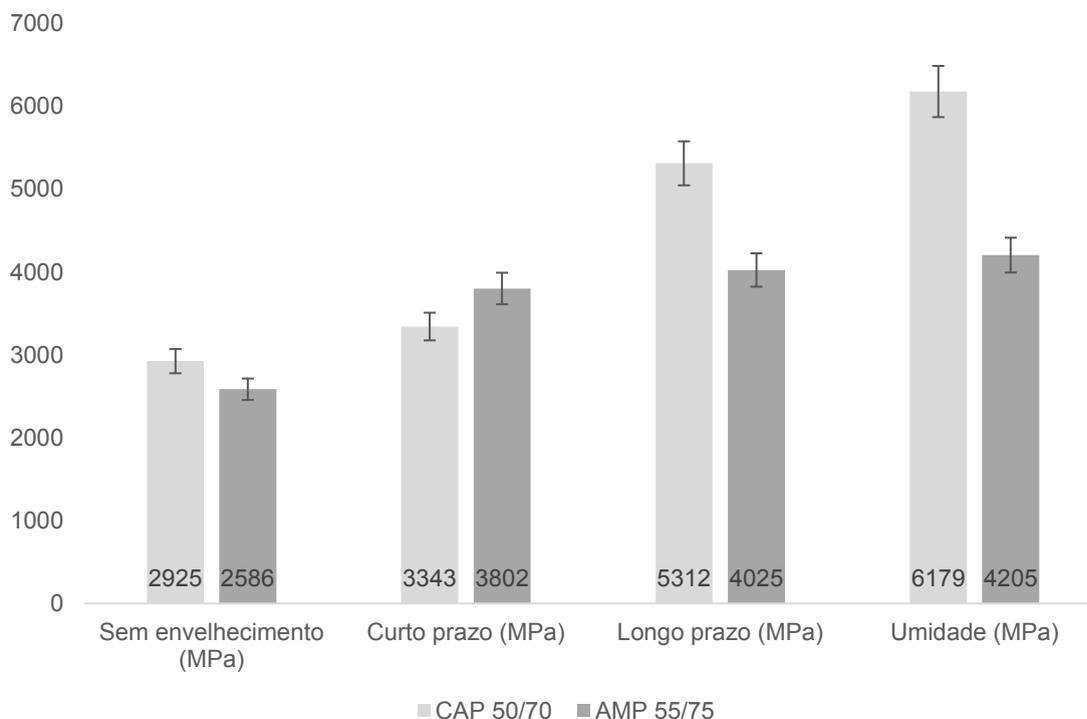
Fonte: Autoria própria (2023)

Para os dois tipos de misturas analisadas, os protocolos de envelhecimento apresentaram nível de significância inferior a 5%. Isso demonstra que os processos de envelhecimento promoveram um aumento de resistência à tração independente do tipo de ligante utilizado na mistura asfáltica .

4.3.2 Módulo de Resiliência – MR

A Figura 30 apresenta os resultados de módulo de resiliência (MR) para as distintas misturas asfálticas nas respectivas condições de envelhecimento.

Figura 30 - Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência



Fonte: Autoria própria (2023)

A partir da análise dos dados apresentados, é possível verificar a influência do envelhecimento na progressão da rigidez nas distintas misturas. Para o envelhecimento térmico nas famílias com CAP 50/70, o processo oxidativo a curto prazo (C50/70) promoveu um aumento de 14% e o longo prazo (L50/70) de 82%, ambos em relação a família sem envelhecimento (R50/70). A relação entre o envelhecimento de curto prazo (C50/70) e longo prazo (L50/70) foi de aproximadamente 53%. O comportamento gradual de elevação da rigidez à proporção que se aplica o envelhecimento ocorreu dentro do esperado, visto que corroboram com as análises de Gennessaux (2015); Yin *et al.* (2017) e Sirin *et al.* (2018).

A respeito das misturas asfálticas com AMP 55/75, manteve-se a inclinação ao crescimento da rigidez à proporção que é promovido o envelhecimento térmico ao longo do tempo. Nesse sentido, o módulo de resiliência, após o envelhecimento de curto prazo (C55/75), foi acrescido de 47%, enquanto que a longo prazo (L55/75) foi ampliado em 56%, ambos em relação a família de referência (R55/75). O aumento do MR ao longo da vida útil (L55/75) após simulação de usinagem (C55/75) foi de 6%. O impacto do envelhecimento térmico a longo prazo na mistura com AMP 55/75 foi de menor relevância em relação ao curto prazo. Esse comportamento condiz com o encontrado no estudo de Islam, Ransinchung e Ravindranath (2023).

O aumento expressivo da rigidez no curto prazo condiz com a resistência à tração quando analisado para a mesma condição de envelhecimento. Infere-se que o processo e tempo de exposição de coesão entre agregado/ligante seja determinante no desempenho mecânico da mistura, uma vez que, além das características minerais dos agregados (baixa adesividade), o tempo de exposição para absorção pela estrutura granular foi mínimo (R55/75).

Para ambas as misturas, o processo de envelhecimento térmico promoveu aumento de rigidez. Esse comportamento está associado à formação de frações asfálticas, conforme verificado pelo aumento de viscosidade dos ligantes. Petersen e Glaser (2011) apontam que o surgimento do grupamento funcional de cetona no processo oxidativo modifica a polaridade do ligante e favorece o enrijecimento do referido.

Acerca da influência da umidade, a família U50/70 apresentou ganho significativo (16%) de rigidez sob efeito da água. Essa resposta condiz com o processo de oxidação verificado no ensaio de FTIR pela formação de grupos funcionais. Nesse aspecto, Noguera, Quintana e Gómez (2014) apontam que esse comportamento é resultante da interação das moléculas do ligante asfáltico em reação com o oxigênio presente na água.

Esse processo oxidativo é consequência do condicionamento da água nos vazios da mistura. O módulo de resiliência é verificado no comportamento elástico do material (10% RT), ou seja, a água que não foi removida, uma vez que não encontra caminho preferencial pela inexistência de trincas, exercendo a função de oxidação do ligante, tornando-o, portanto, mais rígido. Para a família U55/75, comportamento similar é observado, contudo em menor proporção, devido a ação da matriz polimérica.

A presença de valores elevados de MR provenientes do envelhecimento pode não ser um indicativo positivo da mistura, principalmente para ligantes convencionais, uma vez que sugere camadas de revestimento com alta rigidez. Diante disso, a incompatibilidade com estruturas de suporte pode desenvolver o trincamento prematuro por fadiga (CAVALCANTE, 2016). A aplicação de misturas concebidas com SBS mitigam esse processo, em razão não só da sua maior capacidade de deformação, assim como da menor suscetibilidade ao envelhecimento ao longo da vida útil.

A Tabela 23 apresenta a análise estatística com o método Teste t de Student.

Tabela 23 - Teste t de Student - MR

	Sem envelhecimento	Curto prazo	Longo prazo	Umidade
Variância agrupada	NA	3.208.724.667	6953	64334.03
Observações	3	3	3	3
Grau de liberdade	2	3	4	4
p-valor	0.158637959	0.043522587	4.61254x10 ⁻⁵	0.000675808

Fonte: Autoria própria (2023)

Na análise por teste t de Student, observou-se que para todos os protocolos de envelhecimento, exceto no sem envelhecimento (R50/70 e R55/75), as misturas apresentaram diferença estatística significativa entre as médias observadas com p-valores abaixo do nível de significância de 5%.

Diante disso, atesta-se que para os dois ligantes analisados, a ausência de envelhecimento (formação de grupo funcional de cetona) acarreta comportamento semelhante acerca da rigidez. Entretanto, as misturas compostas por CAP 50/70 são mais suscetíveis ao processo de envelhecimento, conforme corroborado pela significância nos demais níveis.

A Tabela 24 apresenta a análise estatística com o método ANOVA.

Tabela 24 - Teste ANOVA - MR

ANOVA - CAP 50/70 MR						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor	F _{tab}
Entre grupos	22463380	3	7487793	198.4289	7.57x10 ⁻⁸	4.066181
Dentro dos grupos	301883.2	8	37735.41	NA	NA	NA
Total	22765263	11	NA	NA	NA	NA
ANOVA - AMP 55/75 MR						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor	F _{tab}
Entre grupos	4809656	3	1603219	578.261	9.13x10 ⁻⁶	4.066181
Dentro dos grupos	221798.6	8	27724.83	NA	NA	NA
Total	5031455	11	NA	NA	NA	NA

Fonte: Autoria própria (2023)

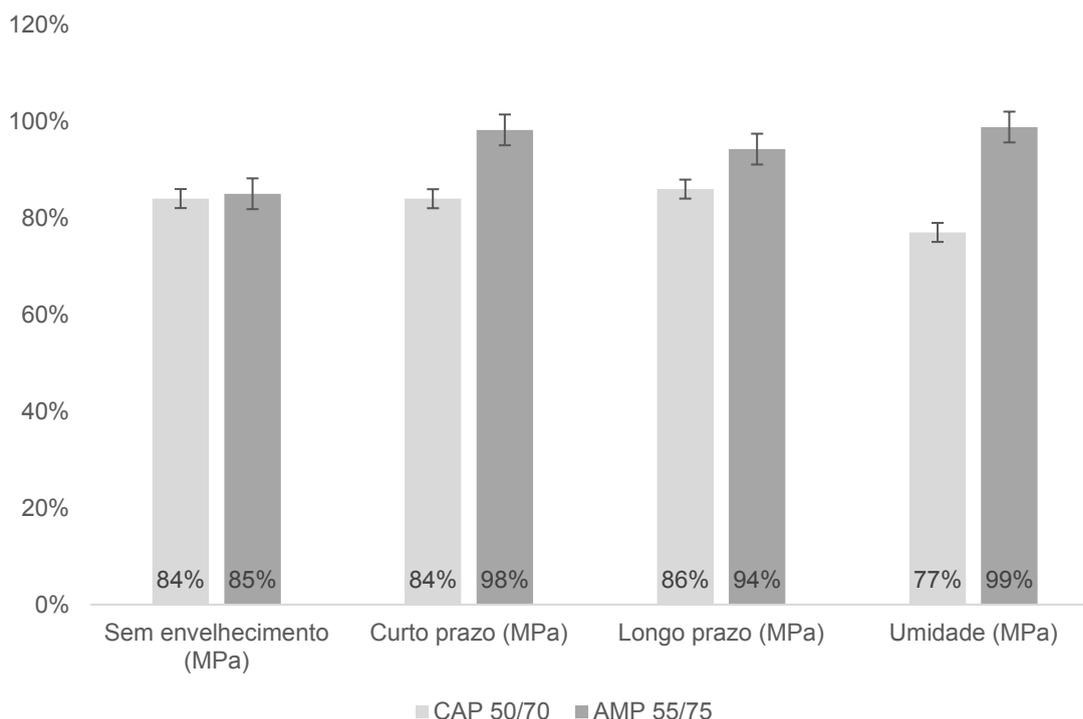
Acerca da análise ANOVA, para os dois tipos de misturas analisadas, os protocolos de envelhecimento apresentaram nível de significância inferior a 5%. Isso constata que os processos de envelhecimento promoveram um aumento de rigidez independente do tipo de ligante utilizado na mistura asfáltica.

4.3.3 Resistência ao dano por umidade induzida – DUI

A Figura 31 apresenta os valores médios da resistência retida à tração (RTT). De acordo com a metodologia SUPERPAVE, um valor mínimo de 80% de RRT é

considerado aceitável para garantir a não suscetibilidade da mistura asfáltica à presença de água. No entanto, a norma AASHTO T 283 (2014) e a norma DNIT 031/2006 adotam um valor mínimo de 70% de RRT para misturas asfálticas.

Figura 31 - Resultados do ensaio de Dano por Umidade Induzida



Fonte: Autoria própria (2023)

As misturas asfálticas, confeccionadas com ambos os ligantes (CAP 50/70 e AMP 55/75), atenderam tanto a metodologia SUPERPAVE (80%), bem como para as normas AASHTO T283 (2014) e DNIT 031/2006 (70%) para as condições de envelhecimento térmico. Diante disso, foi possível verificar que o processo de oxidação térmica não interferiu negativamente neste parâmetro. Este comportamento também foi verificado por Arruda (2021) e Costa (2022) na condição de envelhecimento a longo prazo, de maneira que tanto para família de referência (CAP 50/70), bem como para misturas asfálticas recicladas (RAP), o envelhecimento térmico não alterou significativamente a susceptibilidade das misturas asfálticas à presença de água.

