



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MATEUS LIMA RODRIGUES

**ENVELHECIMENTO ASFÁLTICO: ESTUDO COMPARATIVO DE ENSAIOS
MECÂNICOS, REOLÓGICOS E DE ADESIVIDADE DE DIFERENTES PORÇÕES
DO REVESTIMENTO**

CRATEÚS

2026

MATEUS LIMA RODRIGUES

ENVELHECIMENTO ASFÁLTICO: ESTUDO COMPARATIVO DE ENSAIOS
MECÂNICOS, REOLÓGICOS E DE ADESIVIDADE DE DIFERENTES PORÇÕES DO
REVESTIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Janáina Lopes
Leitinho.

CRATEÚS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R614e Rodrigues, Mateus Lima.

Envelhecimento asfáltico: estudo comparativo de ensaios mecânicos, reológicos e de adesividade de diferentes porções do revestimento / Mateus Lima Rodrigues. – 2026.
73 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2026.

Orientação: Profa. Dra. Janaína Lopes Leitinho.

1. Revestimento asfáltico. 2. Envelhecimento. 3. Ensaios. I. Título.

CDD 620

MATEUS LIMA RODRIGUES

ENVELHECIMENTO ASFÁLTICO: ESTUDO COMPARATIVO DE ENSAIOS
MECÂNICOS, REOLÓGICOS E DE ADESIVIDADE DE DIFERENTES PORÇÕES DO
REVESTIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado em: 22/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof(a). Dr(a). Janaína Lopes Leitinho (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas F. A. L. Babadopulos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Francisco Emerson Ferreira de Macedo
Engenheiro Civil

A Deus.

autor da minha vida e razão das minhas conquistas, toda honra e toda glória, pois d'Ele, por Ele e para Ele são todas as coisas.

AGRADECIMENTOS

À minha família, expresso minha mais profunda gratidão por todo o amor e incentivo ao longo desta jornada. Em especial, ao meu pai, Elizeudo, e à minha mãe, Maciana, por serem exemplos de caráter, dedicação e força, sempre acreditando no meu potencial. Ao meu irmão, Antônio Felipe, pelo companheirismo e pelas “palavras de apoio” quando mais precisei. E à minha avó, Francisca Franco, fonte inesgotável de carinho, que com suas orações me deu forças para seguir em frente.

À minha futura esposa, Lívia, deixo um agradecimento que palavras dificilmente conseguem traduzir por completo. Ela foi meu alicerce, minha motivação e meu refúgio nos dias mais difíceis. Seu amor, compreensão e apoio incondicional foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Nada disso seria possível sem ela, e é com o coração cheio de amor e gratidão que dedico a ela uma parte deste sonho concretizado.

À minha orientadora, Dr(a). Janaína, agradeço imensamente pela paciência e pelo compromisso em me guiar com sabedoria e rigor acadêmico. Sua disponibilidade, suas contribuições valiosas e sua confiança no meu trabalho foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Sinto-me verdadeiramente privilegiado por ter aprendido sob sua orientação e por todo o conhecimento que pude adquirir ao longo deste processo.

Ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC onde realizei os ensaios experimentais, deixo meu sincero agradecimento pelo espaço, pela estrutura e pelo ambiente de aprendizado que proporcionaram. Em especial, ao Wesley, por toda a paciência e disponibilidade em me ensinar os procedimentos e técnicas dos ensaios, contribuindo diretamente para a qualidade deste trabalho. E à Leônia, pelas conversas sempre enriquecedoras, cheias de sabedoria e reflexões sobre o mundo e a ciência, momentos que inspiraram não apenas este estudo, mas também minha forma de enxergar o conhecimento.

À banca examinadora, manifesto meu respeito e gratidão pela disponibilidade em avaliar este trabalho, pelas observações criteriosas e pelas contribuições valiosas que certamente enriqueceram esta pesquisa. O olhar atento e as considerações de cada membro foram fundamentais para o aprimoramento deste estudo e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

“Our highways are not just concrete and steel — they are the arteries through which the lifeblood of our nation flows.” (John F. Kennedy, 1962).