Nas amostras com ligante AMP 55/75 houve uma variação significativa entre as condições sem envelhecimento para curto prazo. Nesse aspecto, a capacidade coesiva entre ligante/agregado foi mitigada na primeira condição, apresentando RRT de 85% - similar à mistura com CAP 50/70. O citado parâmetro é posteriormente elevado quando impostas as condições de envelhecimento a curto (98%) e longo

(94%) prazos. Nesse sentido, Zhang *et al.* (2021) explana que à medida que o envelhecimento térmico ocorre na mistura asfáltica (curto prazo), o ligante torna-se mais fundido e reticulado, o que é capaz de promover um desempenho positivo frente ao dano por umidade.

Acerca do acréscimo de umidade a longo prazo, a família U55/75, devido a ação da matriz polimérica e menor suscetibilidade ao envelhecimento, não apresentou suscetibilidade significativa ao dano por umidade. De forma semelhante, Anitelli (2013) verificou que tanto o envelhecimento térmico, como a ação da água, foram irrelevantes no RRT em misturas modificadas com polímero SBS.

Todavia, o desempenho mecânico ao dano por umidade altera após o envelhecimento com ação da água para família com CAP 50/70 (U50/70). Essa mistura apresentou uma redução no RRT para 77%, o que não atende a resistência mínima convencionada na metodologia SUPERPAVE (80%), demonstrando-se o impacto da umidade nessa propriedade mecânica para o citado ligante asfáltico. O estudo de Zhang *et al.* (2021) corrobora esse comportamento, os quais identificaram também uma diminuição nesse índice para amostras submetidas a envelhecimento térmico (10 dias) e posterior efeito de umidade por simulação de chuva.

Esse fenômeno é verificado devido ao aumento de polaridade do ligante asfáltico em razão do envelhecimento térmico, com consequente enrijecimento desse material. Tal comportamento é reafirmado por Das *et al.* (2015) os quais apontam que, após o mecanismo de oxidação térmica, ocorre a formação de compostos polares (solúveis em água) e a adição de umidade promove uma capacidade de remoção do filme asfáltico.

Essa mitigação no desempenho mecânico é acentuada em razão do alto teor de óxido sílico presente em agregado granítico. Diante disso, Frossard (2021) verificou que a presença de SiO₂ nesse tipo de agregado promove a formação do silanol, o que leva a maior afinidade com a água em relação ao ligante asfáltico. Esse fenômeno corrobora para uma possível falha adesiva (descolamento) na mistura após a condição de envelhecimento por umidade.

Posto isto, o dano promovido pela umidade foi analisado para 1 ciclo de congelamento e descongelamento. O aumento do número de ciclos tende a provocar maior redução de RRT, uma vez que ocorrerá a indução de forma mais agressiva para formação de trincas e, conseqüentemente, da propensão à falha adesiva. Nesse sentido, o impacto da umidade em razão do desenvolvimento das trincas torna-se mais

significativo (BADELI *et al.*, 2018; CONG *et al.*, 2020; COSTA, 2022).

A Tabela 25 apresenta a análise estatística com o método Teste t de Student.

Tabela 25 - Teste t de Student - DUI

	Sem envelhecimento	Curto prazo	Longo prazo	Umidade
Variância agrupada	4	2.5	2.5	4
Observações	3	3	3	3
Grau de liberdade	4	4	4	4
p-valor	0.573392254	0.001040913	0.003448385	0.000175635

Fonte: Autoria própria (2023)

Na análise por teste t de Student, observou-se que para todos os protocolos de envelhecimento, exceto sem envelhecimento (R50/70 e R55/75), as misturas apresentaram diferença estatística significativa entre as médias observadas com p-valores abaixo do nível de significância de 5%.

Diante disso, verificou-se que o processo de envelhecimento térmico promove a geração de grupos funcionais polares (aumento do RRT para AMP 55/75 após envelhecimento a curto prazo), e que o acréscimo de polímero SBS é capaz de mitigar o dano por umidade. Todavia, para CAP 50/70, o desempenho mecânico do material é praticamente inalterado nesse processo (constância no RRT ao longo do envelhecimento térmico)

A Tabela 26 apresenta a análise estatística com o método ANOVA.

Tabela 26 - Teste ANOVA - DUI

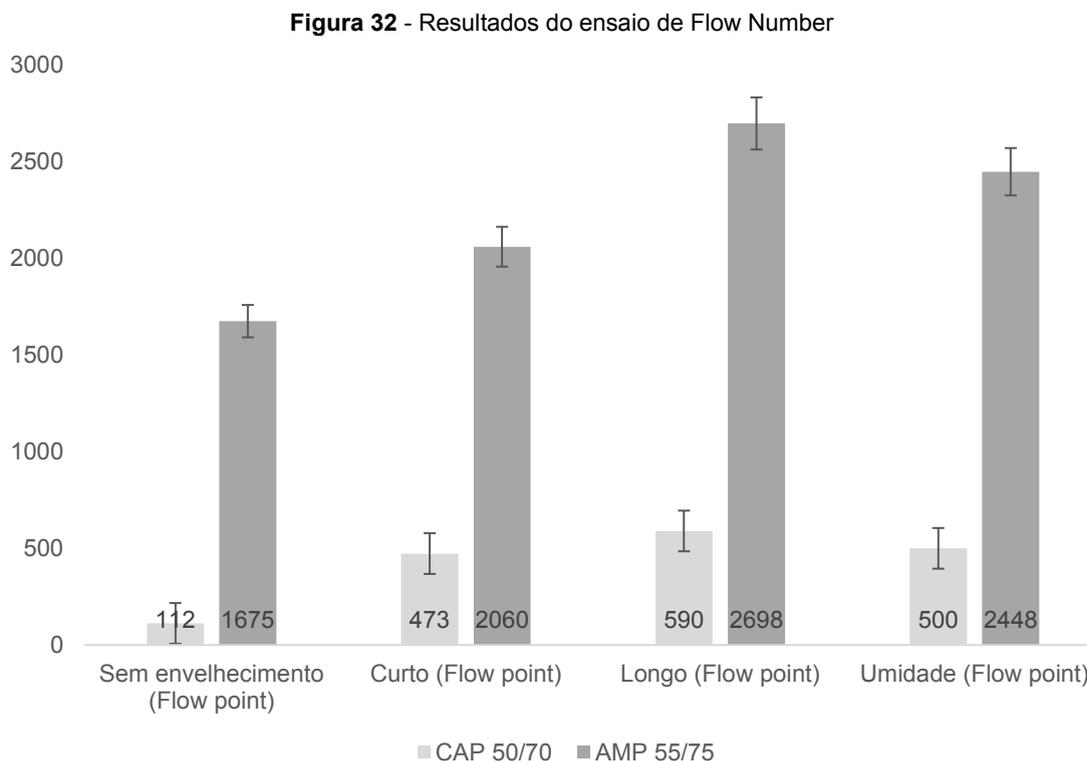
ANOVA - CAP 50/70 DUI						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor	F _{tab}
Entre grupos	183	3	61	18.76923	0.000559266	4.066181
Dentro dos grupos	26	8	3.25	NA	NA	NA
Total	209	11	NA	NA	NA	NA
ANOVA - AMP 55/75 DUI						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor	F _{tab}
Entre grupos	366	3	122	37.53846	4.63451x10 ⁻⁵	4.066181
Dentro dos grupos	26	8	3.25	NA	NA	NA
Total	392	11	NA	NA	NA	NA

Fonte: Autoria própria (2023)

Para os dois tipos de misturas analisadas, os protocolos de envelhecimento apresentaram nível de significância inferior a 5%. Isso demonstra que os processos de envelhecimento promoveram alteração na resposta ao dano por umidade, independente do tipo de ligante utilizado na mistura asfáltica .

4.3.4 Resistência à deformação permanente – FN

A Figura 32 apresenta os valores médios do Flow Number (FN) das misturas asfálticas analisadas nesse estudo.



Fonte: Autoria própria (2023)

As misturas asfálticas compostas por AMP 55/75 apresentaram, para todas as situações de envelhecimento submetidas, valores superiores as amostras constituídas por CAP 50/70. Esse comportamento era esperado, uma vez que o parâmetro FN tem alta correlação com o ligante utilizado (ISLAM; KALEVELA; SHELBY, 2019; FACCIN *et al.*, 2021).

Nessa conjuntura, a respeito das misturas asfálticas com CAP 50/70, a família sem envelhecimento apresentou um FN de 112. O envelhecimento a curto prazo (C50/70) provocou um aumento do FN em 322%, enquanto que o de longo prazo (L50/70) provocou um ganho de FN de 426%, ambos em relação as amostras sem envelhecimento (R50/70). Verifica-se que ocorre uma progressão do parâmetro FN à medida que a mistura sofre processo de oxidação. Queiroz (2022) expõe que há uma estreita correlação entre a rigidez e o parâmetro FN nas misturas asfálticas, ou seja, tendência similar ao verificado no ensaio de MR. O parâmetro FN (CAP 50/70) após o envelhecimento de longo prazo (L50/70) aumentou em 25% em relação ao envelhecimento de curto prazo (C50/70).

Em segunda análise, acerca das misturas com AMP 55/75, verificou-se que a

família sem envelhecimento (R55/75) apresentou FN de 1675. O processo de envelhecimento a curto prazo (C55/75) provocou uma elevação do parâmetro FN em 23%, enquanto que o envelhecimento a longo prazo (L55/75) provocou um acréscimo de FN de 61%, ambos em relação a família R55/75. O FN foi acrescido de 31% após o envelhecimento a longo prazo (L55/75), com relação ao valor após o envelhecimento de curto prazo (C55/75).

Diante disso, foi possível verificar a maior suscetibilidade a variação de valores de FN no ligante convencional (CAP 50/70) quando verificado o envelhecimento térmico. Esse comportamento foi significativamente elevado para o envelhecimento a curto prazo (322% para CAP 50/70 vs 23% para AMP 55/75), assim como para o envelhecimento a longo prazo (38% para CAP 50/70 e 31% para AMP 55/75). Resultados similares para CAP 50/70 também foram obtidos no estudo de Arruda (2021) que verificou um aumento elevado da capacidade de resistência à deformação permanente para misturas compostas por CAP 50/70 quando submetidas a envelhecimento térmico de longo prazo.

O aumento expressivo de resistência à deformação pode ser explicado pelo surgimento de grupos funcionais oxigenados identificados em análise FTIR (carbonilas, sulfóxidos e hidroxilas). A oxidação do ligante asfáltico com a formação de frações asfálticas aumentam a viscosidade do ligante e, por consequente, eleva a rigidez da mistura.

Nesse sentido, Coleri *et al* (2013) apontam que quanto menor a incidência de envelhecimento térmico na mistura asfáltica, maior a sua probabilidade de rompimento por deformação permanente. Essa análise pode ser corroborada, principalmente, quando comparada as famílias sem envelhecimento com o curto prazo, para quaisquer tipos de ligantes, uma vez que a ausência de envelhecimento mitiga a polaridade do ligante asfáltico e reduz sua aderência à superfície do agregado.

Todavia, o processo de envelhecimento, quando incluída a umidade, provocou uma mitigação no parâmetro FN. Observou-se que o comportamento crescente da capacidade de resistência à deformação ao longo do envelhecimento térmico foi interrompido, uma vez que a ação deletéria da água reduziu a rigidez da mistura. Essa tendência foi observada de maneira semelhante no estudo de Islam, Hossaine Rarefder (2015), os quais verificaram o descolamento da película do ligante quando acrescido o efeito da umidade.

A efeito da umidade promoveu o acúmulo de água nos vazios da mistura (7%),

atuando, inicialmente, como elemento oxidativo, conforme verificado por FTIR. Todavia, à medida que o carregamento foi aplicado, na primeira etapa do ensaio, ocorreu o processo de densificação da mistura e a percolação da água pelas trincas surgentes. Esse processo, provavelmente, promoveu o fenômeno do *stripping*, o qual associado a elevada rigidez do ligante, deslocou a película na interface com o agregado, de maneira a reduzir a rigidez da mistura.

Nesse sentido, após inserção da umidade, houve uma redução em FN de 15% para as misturas com ligante convencional (U50/70), bem como abrandamento em FN de 9% para misturas com ligante modificado (U55/75). Essa relação reforça a capacidade de misturas asfálticas modificadas por polímero SBS de serem menos suscetíveis aos efeitos provocados pela água. O efeito da umidade na deformação permanente também foi verificado por Xi, Luo e Liu (2021) os quais apontaram uma redução do parâmetro FN quando as misturas são expostas ao vapor de água, em razão de efeito semelhante (*stripping*).

Diante disso, destaca-se a importância de valores mínimos de FN para garantir o desempenho satisfatório de misturas asfálticas em relação à resistência à deformação permanente. A Tabela 27 apresenta os limites e critérios estabelecidos por Nascimento (2008), Bastos (2016) e Faccin (2018) como referência para a avaliação dessa propriedade.

Tabela 27 - Critérios de Flow Number para diferentes níveis de tráfego

Pesquisas	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Nível de tráfego			
			Leve	Médio	Pesado	Extremamente pesado
			3×10^6	$[3 \times 10^6; 3 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7; 3 \times 10^7]$	$> 10^7$
Nascimento (2008)	60	204	-	300	750	-
Bastos (2016)	60	204	-	100	300	>1000
Faccin et al. (2021)	60	204	-	300	600	>2000

Fonte: Adaptado de Queiroz (2022)

Nas misturas asfálticas compostas por CAP 50/70, verifica-se que a família R50/70 se enquadrava no critério “tráfego leve” nas três classificações propostas. Os procedimentos de envelhecimento a curto (C50/70), longo prazo (L50/70) e inclusão da umidade (U50/70) promoveram mudança desse patamar, uma vez que na divisão de Nascimento (2008) e Faccin *et al.* (2021) ocorre o enquadramento para “tráfego médio” nas três condições. Todavia, segundo classificação de Bastos (2016), após o

envelhecimento a curto prazo, as famílias C50/70; L50/70 e U50/70 são consideradas aptas para o “tráfego pesado”.

Os resultados obtidos corroboram com os dados reológicos apresentados na análise MSCR. A ausência do envelhecimento reduz a capacidade de suporte da mistura (R50/70), coerente com a os elevados valores de Jnr 3.2 kPa do ligante (6,86 para R50/70). O processo de oxidação térmica enrijeceu o ligante asfáltico, tornando-o menos suscetível à deformação permanente, conforme verificado pela tendência de diminuição do Jnr 3.2 kPa (3,98 para C50/70 e 1,66 para L50/70).

As misturas asfálticas confeccionadas com AMP 55/75 foram classificadas como “extramemente pesado” no modelo de Bastos (2016) para as quatro condições de envelhecimento. No entanto, para classificação de Faccin *et al.* (2021) a família R55/75 se enquadra em “tráfego pesado”.

De maneira semelhante, a análise reológica do AMP 55/75 demonstrou coerência com o comportamento mecânico. O envelhecimento térmico promoveu uma redução do Jnr 3.2 kPa para 0,2 (L50/70) o que corrobora para elevada resistência à deformação permanente a longo prazo, devido ao processo oxidativo e aumento da viscosidade.

A Tabela 28 apresenta a análise estatística com o método Teste t de Student.

Tabela 28 - Teste t de Student - FN

Teste t de Student - FN				
	Sem envelhecimento	Curto prazo	Longo prazo	Umidade
Variância agrupada	NA	10296.5	8.339.645	3948.5
Observações	3	3	3	3
Grau de liberdade	2	4	4	4
p-valor	0.002224674	4.37714x10 ⁻⁵	9.32348x10 ⁻⁶	2.8739x10 ⁻⁶

Fonte: Autoria própria (2023)

Na análise por teste t de Student, observou-se que para todos os protocolos de envelhecimento as misturas apresentaram diferença estatística significativa entre as médias observadas com p-valores abaixo do nível de significância de 5%. Esse comportamento era esperado, uma vez que o ligante AMP 55/75 possui desempenho superior ao ligante convencional frente a deformações permanentes, conforme verificado em análise reológica. Esse comportamento é similar para quaisquer protocolos de envelhecimento analisado.

A Tabela 29 apresenta a análise estatística com o método ANOVA.

Tabela 29 - Teste ANOVA- FN

ANOVA - CAP 50/70 FN						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor	F _{tab}
Entre grupos	398900.3	3	132966.8	75.44213	3.3x10 ⁻⁶	4.066181
Dentro dos grupos	14100	8	1762.5	NA	NA	NA
Total	413000.3	11	NA	NA	NA	NA
ANOVA - AMP 55/75 FN						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor	F _{tab}
Entre grupos	1807846	3	602615.2	44.24626	2.51x10 ⁻⁵	4.066181
Dentro dos grupos	108956.6	8	13619.57	NA	NA	NA
Total	1916802	11	NA	NA	NA	NA

Fonte: Autoria própria (2023)

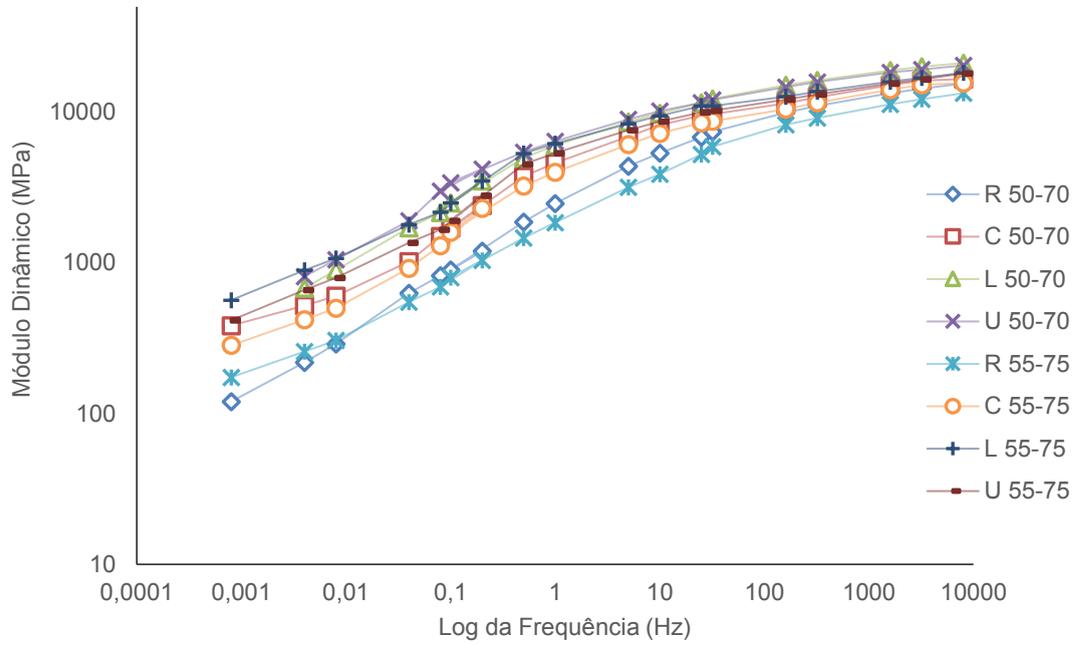
Para os dois tipos de misturas analisadas, os protocolos de envelhecimento apresentaram nível de significância inferior a 5%. Isso comprova que os processos de envelhecimento promoveram alteração no desempenho mecânico em relação a deformação permanente.

Nesse contexto, observou-se especificamente que o impacto do envelhecimento térmico promoveu o enrijecimento tanto da mistura com CAP 50/70, bem como AMP 55/75 e que o envelhecimento a longo prazo permitiu maior resistência à deformação permanente. O acréscimo de umidade, todavia, modifica a interface ligante/agregado e reduz o desempenho à deformação da mistura.

4.3.5 Módulo dinâmico – MD

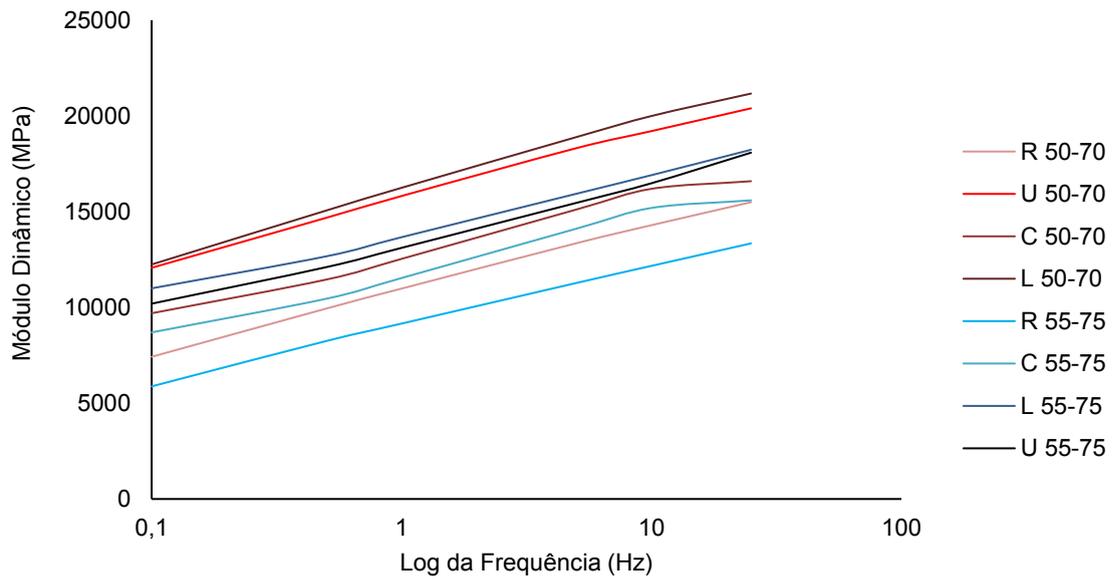
A Figura 33 apresenta as curvas mestras determinadas no ensaio de módulo dinâmico em temperatura de referência de 20°C utilizando três temperaturas (4, 20 e 40°C) e seis frequências (0.1; 0.5; 1; 5; 10 e 25Hz) reduzidas. Posteriormente, a Figura 34, a Figura 35 e a Figura 36 apresentam, isoladamente, o módulo dinâmico pela frequência convencional de carregamento para cada temperatura.

Figura 33 - Curvas mestras das misturas asfálticas analisadas



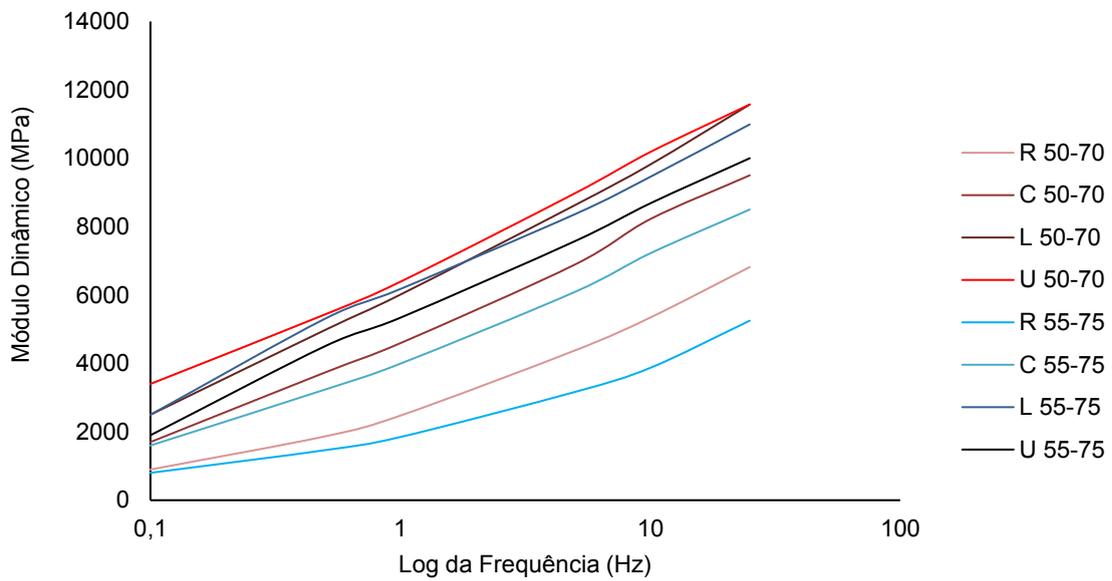
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 34 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas a 4°C