RESUMO

O envelhecimento asfáltico é um dos principais mecanismos responsáveis pela degradação do desempenho dos pavimentos asfálticos, estando associado a processos físico-químicos que promovem o enrijecimento do ligante, a perda de flexibilidade da mistura e a redução da interação entre ligante e agregado, especialmente em condições úmidas. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo compreender os mecanismos de envelhecimento do revestimento asfáltico por meio da avaliação das propriedades mecânicas, reológicas e de adesividade das porções superior, inferior e total da camada de revestimento asfáltico. Para tanto, foram extraídos corpos de prova do revestimento da rodovia CE-060, os quais foram submetidos aos ensaios mecânicos de resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga. Além disso, um corpo de prova íntegro (cerca de 65 mm) foi seccionado, originando as porções superior (cerca de 32,5 mm) e inferior (cerca de 32,5 mm), que também foram submetidos aos mesmos ensaios mecânicos. A partir dessas amostras, procedeu-se à extração e recuperação dos ligantes asfálticos dessas porções, possibilitando a realização do ensaio reológico de módulo complexo em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e análises químicas por espectroscopia no infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR). Adicionalmente, a interação ligante-agregado foi avaliada por meio de ensaios de adesividade do tipo *Binder Bond Strength* (BBS), considerando diferentes agregados e condições de umidade. Os resultados obtidos permitiram identificar variações significativas nas propriedades mecânicas e reológicas entre as diferentes porções do revestimento, evidenciando maior grau de envelhecimento na região superior da camada asfáltica. As análises de FTIR corroboram com esse resultado, uma vez que, indicaram maiores índices de oxidação para o ligante da porção superior. Em relação aos ensaios de adesividade, os resultados revelaram impactos negativos do envelhecimento na resistência da interface ligante-agregado, especialmente em condição úmida. Dessa forma, o estudo contribui para o entendimento do envelhecimento dos pavimentos asfálticos, fornecendo subsídios técnicos para o aprimoramento de projetos, materiais e estratégias de manutenção mais duráveis.

Palavras-chave: revestimento asfáltico; envelhecimento; ensaios.

ABSTRACT

Asphalt aging is one of the main mechanisms responsible for the degradation of asphalt pavement performance, being associated with physicochemical processes that promote the hardening of the binder, loss of flexibility in the mix, and reduction of the interaction between binder and aggregate, especially under wet conditions. In this context, the objective of this study was to understand the mechanisms of asphalt coating aging through the evaluation of the mechanical, rheological, and adhesion properties of the upper, lower, and total portions of the asphalt coating layer. To achieve this, specimens were extracted from the coating of the CE-060 highway and subjected to mechanical tests such as tensile strength, resilience modulus, and fatigue. Additionally, an intact specimen (about 65 mm) was sectioned into upper (about 32.5 mm) and lower (about 32.5 mm) portions, which were also tested in the same mechanical tests. From these samples, asphalt binders were extracted and recovered from these portions, enabling the performance of rheological tests on complex modulus using a dynamic shear rheometer (DSR) and chemical analysis via Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). Furthermore, the binder-aggregate interaction was assessed through Binder Bond Strength (BBS) adhesion tests, considering different aggregates and moisture conditions. The results allowed the identification of significant variations in mechanical and rheological properties among the different portions of the coating, highlighting a higher degree of aging in the upper region of the asphalt layer. The FTIR analyses support this finding, as they indicated higher oxidation levels for the binder in the upper portion. Regarding the adhesion tests, the results revealed negative impacts of aging on the binder-aggregate interface strength, especially under wet conditions. Thus, the study contributes to understanding the aging of asphalt pavements, providing technical insights for improving design, materials, and more durable maintenance strategies.