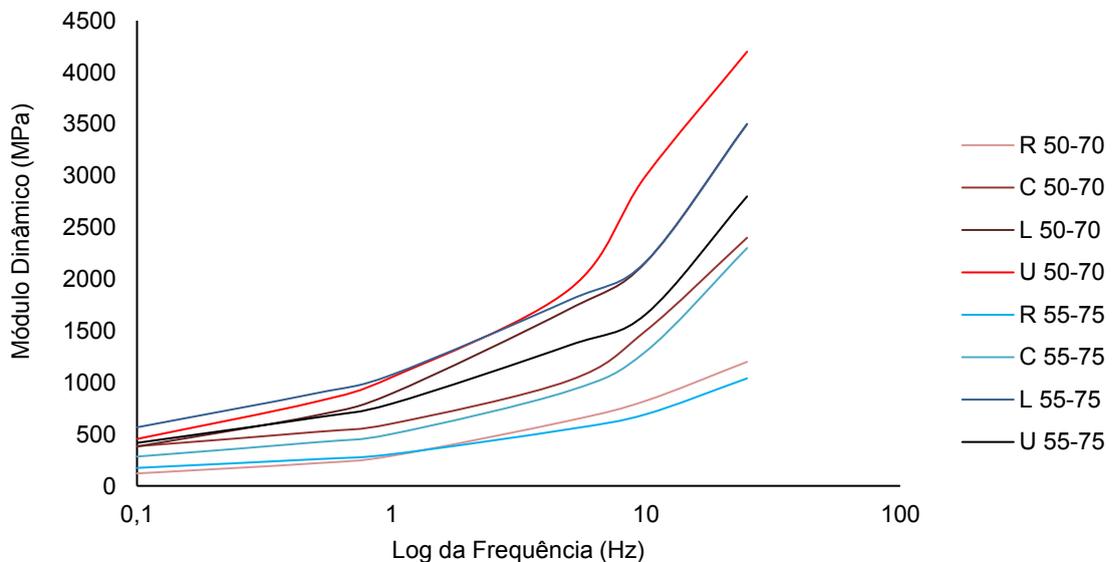
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 35 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas a 20°C



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 36 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas a 40°C



Fonte: Autoria própria (2023)

De modo geral, é possível verificar que ocorreu um aumento de rigidez à proporção que os estágios de envelhecimentos são instituídos. Na avaliação da curva mestra, associa-se, comumente, as relações “frequência x temperatura” em duas regiões: altas temperaturas e baixas frequências reduzidas -deformação permanente (1) e baixas temperaturas e altas frequências reduzidas – trincamento térmico (2) (APEAGYEI; WITCZAK, 2011; COSTA, 2018).

Diante disso, os dois tipos de misturas asfálticas apresentam, a respeito da rigidez associada à deformação permanente (1), tendência de comportamento semelhante ao obtido no parâmetro FN. O envelhecimento térmico, por meio do processo de oxidação, promoveu um aumento gradual da rigidez (maiores valores para L55/75 e L50/70), compatível com o obtido na resistência à deformação, ou seja, em maiores temperaturas e menores frequências, a mistura com o AMP 55/75 apresentou maior rigidez (consequentemente maior FN). Esse comportamento foi semelhante ao obtido por Sahebzamani *et al.* (2022), os quais verificaram que após envelhecimento térmico por 7 dias (95°C), misturas modificadas com SBS apresentaram, na região 1 (parte esquerda do gráfico), maior rigidez em relação ao ligante convencional.

Com relação à influência pela umidade na região 1, existe uma tendência de desempenho positivo entre o parâmetro FN e o MD nas misturas U55/75, visto que o módulo foi reduzido após inserção da água. Todavia, esse comportamento não foi observado para a mistura U50/70, visto que os módulos em menores frequências foram similares ao L50/70. Isso pode ser explicado pelo efeito oxidativo da água, tornando o ligante 50/70, para análise em deformações elásticas, mais rígido.

Acerca da aplicação em altas frequências e baixas temperaturas (região 2), é desejável a obtenção de módulos baixos, uma vez que uma elevada rigidez acentua a formação de trincas pelo impacto térmico (COSTA, 2018). Diante disso, observou-se um comportamento coerente entre os dois tipos de misturas asfálticas analisadas. Com relação a região de altas temperaturas (1), as misturas com AMP 55/75 apresentaram maior rigidez em relação as compostas por CAP 50/70. Esse comportamento é invertido na análise da região 2, de maneira a validar a maior propensão ao trincamento para misturas com ligantes convencionais.

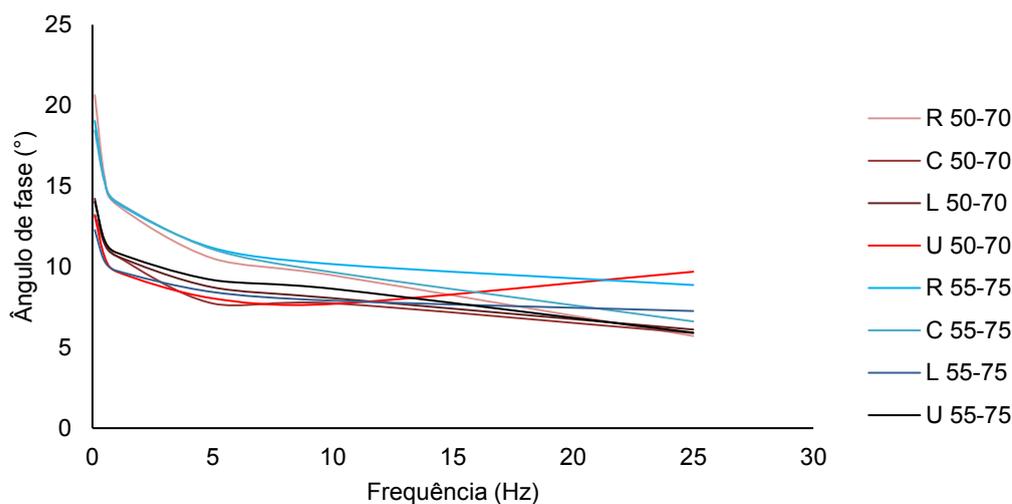
Nesse aspecto, quando analisada cada situação de envelhecimento de forma isolada, é possível observar, na Figura 36, que o processo térmico-oxidativo promoveu ao aumento de rigidez para quaisquer ligantes avaliados. Além disso, a influência da umidade atuou de forma divergente para as misturas com CAP 50/70 e CAP 55/75. O efeito oxidativo promoveu uma maior rigidez para a mistura convencional, ou seja, a matriz polimérica do ligante modificado atuou para a mitigação do trincamento térmico (região 2).

Quando acrescido a influência da umidade, ocorre uma falha adesiva (agregado/ligante). O estudo de Arabani, Rhimabadi e Hamed (2023) corrobora o

encontrado nessa pesquisa, dado que após crescente aumento de rigidez no envelhecimento térmico (condições secas), ocorreu uma redução quando as amostras foram submetidas ao efeito da umidade por saturação, sendo mais significativo em amostras com agregado granítico.

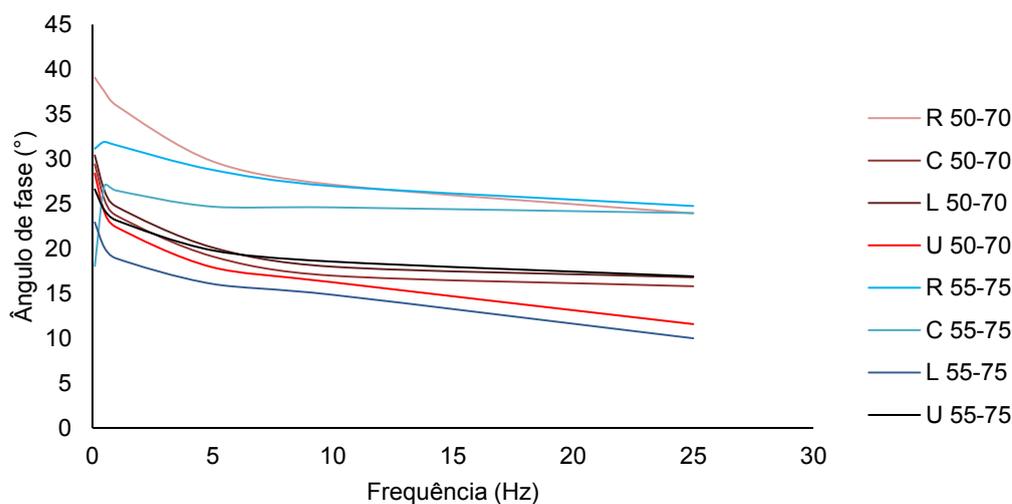
A Figura 37, a Figura 38 e a Figura 39 ilustram os ângulos de fase correspondentes às diferentes frequências de carregamento nas três temperaturas investigadas neste estudo para as oito misturas asfálticas analisadas. O ângulo de fase é uma medida do intervalo de tempo entre a aplicação da tensão e a resposta do material a esse carregamento. Essa característica é utilizada com a finalidade de verificar a viscoelasticidade das misturas asfálticas (MELO NETO, 2022).

Figura 37 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (4°C)



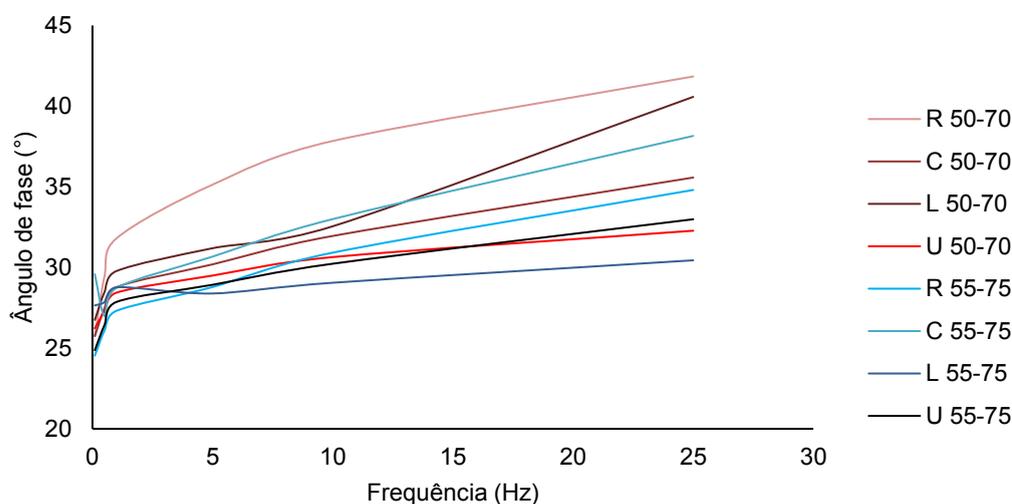
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 38 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (20°C)



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 39 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (40°C)



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao analisar as misturas asfálticas, verificou-se, inicialmente, que o ângulo de fase tende a aumentar à medida que a temperatura eleva e diminui à proporção que a frequência aumenta. Todavia, esse comportamento é distinto na temperatura de 40°C. Para essa temperatura (mais elevada), constatou-se uma redução do ângulo de fase em frequências mais baixas.

Diante disso, a respeito das misturas com AMP 55/75, observou-se que para as temperaturas de 4°C e 20°C ocorreu uma similaridade no comportamento do ângulo de fase. Maiores valores foram resultantes na família sem envelhecimento (R55/75), com regressão à razão que ocorre o envelhecimento de curto prazo (C55/75); umidade (U55/75) e longo prazo (L55/75). Desempenho parecido foi observado para as misturas com CAP 50/70 (ângulo de fase do R50/70 > C50/70 > L50/70 > U50/70), entretanto a família U50/70 apresentou maior ângulo de fase em altas frequências quando correlacionada a família L50/70.

Na temperatura mais baixa (4°C) é observado um aumento no ângulo de fase – com relação a 20°C, indicando uma maior dissipação de energia devido ao comportamento viscoelástico predominante da mistura asfáltica. Isso sugere que nessas condições a contribuição mais significativa para o ângulo de fase em altas frequências está relacionada ao ligante utilizado, seguindo uma tendência característica desse componente. Por outro lado, em temperaturas mais elevadas e baixas frequências, o ângulo de fase é afetado principalmente pelo comportamento do agregado presente na mistura. Nesse caso, a interação entre o ligante e o agregado desempenha um papel significativo, resultando em uma diminuição do

ângulo de fase. (ALI *et al.* 2016; MELO NETO, 2022).

O ângulo de fase altera na temperatura de 40°C. As misturas compostas por CAP 50/70 apresentam maiores valores em relação às misturas com AMP 55/75. Pires *et al.* (2022) também verificaram comportamento semelhante quando analisaram dois tipos de misturas asfálticas (convencional e modificada com SBS). Os autores expõem que essa resposta é função da menor rigidez das misturas com ligante convencional, o que implica comportamento menos viscoso em relação as misturas modificadas com SBS para temperaturas elevadas.

A Tabela 30 apresenta a análise estatística com o método Teste t de Student. Foi utilizada a frequência de 1Hz como referência, com a finalidade de analisar uma aplicação de carga a 0,1 segundo e repouso por 0,9 segundo.

Tabela 30 - Teste t de Student - MD

Teste t de Student - MD - 1Hz 4°C				
	Sem envelhecimento	Curto prazo	Longo prazo	Umidade
Variância agrupada	207350	93221,5	442600	NA
Observações	3	3	3	3
Grau de liberdade	4	4	4	2
p-valor	0,003058585	1,5374E-06	0,008973356	0,035924493
Teste t de Student - MD - 1Hz 20°C				
	Sem envelhecimento	Curto prazo	Longo prazo	Umidade
Variância agrupada	NA	65128,2	43502,7	11560,7
Observações	3	3	3	3
Grau de liberdade	2	4	4	4
p-valor	0,017341222	0,010245597	0,388336135	0,000277266
Teste t de Student - MD - 1Hz 40°C				
	Sem envelhecimento	Curto prazo	Longo prazo	Umidade
Variância agrupada	1717	NA	15635,2	NA
Observações	3	3	3	3
Grau de liberdade	4	2	4	2
p-valor	0,29737571	4,30265273	0,150362961	0,084046446

Fonte: Autoria própria (2023)

Na análise por teste t de Student, observou-se que para a temperatura de 4°C, o processo de envelhecimento das misturas apresentou diferença estatística significativa entre as médias observadas com p-valores abaixo do nível de significância de 5%. Esse comportamento pode ser um indicador da suscetibilidade ao trincamento térmico e corrobora para o melhor desempenho nesse aspecto para misturas com AMP 55/75.

Para uma análise a 20°C, apenas a família a longo prazo (L50/70 e L55/75) não apresentou significância. Esse comportamento pode ser explicado para o efeito oxidativo elevado para o CAP 50/70. Ademais, para uma análise a 40°C, não houve

diferença significativa entre os ligantes (na frequência de 1Hz), logo, a tendência de similaridade ao parâmetro FN não pode ser obtida de forma direta, necessitando avaliar as características de cada ligante. Essa análise, verificada no ensaio FN, mostrou desempenho muito superior para o AMP 55/75 devido a sua característica elástica.

A Tabela 31 apresenta a análise estatística com o método ANOVA.

Tabela 31 - Teste ANOVA - MD

ANOVA - CAP 50/70 - MD - 1Hz 4°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	valor-P	F _{tab}
Entre grupos	1,86E+08	3	62046500	156.1901	1,94E-07	4.066181
Dentro dos grupos	3178000	8	397250			
Total	1,89E+08	11				
ANOVA - CAP 50/70 - MD - 1Hz 20°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	valor-P	F _{tab}
Entre grupos	25089059	3	8363020	163.0769	1,64E-07	4.066181
Dentro dos grupos	410261,3	8	51282,67			
Total	25499320	11				
ANOVA - CAP 50/70 - MD - 1Hz 40°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	valor-P	F _{tab}
Entre grupos	888760,6	3	296253,5	26.53749	0,000165	4.066181
Dentro dos grupos	89308,67	8	11163,58			
Total	978069,2	11				
ANOVA - AMP 55/75 - MD - 1Hz 4°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	valor-P	F _{tab}
Entre grupos	36071672	3	12023891	6,57E+01	5,59E-06	4,07E+00
Dentro dos grupos	1463153	8	182894,1			
Total	37534825	11				
ANOVA - AMP 55/75 - MD - 1Hz 20°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	valor-P	F _{tab}
Entre grupos	32093383	3	10697794	5,96E+02	9,68E-10	4,07E+00
Dentro dos grupos	143619,3	8	17952,42			
Total	32237002	11				
ANOVA - AMP 55/75 - MD - 1Hz 40°C						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	valor-P	F _{tab}
Entre grupos	1016973	3	338991,1	1,32E+02	3,73E-07	4,07E+00
Dentro dos grupos	20517,33	8	2564,667			
Total	1037491	11				

Fonte: Autoria própria (2023)

Para os dois tipos de misturas analisadas, os protocolos de envelhecimento apresentaram nível de significância inferior a 5%. Isso demonstra que os processos de envelhecimento promoveram alteração na rigidez, para a frequência analisada,

independente do tipo de ligante utilizado na mistura asfáltica .

4.3.6 Correlação da rigidez e deformação permanente entre os ligantes e as misturas asfálticas

Com a finalidade de compreender o efeito do envelhecimento térmico, este tópico tem por objetivo principal correlacionar os parâmetros reológicos (módulo de cisalhamento dinâmico; viscosidade e compilância não-recuperável) obtidos pelos ensaios de PG e MSCR com o desempenho mecânico das misturas asfálticas (rigidez e deformação plástica) advindos dos ensaios de MR e FN.

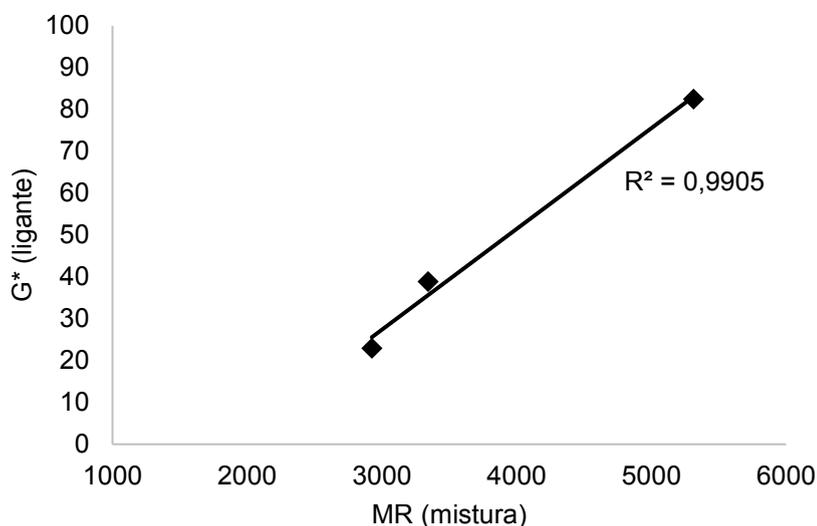
- **Rigidez:**

A verificação da rigidez para os níveis de envelhecimento térmico ocorreu por meio da aplicação dos ensaios de RT, MR e MD (análise mecânica) e pelo módulo de cisalhamento complexo (análise reológica). Para quaisquer ensaios avaliados, o envelhecimento térmico promoveu um aumento de rigidez. Esse comportamento ocorre em função da oxidação do ligante asfáltico com a formação de grupos oxigenados (carbonila, sulfóxidos e hidroxila).

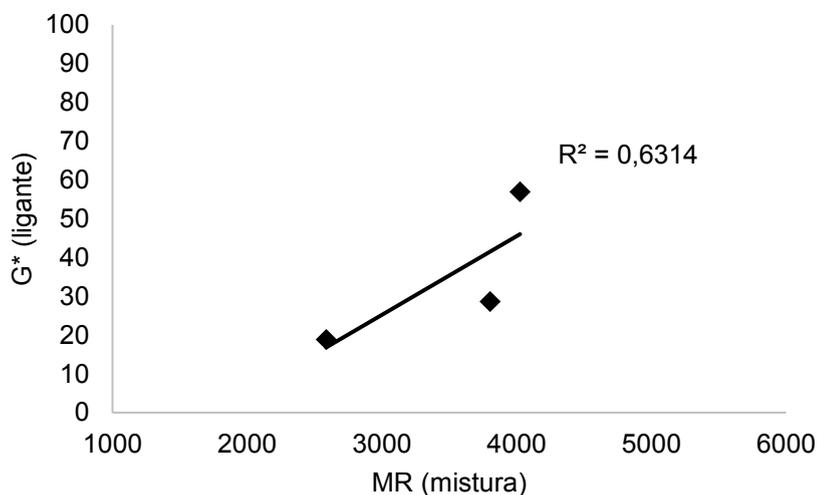
Diante disso, foi possível observar, reologicamente, o aumento gradual da viscosidade, assim como no módulo de cisalhamento dinâmico (G^*). Nesse sentido, o CAP 50/70 apresentou-se mais suscetível ao efeito do envelhecimento térmico, com índices G^* mais elevados para menores temperaturas (conforme analisado pelo AI). Todavia, essa rigidez torna-se mais proeminente no AMP 55/75 em altas temperaturas, devido ao seu caráter elástico.

Com a finalidade de verificar uma relação de rigidez entre o comportamento reológico e mecânico, adotou-se o ensaio de MR como referência (mistura) – 25°C e o módulo de cisalhamento dinâmico (ligante) – 46°C. Essa análise ocorre em razão da ausência de curva mestra para uma correlação frequência/temperatura com o ensaio de MD. A Figura 40 apresenta a citada correlação.

Figura 40 - Correlação G^* do ligante e MR das misturas para os níveis de envelhecimento térmico: a) CAP 50/70, b) AMP 55/75



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o CAP 50/70, observou-se uma forte correlação (R^2 de 0,99) entre o efeito do envelhecimento na resposta reológica e o comportamento da mistura asfáltica. Entretanto, para o AMP 55/75, o coeficiente de determinação foi mediano (R^2 de 0,63). Esse comportamento pode estar relacionado ao efeito da temperatura, uma vez que a proeminência de sua rigidez foi verificada para maiores temperaturas. Necessita-se, portanto, de uma análise com curva mestra para intervalos similares de temperatura, para uma aferição mais precisa desse dado.

Independente disso, para ambos os ligantes, o envelhecimento térmico

promoveu enrijecimento, o que acarretou aumento na resistência à tração, no módulo de resiliência e no módulo dinâmico.

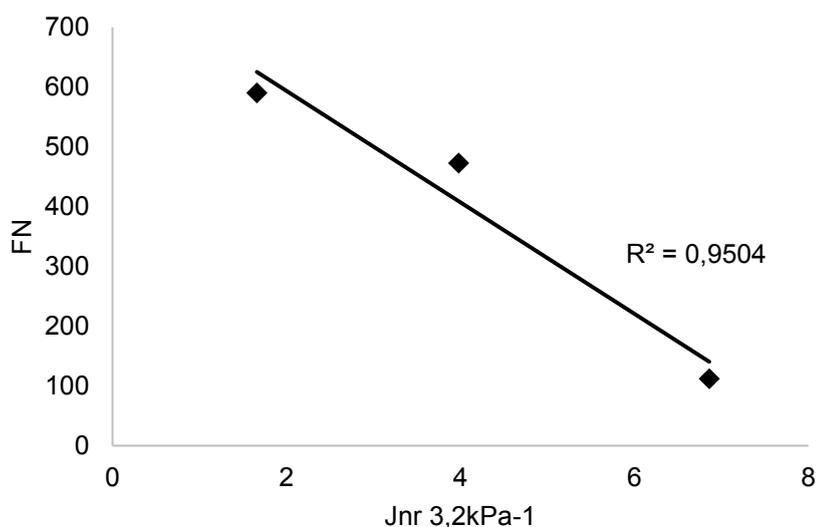
- **Deformação permanente:**

O processo de envelhecimento térmico promoveu um aumento na rigidez da mistura, conforme constatado previamente. Esse comportamento, conseqüentemente, promoveu maior resistência ao fenômeno da deformação permanente. Quimicamente, ocorreu a formação de grupos oxigenados (carbonilas, sulfóxidos e hidroxila), indicativos do processo de oxidação do ligante asfáltico.