Keywords: asphalt pavement; aging; tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Seção transversal de estradas romanas.....	14
Figura 02: Camadas do pavimento asfáltico.....	15
Figura 03: Frações SARA via cromatografia.....	21
Figura 04: Exemplos de moléculas saturadas.....	22
Figura 05: Exemplos de moléculas aromáticas.....	22
Figura 06: Exemplos de moléculas resinadas.....	23
Figura 07: Exemplo de molécula de asfalto.....	23
Figura 08: Exemplo de estrutura sol e gel.....	24
Figura 09: Ensaio de penetração.....	26
Figura 10: Ensaio de Ponto de Amolecimento.....	26
Figura 11: Ensaio ponto de fulgor.....	27
Figura 12: Ensaio de ductilidade.....	28
Figura 13: Ensaio <i>Brookfield</i>	29
Figura 14: Ensaio de solubilidade em tricloroetileno.....	30
Figura 15: Ensaio RTFOT.....	30
Figura 16: Ensaio PAV.....	32
Figura 17: Mistura Asfáltica.....	35
Figura 18: Forças atuantes na interface ligante-agregado.....	37
Figura 19: Corpos de prova.....	41
Figura 20: Ensaio RT.....	43
Figura 21: Ensaio MR.....	44
Figura 22: Preparação de amostras.....	46
Figura 23: Extração via <i>Soxhlet</i>	46
Figura 24: Sistema <i>Abson</i> de recuperação.....	47
Figura 25: Reômetro.....	48
Figura 26: Amostras do ensaio.....	50
Figura 27: Ensaio de adesividade.....	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01: Curvas granulométricas.....	36
Gráfico 02: Valores de MR dos CP's.....	52
Gráfico 03: Valores de vida de fadiga (Nf) dos CP's.....	54
Gráfico 04: Decaimento da resistência dos CP's ao longo dos ciclos de carga.....	54
Gráfico 05: Curva Módulo Complexo.....	55
Gráfico 06: Espectros dos LA's.....	57
Gráfico 07: Índice de Sulfoxidação (IS).....	57
Gráfico 08: Índice de Carbonilação (IC).....	58
Gráfico 09: POTS das amostras.....	59
Gráfico 10: Rpots das amostras.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Limites dos ensaios.....	25
Tabela 02: Dimensões dos corpos de prova extraídos.....	40
Tabela 03: Dimensões dos corpos de prova seccionados.....	42
Tabela 04: Valores de RT por janela de extração.....	51
Tabela 05: Resultados do ensaio de MR.....	51
Tabela 06: Resultados do ensaio de fadiga.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNT	Confederação Nacional de Transportes
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinados, Asfaltenos
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ME	Método de Ensaio
IST	Índice de Suscetibilidade Térmica
PA	Ponto de Amolecimento
PEN	Penetração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNER	Departamento Nacional de Estradas Rodagem
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin-Film Oven Test</i>
PAV	<i>Pressurized Aging Vessel</i>
EUA	Estados Unidos da América
RT	Resistência à Tração
MR	Módulo de Resiliência
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CP's	Corpos de Prova
CPC	Corpo de Prova Completo
CPS	Corpo de Prova Superior
CPI	Corpo de Prova Inferior
LAC	Ligante Asfáltico Completo
LAS	Ligante Asfáltico Superior
LAI	Ligante Asfáltico Inferior
LVDT's	Linear Variable Differential Transformer
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
BBS	<i>Binder Bond Strength</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
POTS	<i>Pull-Off Tensile Strength</i>
Rpots	<i>Razão Pull-Off Tensile Strength</i>
IS	Índice de Sulfoxidação

IC	Índice de Carbonilação (IC)
Sol	Solução
CE	Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

KBr	Brometo de Potássio
a.C.	Antes de Cristo
A	Área
h	Altura
D	Diâmetro
km	Quilômetro
%	Porcentagem
R\$	Real Brasileiro
ppm	Partes Por Milhão
g	Gramas
mol	Quantidade de Matéria - $6,022 \times 10^{23}$
H	Hidrogênio
C	Carbono
nm	Nanômetro
mm	Milímetro
°C	Graus Celsius
±	Mais ou Menos
s	Segundos
min	Minutos
cm	Centímetros
log	Logaritmo
mL	Mililitro
C=O	Grupo Carbonila
S=O	Grupo Sulfóxido
CH ₂	Metileno
CH ₃	Metil
MPa	Mega Pascal
G*	Módulo Complexo de Cisalhamento
i	Número Complexo = $\sqrt{-1}$
G'	Módulo de Armazenamento
G''	Módulo de Perda

cos	Cosseno
sen	Seno
δ	Ângulo de Fase
<	Menor que
σ_R	Tensão de Resistência à Tração
F	Força
π	3,1415...
N	Unidade de Força - Newton
Nf	Ciclo de Vida de Fadiga
CO ₂	Gás Carbônico
rad	Radianos