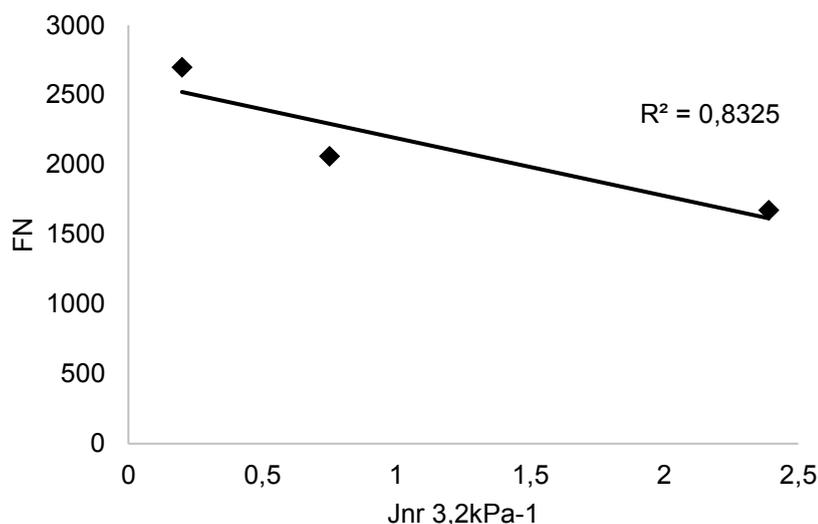
Acerca da resposta reológica, tanto o CAP 50/70, como o AMP 55/75, apresentou uma redução do J_{nr} $3,2kPa^{-1}$ à proporção que o ligante asfáltico sofreu endurecimento. Esse comportamento indica uma maior deformação não-recuperada, ou seja, o ligante apresenta-se mais plástico após aplicação de carregamento.

Para as misturas asfálticas, o *flow point* aumentou, o que indica que o envelhecimento térmico promoveu, principalmente para o processo a longo prazo (9 dias) um aumento na resistência à deformação permanente. As misturas sem envelhecimento (R50/70 e R55/75) possuíram valores inferiores as demais famílias, o que demonstra a mitigação da polaridade do ligante com ausência do processo de oxidação. Diante disso, a relação do comportamento reológico e mecânico é apresentado na Figura 41 (a) e (b).

Figura 41 - Correlação de FN x J_{nr} ($3,2 kPa^{-1}$) obtidos nos protocolos de envelhecimento em laboratório: a) CAP 50/70, b) AMP 55/75



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o CAP 50/70, o $Jnr\ 3,2kPa^{-1}$ variou de $6,86\ kPa^{-1}$ (FN de 112) na ausência de envelhecimento (R50/70) a $1,66kPa^{-1}$ (FN de 590) para envelhecimento a longo prazo (L50/70), o que demonstra um acréscimo de resistência à deformação permanente (mistura asfáltica) de 427%. O R^2 obtido foi de 0,95; corroborando para a forte correlação entre o comportamento reológico e mecânico do ligante após processos de envelhecimento RTFO e RTFO com posterior envelhecimento em estufa (9 dias).

O AMP 55/75 apresentou $Jnr\ 3,2kPa^{-1}$ de 2,39 (FN de 1675) para a família sem envelhecimento (R55/75) e, após o processo de envelhecimento térmico a longo prazo, esse valor foi de 0,20 (FN de 2698), o que representa um acréscimo de 61% na resistência à deformação permanente (mistura asfáltica). O R^2 verificado foi de 0,83; o que representa uma aceitável correlação entre o comportamento reológico do ligante e mecânico da mistura.

Posto isto, observou-se que, para ambos os ligantes, os protocolos de envelhecimento promoveram uma redução do $Jnr\ 3,2kPa^{-1}$ e um acréscimo do FN. Essa resposta, conforme verificado nos coeficientes de determinação, apresentou uma forte correlação entre as propriedades reológicas e mecânicas em relação à deformação permanente. Ademais, o ligante (e conseqüentemente a mistura) com AMP 55/75 apresentou melhor desempenho nesse comportamento, bem como menor suscetibilidade ao envelhecimento, apresentando menor variação ao de FN após o envelhecimento térmico, o que é corroborado pelo AI obtido em ensaio PG.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta seção serão apresentadas as conclusões obtidas por meio dessa pesquisa, assim como sugestões para pesquisas futuras envolvendo o tema em análise.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise química por FTIR indicou aumento na intensidade dos picos correspondentes a funções oxigenadas à medida que o CAP 50/70 e o AMP 55/75 foram submetidos aos quatro estágios de envelhecimento. Nesse sentido, em relação ao envelhecimento térmico, esse fenômeno foi mais significativo a longo prazo frente ao curto prazo para ambos os ligantes, o que corrobora para a oxidação tardia. O efeito da umidade implicou maior oxidação para os dois ligantes, todavia esse comportamento pode estar associado não só a interação água/ligante, assim como maior período de exposição térmica a curto prazo e influência mineralógica do agregado.

O envelhecimento térmico a longo prazo promoveu aumento do grau de desempenho de ambos os ligantes, com maior suscetibilidade ao envelhecimento observado no ligante convencional. Além disso, a oxidação promoveu, para o CAP 50/70 e AMP 55/75, um maior número de ciclos à fadiga para baixas deformações, entretanto uma tendência de melhor comportamento para ligantes menos envelhecidos foi observada em altas deformações. Para ambos os ligantes, houve um aumento da viscosidade e resistência à deformação permanente após o envelhecimento a longo prazo devido à formação de frações asfaltências.

O impacto do envelhecimento térmico nas misturas asfálticas aumentou a resistências à tração; o módulo de resiliência; o *flow number* e o módulo dinâmico em ambos os ligantes. Entretanto, o efeito oxidativo do ligante não representou mudança a longo prazo na resistência ao dano por umidade. O envelhecimento tardio promoveu um aumento da polaridade do ligante, proporcionando maior coesão agregado/ligante em relação a misturas sem envelhecimento. Para quaisquer propriedades mecânicas analisadas, o envelhecimento a longo prazo foi mais significativo no ligante convencional.

A umidade atuou na mistura asfáltica como fator oxidante, aumentando a resistência à tração e o módulo de resiliência, sendo mais expressivo para o ligante convencional. No dano por umidade induzida, foi significativo para a mistura com

CAP 50/70 em razão de uma estimada falha adesiva, sendo, entretanto, insignificativo para o AMP 55/75. Para ambos os ligantes, um provável deslocamento da película provocou uma redução na resistência à deformação permanente. Por fim, uma pequena redução no módulo dinâmico foi verificada para a mistura com AMP 55/75, entretanto para o CAP 50/70 houve um aumento de rigidez associado à oxidação por efeito da água.

De maneira geral, o processo de envelhecimento a longo prazo promoveu enrijecimento do ligante e da mistura asfáltica, alterando seus desempenhos mecânicos e reológicos. A influência da umidade atuou como efeito mitigador de resistência, tornando as misturas asfálticas mais suscetíveis a trincamentos. Ademais, verificou-se que a matriz polimérica atua positivamente no processo oxidativo a nível de mistura asfáltica, atenuando o processo de degradação dos materiais diante das intempéries temperatura e umidade.

Portanto esta pesquisa permitiu apresentar um protocolo de envelhecimento em laboratório que abarca de forma mais fidedigna os aspectos climáticos regionais envolvidos no envelhecimento de materiais aplicados à pavimentação asfáltica. O efeito conjunto da umidade e temperatura demonstraram-se fundamentais para compreensão das propriedades químicas, reológicas e mecânicas de misturas asfálticas. Essa análise é razão dos métodos atuais considerarem apenas uma relação tempo x temperatura para envelhecimento térmico, assim como não incluir o efeito da umidade na degradação tardia da mistura asfáltica.

5.1.1 Sugestões para pesquisas futuras

- Aplicar o modelo S-VECD para prever o dano por fadiga em diversas condições de carregamento e temperaturas para cada intervalo de envelhecimento analisado na presente pesquisa.
- Incrementar a aplicação de radiação ultra-violeta na etapa de envelhecimento a longo prazo em estufa, tanto para ligantes asfálticos, bem como para misturas asfálticas.
- Investigar o desempenho mecânico de misturas asfálticas submetidas à distintos intervalos de tempo de simulação de chuva, assim como diferentes mineralogias de agregados.
- Correlacionar o desempenho reológico/mecânico de misturas asfálticas submetidas ao protocolo apresentado com amostras envelhecidas em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUAWAD, I. M. A.; AL-QADI, I. L.; TREPANIER, J. S. Mitigation of moisture damage in asphalt concrete: Testing techniques and additives/modifiers effectiveness. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 437–443, 2015.

ALI, Y.; IRFAN, M.; AHMED, S.; KHANZADA, S.; MAHMOOD, T. Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures. **Materials and Structures**, v. 49, p. 857-868, 2016.

ASUKAR, S. D.; BEHL, A.; GUNDALIYA, P. J. Utilization of Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder. **International journal of innovative research in technology**, IJIRT, v. 2, n. 12, p. 198-207, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **AASHTO T 240: Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. Washington, 2021.

_____. **ASSHTO R 30-02. Standard Practice For Mixture Conditioning Of Hot Mix Asphalt (HMA)**. Washington, D.C., 2010.

_____. **AASHTO M 320: Standard specification for performance-graded asphalt binder**. Washington, 2017.

_____. **AASHTO T 283: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. Washington, 2014.

_____. **AASHTO T 391: Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. Washington, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D 6816 – Standard Practice for Determining Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders**. Washington. 2016.

AN, S.; JO, Y.; PARK, T. Modeling of Asphalt Aging Based on Short-Term Aging Temperature and Time of Normal Asphalt Mixture for Quantifying Binder Aging. **International Journal of Civil Engineering**. v. 20, p. 15–25. 2022.

ANDERSON, D. A.; CHRISTENSE, D. W.; BAHIA, H. U.; DONGRE, R.; SHARMA, M. G.; ANTLE, C. E.; BUTTON, J. **Binder Characterization and Evaluation Volume 3: Physical Characterization**. SHRP-A-369, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC, USA, 1994, pp. 303–333.

ANITELLI, A. **Estudo Do Dano Por Umidade De Misturas Asfálticas Com Ligantes Asfálticos Convencional E Modificado Com Polímero SBS**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

APEAGYEI, A. K.; WITCZAK, M. W. Rutting como uma função do módulo dinâmico e graduação. **Journal Materials Civil Engineering**. v. 23, n. 9, p. 1302 – 1310. 2011.

ARABANI, M.; RAHIMABADI, M. M; HAMED, G. H.. Assessing the effect of short and long-term aging on moisture damage of hot mix asphalt using two different methods. **International Journal of Pavement Engineering**. v. 24, n. 1. 2023.

ARAFAT, S.; WASIUDDIN, N. M. Understanding the Short-term Aging of Warm Mix Asphalt Using Rolling Thin Film Oven. **International Journal of Pavement Research & Technology**. v. 12, n. 6. 2019.

ARRUDA, S. M. **Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15184 - Materiais betuminosos Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Brasília. 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D6925: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor**. Washington, 2015.

_____. **ASTM D2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

_____. **ASTM D6521: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

AZARI, H.; MOHSENI, A. Effect Of Short-Term Conditioning And Long-Term Ageing On Permanent Deformation Characteristics Of Asphalt Mixtures. **Road Materials and Pavement Design**. v. 14, p. 79–91. 2013.

BADELI, S.; CARTER, A.; DORÉ, G.; Effect Of Laboratory Compaction On The Viscoelastic Characteristics Of Na Asphalt Mix Before And After Rapid Freeze-Thaw Cycles. **Cold Regions Science and Technology**. v. 146, p. 98–109. 2018.

BARGHABANY, P.; ZHANG, J.; MOHAMMAD, L. N.; COOPER, S. B.; COOPER, S. B. Chemical and Rheological Characterization of Asphalt Binders: A Comparison of Asphalt Binder Aging and Asphalt Mixture Aging. **Transportation Research Record**. v. 2676, n.5, p. 147. 2022.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022.
- BRONDANI, C. **Estudo do efeito deletério da água em misturas asfálticas a quente produzidas no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2019.
- BROWN, S. F.; SCHOLZ, T. V. **Development Of Laboratory Protocols For The Ageing Of Asphalt Mixtures**. In Proceedings of 2nd Euroasphalt and Eurobitume Conference, p. 83–90. Barcelona, Spain, Book 1. 2000.
- CALA, A.; CARO, S.; LLERAS, M.; ROJAS-AGRAMONTE, Y. Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. **Construction and Building Materials**, v. 216, 2019.
- CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2016.
- CHEN, Z.; ZHANG, H.; DUAN, H. Investigation of ultraviolet radiation aging gradient in asphalt Binder. **Construction and Building Materials**. v. 246, 2020.
- CHEN, M.; JIUGUANG, G.; HUAXIN, C.; MINGJIN, L. Effect of Water Aging on the Fatigue Performance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. **Construction & Building Materials**. v. 304, e-124679. 2021.
- CHERKAOUI, M.; SOL-SANCHEZ, F.; MORENO, N.; GÁMES, M. C. R. Study into the effect of designing parameters of asphalt mixture on its resistance to ageing phenomenon. **International Journal of Pavement Engineering**. 2022.
- CHOWDHURY, P. S., MULLAPUDI, R.S.; REDDY M. A. MARAREDDY. An Investigation on the Effect of Aging on Chemical and Mechanical Properties of Asphalt Binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 34. 2022.
- CONG, P.; LIU, N.; TIAN, T.; ZHANG, Y. Effects of long-term aging on the properties of asphalt binder containing diatoms. **Construction Building and Materials**. v. 123, p. 534–540. 2016.
- CONG, L.; REN, M.; SHI, J.; YANG, F.; GUO, G. Experimental Investigation On Performance Deterioration Of Asphalt Mixture Under Freezethaw Cycles. **International Journal of Transportation Science and Technology**. 2020.
- COSTA, D. B. **Análise da deformação permanente de misturas asfálticas a partir dos critérios de Mohr Coulomb**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e

Ambiental) Universidade Federal de Campina Grande, PB. 2018.

COSTA, D. B. **Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade á presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal de Campina Grande, PB. 2022.

COUTINHO, R. P. **Utilização da Parte Fina de Misturas Asfálticas para Avaliação do Dano por Fadiga.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE. 2012.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástiques e matriz de agregados finos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Coppe/UFRJ. 2016.

CURTIS, C. W.; ENSLEY, E. K.; EPPS, J. **Epps, Fundamental Properties of Asphalt-aggregate Interactions Including Adhesion and Adsorption.** Rep. No. SHRP-A-341, National Research Council, Washington DC, USA, 1993.

CZAJKOWSKI, P.; PRZYJAZNY, A.; BOCZKAJ, G. Bitumen Aging—Laboratory Simulation Methods Used in Practice and Selected Directions of Research on New Methods. **Materials.** v. 16, 853. 2023.

DAS, P. K.; BAAJ, H.; KRINGOS, N.; TIGHE, S. Coupling of oxidative ageing and moisture damage in asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design.** v. 16, p. 265–279. 2015.

DAS, P. K.; KRINGOS, N.; WALLQVIST, V.; BIRGISSON, B. Microscale investigation of thin film surface ageing of bitumen. **Journal of Microscopy,** v. 256, n. 1, p. 73-73, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **DNIT 031: Concreto asfáltico - Especificação de material.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 035 – Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNIT 078 – Agregado graúdo – Adesividade ao ligante asfáltico.** Rio de Janeiro. 1994.

_____. **DNIT 131: – Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 135: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 136: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 155 – Material asfáltico – Determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 180: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 184: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 385: Pavimentação concreto asfáltico com asfalto polímero.** Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNIT 411: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas.** Rio de Janeiro, 2019.

_____. **DNIT 413: Pavimentação – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas.** Rio de Janeiro, 2019.

_____. **DNIT 416: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2019.

_____. **DNIT 424: Pavimentação – Agregado– Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2020.

DIN, I. M.; MIR, M. S.; FARROQ, M. A.; Effect Of Freeze-Thaw Cycles On The Properties Of Asphalt Pavements In Cold Regions: A Review. **Transportation Research Procedia.** v. 48. 2020.

DUBOIS, E.; MEHTA, Y.; NOLAN, A. Correlation between multiple stress creep recovery (MSCR) results and polymer modification of Binder. **Construction and Building Materials.** v. 65, p. 184-190. 2014.

DONG, Z.; LIU, Z.; WANG, P.; GONG, X. Nanostructure characterization of asphalt-110 aggregate interface through molecular dynamics simulation and atomic force microscopy. **Fuel.** v. 189, p. 155–163, 2017.

EPSS MARTIN, A.; ARAMBULA, E.; YIN, F.; GARCIA CUCALON, L.; CHOWDHURY, A.; ØYTTON, R.; PARK, E. S. **Evaluation Of The Moisture Susceptibility Of WMA Technologies.** National Cooperative Highway Research Program. 2014.

FACCIN, C. **Concretos Asfálticos em Utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento Mecânico e Desempenho em Campo quanto à Deformação**

Permanente. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2018.

FACCIN, C.; SPECHT, L. P.; SCHUSTER, F. D.; BOEIRA, L. D.; BRONDANI, C.; PEREIRA, D. S.; NASCIMENTO, L. A. H. Flow Number parameter as a performance criteria for asphalt mixtures rutting: evaluation to mixes applied in Brazil Southern region. **International Journal Pavement Engineering**. p. 1-13, 2021.

FARRAR, M. J.; TURNER, T. F.; PLANCHE, J.; SCHABRON, J. F.; HARNBERGER, P. M.; Evolution Of The Crossover Modulus With Oxidative Aging. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2370, p. 76–83. 2013.

FENG, G.; YU, J. Y.; ZHANG, H. L.; KUANG, D. L.; XUE, L.-H. Effect of ultraviolet aging on rheology, chemistry and morphology of ultraviolet absorber modified bitumen. **Materials and Structures**, v. 46, p. 1123-1132, 2013.

FERNÁNDEZ-GÓMEZ, W.D.; QUITNANA, H.R. LIZCANO, F.R. A review of asphalt and asphalt mixture aging. **Ingeniería e Investigación**. v. 33, no. 1, pp. 5-12, 2013.

FURLAN, A. P. **Considerações acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos, SP, 2006.

FREITAS, F. N. R.; FERREIRA, W. L. G.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Avaliação da relação entre o dano por umidade e a permeabilidade de misturas asfálticas contendo cinza volante como filler. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 1 p. 18-29. 2019.

FROSSARD, R. M. **Influência da adesividade ligante-agregado nas propriedades de fratura de misturas asfálticas sujeitas ao dano por umidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 2021.

GAO, Y.; GU, F.; ZHAO, Y. Thermal Oxidative Aging Characterization of SBS Modified Asphalt. **Journal of Wuhan University of Technology**. v. 28, n.1, p. 88-91. 2013.

GE, D.; CHEN, S.; YOU, Z.; YANG, X.; YAO, H.; YE, M.; YAP, Y. K. Correlation of DSR Results and FTIR's Carbonyl and Sulfoxide Indexes: Effect of Aging Temperature on Asphalt Rheology. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 31, n. 7. 2019.

GENNESSAUX, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e morna contendo material asfáltico fresado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2015.

GUO, F.; JIANZHONG, P.; JIUPENG, Z.; RUI, L.; PENGFEI, L.; DI, W. Study on

Adhesion Property and Moisture Effect between SBS Modified Asphalt Binder and Aggregate Using Molecular Dynamics Simulation. **Materials**. v. 15, n.19, e-6912. 2022.

GUO, M.; XU, Y.; XIULI, D.; YIQIU, T. Effect of Aging, Testing Temperature and Relative Humidity on Adhesion between Asphalt Binder and Mineral Aggregate. **Construction & Building Materials**. v. 363, e-129775. 2023.

KANITPONG, K.; BAHIA, H. Relating adhesion and cohesion of asphalts to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures. **Journal of the Transportation Research Board**. v. 1901, n. 1, p. 33–43. 2005.

KIM, Y. R. et al. **NCHRP Report 871: Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction**. Washington, D.C.: Transportation Research Board. 2018.

HARRIGAN, E. T. Simulating The Effects Of Hot Mix Asphalt Aging For Performance Testing And Pavement Structural Design. **Transportation Research Board**. 2007.

HASSANPOUR-KASANAGH, S.; AHMEDZADE, P.; FAINLEIB, A. M.; BEHNOOD, A. Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS). **Construction and Building Materials**. v. 230, 117047. 2020.

HINTZ, C.; VELASQUEZ, R.; JOHNSON, C.; BAHIA, H. U. Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. **Transportation Research Record**, v. 2207, p. 99–106. 2011.

HOFKO, B.; MARKUS, H. Rolling Thin Film Oven Test and Pressure Aging Vessel Conditioning Parameters: Effect on Viscoelastic Behavior and Binder Performance Grade. **Transportation Research Record**. n. 1, e-2574. 2016.

HOSSAIN, R.; NAZIMUDDIN, M. W. Evaluation of Degradation of SBS Modified Asphalt Binder Because of RTFO, PAV, and UV Aging Using a Novel Extensional Deformation Test. **Transportation Research Record**. v. 6, p. 447-457. 2019.

HUANG, S. C.; RON, G.; TURNER, F. Impact of Water on Asphalt Aging. **Transportation Research Record**. v. 2293, n.1, p. 63-72. 2012.

HU, J. X.; WU, S. P.; LIU, Q. T.; GARCIA HERNÁNDEZ, M. I.; WANG, Z. F.; NIE, S.; ZHANG, G. F. Effect of ultraviolet radiation in different wavebands on bitumen. **Construction Building and Materials**. v. 159, p. 479-485. 2018.

HU, M.; GUOQIANG, S.; DAQUAN, S.; ZHANG, Y.; MA, J.; LU, T. Effect of Thermal Aging on High Viscosity Modified Asphalt Binder: Rheological Property, Chemical Composition and Phase Morphology. **Construction & Building Materials**. v. 241, e-118023. 2020.

HU, Y.; SI, W.; KANG, X.; XUE, Y.; WANG, H.; PARRY, T.; AIREY, G. D. State of the art: Multiscale evaluation of bitumen ageing behaviour. **Fuel**. v. 326, e- 25045. 2022.

ISLAM, M. R.; MOHAMMAD, I. H.; RAFIQU, A. T. A Study of Asphalt Aging Using Indirect Tensile Strength Test. **Construction & Building Materials**. v.95 p. 218-23. 2015.

ISLAM, M. R.; KALEVELA, S. A.; SHELBY, K. Sensitivity of the flow number to Mix factors of Hot-Mix Asphalt. **Infrastructures**. 2019.

ISLAM, M. D. R.; HOSSAIN, M. I.; RAFIQU, A. T. A study of asphalt aging using Indirect Tensile Strength test. **Construction and Building Materials**. v. 95. p. 218-223. 2015.

ISLAM, S. K.; RANSINCHUNG, G. D.; SHANM, S. R. Performance Evaluation of Long-Term Laboratory-Aged Asphalt Mixtures Containing Different Molecular Structures of SBS Copolymers. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 35, n. 7. 2023.

JAHANGIR, R.; LITTLE, D.; BHASIN, A. Evolution of asphalt binder microstructure due to tensile loading determined using AFM and image analysis techniques. **The international journal of pavement engineering**. v. 16, p 337-349. 2015.

LESUEUR, D.; TEIXEIRA, A.; LÁZARO, M. M.; ANDALUZ, D.; RUIZ, A. A simple test method in order to assess the effect of mineral fillers on bitumen Ageing. **Construction Building and Materials**. v. 117, p. 182-189. 2016.

LI, X. J.; LUO, Y.; LI, Y.; LI, J.; ZHANG, C.; WEI, J. Effect of Laboratory Long-term Oven Aging on the Stiffness of Asphalt Mixtures. **Construction & Building Materials**. v. 258 e-120252. 2020.

LI, Y.; WU, S.; LIU, Q.; DAI, Y.; LI, C.; LI, H.; NIE, S.; SONG, W. Aging Degradation of Asphalt Binder by Narrow-band UV Radiations with a Range of Dominant Wavelengths. **Construction & Building Materials**, v. 220, p. 637-650, 2019.

LIU, G.; NIELSEN, E.; KOMACKA, J.; GREET, L.; VEN, M. V. Rheological and Chemical Evaluation on the Ageing Properties of SBS Polymer Modified Bitumen: From the Laboratory to the Field. **Construction & Building Materials**. v. 51, p. 244-48. 2014.

LIU, H.; ZHANG, Z.; TIAN, Z.; LU, C. Exploration for UV Aging Characteristics of Asphalt Binders Based on Response Surface Methodology: Insights from the UV Aging Influencing Factors and Their Interactions. **Construction & Building Materials**, v. 347, complete, 2022.

LIU, L.; LEIXIN L.; ZHAOHUI L.; CHENGCHENG, Y.; BOYANG, P.; WENBO L. Study on the Effect of Ultraviolet Absorber UV-531 on the Performance of SBS-Modified Asphalt. **Materials**. v. 15, n. 22, e-8110. 2022.

LIU, X.; WU, S.; PANG, L.; XIAO, Y.; PAN, P. Fatigue properties of layered double hydroxides modified asphalt and its mixture. *Advances in Materials Science and*

Engineering, p. 1-6, 2014.

LOPES, M.; ZHAO, D.; CHAILLEUX, E.; KANE, M.; GABET, T.; PETITEAU, C.; SOARES, J. Characterisation of Ageing Processes on the Asphalt Mixture Surface. **Road Materials and Pavement Design**, v. 15, n. 3, 2014.

LUZ, P. M. S. G. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2019.

MA, S.; LIANG F.; TAO M.; ZHAO D.; YUZHEN, Z.; XIAOMENG, Z. Dynamic Characteristic Master Curve and Parameters of Different Asphalt Mixtures. **Applied Sciences**. v. 12, n. 7, 3619. 2022.

MARINHO, P. G. T. F. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2017.

MARINHO, P. G. T. F. **Análise do comportamento reológico e de envelhecimento de ligantes asfálticos contendo nanofibrilas de celulose**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2023.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MELO NETO, O. M. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022.

MENAPACE, I.; MASSAD, E. The Influence of Moisture on the Evolution of the Microstructure of Asphalt Binders with Aging. **Road Materials and Pavement Design**. v. 21, n.2, e-331-46. 2020.

MICHALICA, P.; DAUCIK, P.; ZANZOTTO, L. Monitoring of compositional changes occurring during the oxidative aging of two selected asphalts from different sources. **Petroleum and Coal**. v. 50, p. 1-10. 2008.

MOGAWER, W. S.; BOOSHEHRAN, A.; VAHIDI, S.; AUSTERMAN, A. J. Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n. sup2, p. 193-213, 2013.

MORAES, R. **Investigation of mineral filler effects on the aging process of asphalt mastic**. Thesis. 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. **Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga**. Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março de 2016.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.

NASCIMENTO, T. C. B. **Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). USP/São Carlos. 2015.

NIE, Y.; GAO, W.; ZHOU, C.; YU, P.; SONG, X. Evaluation of Ageing Behaviors of Asphalt Binders Using FTIR Tests. **International Journal of Pavement Research & Technology**. v. 14, n. 5, p. 615-624. 2021.

NOGUERA, J. A. H.; QUINTANA, H. A. R.; GÓMEZ, W. D. F. The influence of water on the oxidation of asphalt cements. **Construction and Building Materials**. v. 71, p. 451-455. 2014.

OLIVEIRA, Y. M. M. **Reologia de ligantes asfálticos e suas variações frente à incorporação de polímeros e ao envelhecimento simplificado com RTFO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 2022.

OMAIREY, E. L.; ZHANG, Y.; SOENEN, X. Carbonneau Parametric analysis and field validations of oxidative ageing in asphalt pavements using multiphysics modelling approaches. **International Journal Pavement Engineering**. p. 1-24. 2022.

OMAIREY, E. L.; GU, F.; ZHANG, F. An equation-based multiphysics modelling framework for oxidative ageing of asphalt pavements. **Journal Cleaner Production**. v. 280, e- 124401. 2021.

PETERSEN, J. C. **Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation - Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships**. Transportation Research Circular E-C140, Transportation Research. 2009.

PETERSEN, J. C.; GLASER, R. Asphalt Oxidation Mechanisms and the Role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, p. 795-819, 2011.

PIRES, D. M.; SCHUSTER, S. L.; SPECHT, L. P.; PEREIRA, D. S.; BAINCARDO, S. A. Study of the permanent deformation of asphalt mixtures in the field: A multiscale approach. **Construction and Building Materials**. v. 325, e-126763. 2022.

PORTUGAL, A. C. X. **Avaliação Reológica de Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados com Óleo de Soja e de Milho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e

Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2016.

POSSEBON, E. P. **Estudo Laboratorial das Propriedades Mecânicas de Misturas com Diferentes Cimentos Asfálticos de Petróleo Produzidos no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2018.

QIN, Y.; MENG, Y.; LEI, J.; FU, T.; XU, R.; YANG, X. Study on the microscopic characteristics and rheological properties of thermal-oxidative aged and virgin-old recycled asphalts. **Europeu Polymers Journal**, e-110499. 2016.

QUEIROZ, R. F. R. **Avaliação do dano por fadiga de misturas asfálticas modificadas por adição de polímero a partir do modelo S-VECD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB, 2022.

RAHMANI, H.; SHIRMOHAMMADI, H.; HAMED, G. H. Effect of Asphalt Binder Aging on Thermodynamic Parameters and Its Relationship with Moisture Sensitivity of Asphalt Mixes. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. v. 30, n. 11, p. 04018278. 2018.

READ, J.; WHITEOAK, D. **The Shel Bitumen Handbook. Shell Bitumen**. Inglaterra, 5ª edição, 460 p., 2003.

RONDON, H. A.; REYES, F. A.; FLINTSCH, G.W.; MOGROVEJO, D. E.; **Environmental Effects On Hot Mix Asphalt Dynamic Mechanical Properties – A Case Study In Bogota, Columbia**. Transportation Research Board 91st Annual Meeting Compendium of Papers, 12-3637. Washington, DC. 2012.

SAFAEI, F.; LEE, J.; NASCIMENTO, L. A. H.; HINTZ, C.; KIM, R. Implications of warm-mix asphalt on long-term oxidative ageing and fatigue performance of asphalt binders and mixtures. **Road Materials and Pavement Design**. v. 15, n.1, p. 45-61. 2014.

SAHEBZAMANI, H., MOHAMMAD Z. A.; ORANG F.; ALI M. Laboratory and Field Investigation of the Effect of Polymerized Pellets on the fatigue and Low-temperature Performance of Asphalt Mixtures. **Construction and Building Materials**. v. 323, 126527. 2022.

SILVEIRA, G. D. **Determinação de compostos organosulfurados como marcadores dos processos de envelhecimento em matrizes asfálticas**. Tese (Doutorado em Química). Programa de Pós Graduação em Química. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria RS, 2018.

SIRIN, O.; OHIDUZZAMAN, M.; KASSEM, E.; PAUL, D. K. Comprehensive Evaluation of Long-term Aging of Asphalt Mixtures in Hot Climatic Condition. **Road Materials and Pavement Design**. v. 21, n. 4, p. 927-949. 2020

SHELL. **The Shell bitumen handbook**. 5. ed. Cambridge, 2015.

SHU, S.; CHUANYI, Z.; RUIBO, R.; BAODONG, X.; KUN, C.; GEN, L. Effect of Different Anti-Stripping Agents on the Rheological Properties of Asphalt. **Coatings (Basel)**. v. 12 n.12 e-1895. 2022

SMITH, B. T.; HOWARD, I. L.; JORDAN III, W. S.; DARANGA, C.; BAUMGARDNER, G. L. **Comparing Pressure Aging Vessel Time to Field Aging of Binder as a Function of Pavement Depth and Time**. Transportation Research Record, 2018.

SUN, L.; WANG, Y.; ZHANG, Y. Aging Mechanism and Effective Recycling Ratio of SBS Modified Asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 26-35, 2014.

TAKAHASHI, M. M. **Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo. 2020.

TARBOX, S.; SIAS DANIEL, J.; Effects Of Long Term Oven Aging On Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2294, p. 1–15. 2012.

TAREFDER, R. A.; YOUSEFI, S. S. Rheological examination of aging in polymer-modified asphalt. **Journal Materials Civil Engineering**. v. 28, n. 2, p. 04015112. 2015.

TAUSTE, R.; MORENO-NAVARRO, F.; SOL-SÁNCHEZ, M.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. **Construction Building and Materials**. v. 192, p. 593-609. 2018.

TIAN, X.; LI, G.; LU, X.; GUO, C.; HU, H. Study on the Short-Term Aging Behavior of Asphalt Based on PCA and LSM Analysis. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 34, n. 8. 2022.

UNDERWOOD, B. S. **Multiscale constitutive modeling of asphalt concrete**. Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 2011.

WEIGEL, S.; STEPHAN, D. Modelling of rheological and ageing properties of bitumen based on its chemical structure. **Materials and Structure**. v. 50, n. 83. 2017.

WEST, R.; RODEZNO, C.; JULIAN, G., PROWELL, B. **Engineering Properties And Field Performance Of Warm Mix Asphalt Technologies (NCHRP 9-47A Draft Final Report)**. National Cooperative Highway Research Program. 2014.

WEST, R. C.; WATSON, D. E.; CASOLA, J. R. **NCHRP Report 648: Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt**. Washington, D.C.: Transportation Research Board, American Association of State Highway and Transportation Officials. 2017.

WOO, W. J.; CHOWDHURY, A.; GLOVER, C. J. Field aging of unmodified asphalt binder in three Texas Long-Term Performance Pavements. **Transportation Research Record**, n. 2051, p. 15-22. 2008.

XI, L.; LUO, R.; LIU, H. Evaluating the influence of humidity on asphalt mixture performance by the flow number test. **Construction and Building Materials**. v. 284, e-122754. 2021.

XIAO, F. P.; AMIRKHANIAN, H. N.; WANG, P. W.; HAO, S. Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures. **Construction Building and Materials**. v. 64, p. 316–323. 2014.

YAN, C.; HUANG, W.; JIANMIN, M.; TANG, N. Evaluation of the temperature effect on Rolling Thin Film Oven aging for polymer modified asphalt. **Construction & Building Materials**. v. 137, p 485-493. 2017.

YAN, C.; HUANG, W.; MA, J.; XU, J.; LV, Q.; LIN, P. Characterizing the SBS Polymer Degradation within High Content Polymer Modified Asphalt Using ATR-FTIR. **Construction & Building Materials**. v. 233, e-117708. 2020.

YANG, K.; LI, R., SHANE, B. U.; CASTORENA, C. Effect of Laboratory Oxidative Aging on Dynamic Shear Rheometer Measures of Asphalt Binder Fatigue Cracking Resistance. **Construction & Building Materials**. v. 337, e-127566. 2022.

YAO, H.; DAI, Q.; YOU, Z.; YE, M.; YAP, Y. K., Rheological Properties, Low-Temperature Cracking Resistance, and Optical Performance of Exfoliated Graphite Nanoplatelets Modified Asphalt Binder. **Construction and Building Materials**. V. 113, p. 988-996. 2016.

YIN, F., ARAMBULA-MERCADO, E., MARTIN, A. E., NEWCOMB, D., TRAN, N.; LONG-TERM AGEING OF ASPHALT MIXTURES. **Road Materials and Pavement Design**, V 18, p 2-27. 2017.

YU, J. Y.; PANG, L.; WU, S. P. **Aging and Anti-Aging of Asphalt Material**. Wuhan University of Technology Press Wuhan. 2012.

ZENG, W. B.; WU, S. P.; PANG, L.; CHEN, H. H.; HU, J. X.; SUN, Y. H.; CHEN, Z. W. Research on Ultra Violet (UV) aging depth of asphalts. **Construction Building and Materials**. v. 160. 2018.

ZENG, W.; WU, S.; WEN, J.; CHEN, Z. The Temperature Effects in Aging Index of Asphalt during UV Aging Process. **Construction & Building Materials**, v. 93, p. 1125-1131, 2015.

ZHANG, H.; CHEN, Z.; XU, G.; SHI, C. Physical, rheological and chemical characterization of aging behaviors of thermochromic asphalt binder. **Fuel**, v. 211, p. 850-858, Jan. 2018.

ZHANG, J.; APEAGYEI, A. K.; AIREY, G. D.; GRENFELL, J. R. A. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. v. 62, p. 45–54, 2015.

ZHANG, J.; FAN, Z.; HU, D.; HU, Z.; PEI, J.; KONG, W. Evaluation of asphalt–aggregate interaction based on the rheological properties. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, n. 7, p. 586–592, 2018.

ZHANG, K.; LUO, Y.; WANG, Y.; LI, W.; YU, G. Material Optimization and Optimum Asphalt Content Design of Asphalt Mixture in Salty and Humid Environment. **Construction and Building Materials**. v.196, p. 703–713. 2019.

ZHANG, Z.; HAN, S.; HAN, X.; DONG, S.; YAO, T. Performance changes of hot recycled asphalt mixture in different layers under coupling of multiple aging factors. **Construction and Building Materials**. v. 269, e- 121343. 2021.

ZHANG, D.; YUANMING, Z.; GUANGCHEN, Y.; GUOPING, Q.; HENGLONG, Z.; ZHANPING, Y.; PING, L. Chemical Characteristics Analyze of SBS-modified Bitumen Containing Composite Nanomaterials after Aging by FTIR and GPC. **Construction and Building Materials**. v. 324, e-126522. 2022.

ZIARI, H.; AMINI, A.; GOLI, A. Investigation of blending conditions effect on GTR dissolution and rheological properties of rubberized binders. **Construction and Building Materials**. v. 242, e- 117828. 2020.

ANEXO