SUMÁRIO

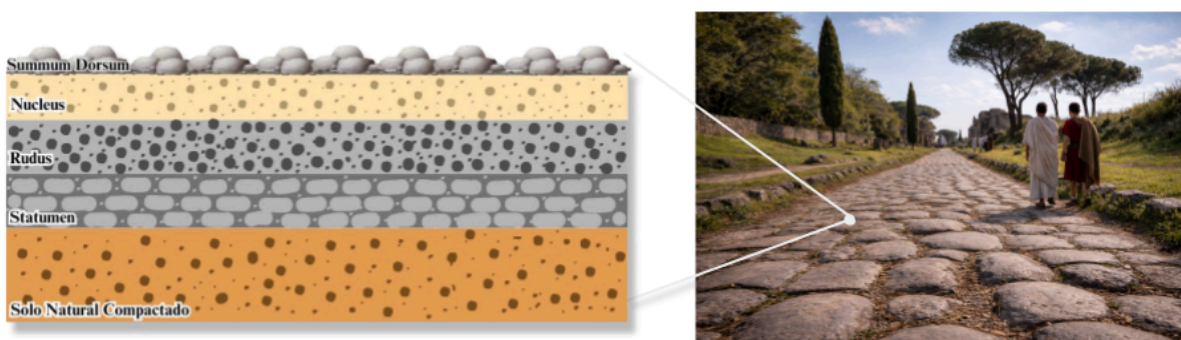
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 JUSTIFICATIVA.....	17
3 OBJETIVOS.....	18
3.1 Geral.....	18
3.2 Específicos.....	18
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
4.1 Pavimentos asfálticos.....	19
4.1.1 Subleito.....	19
4.1.2 Reforço do Subleito.....	19
4.1.3 Base e Sub-Base.....	19
4.1.4 Revestimento.....	20
4.2 Ligantes asfálticos.....	20
4.2.1 Saturados.....	21
4.2.2 Aromáticos.....	22
4.2.3 Resinas.....	22
4.2.4 Asfaltenos.....	23
4.2.5 Caracterização de ligantes asfálticos.....	25
4.2.5.1 Penetração.....	25
4.2.5.2 Ponto de amolecimento.....	26
4.2.5.3 Índice de Suscetibilidade Térmica (IST).....	27
4.2.5.4 Ponto de fulgor.....	27
4.2.5.5 Ductilidade.....	28
4.2.5.6 Viscosidade.....	28
4.2.5.7 Solubilidade em Tricloroetileno.....	29
4.2.5.8 Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT).....	30
4.3 Envelhecimento.....	31
4.3.1 Principais parâmetros de avaliação química e reológica em ligantes envelhecidos.....	33
4.3.1.1 Módulo complexo (G*).....	34
4.3.1.1 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	34
4.4 Concreto asfáltico.....	35
4.4.1 Agregados.....	36
4.4.2 Adesividade Ligante-Agregado.....	37
4.4.3 Principais propriedades mecânicas estudadas neste trabalho para as Misturas Asfálticas.....	38
4.4.3.1 Resistência à tração (RT).....	38
4.4.3.2 Fadiga.....	38
4.4.3.3 Módulo de resiliência (MR).....	39

5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
5.1 Materiais.....	39
5.2 Métodos.....	42
5.2.1 Ensaios mecânicos.....	42
5.2.1.1 Resistência à tração (RT).....	43
5.2.1.2 Módulo de resiliência (MR).....	43
5.2.1.3 Fadiga.....	45
5.2.2 Extração e recuperação dos ligantes asfálticos.....	45
5.2.3 Ensaio de módulo complexo.....	47
5.2.4 FTIR.....	48
5.2.5 Ensaios de Adesividade.....	49
6 RESULTADOS.....	51
6.1 Resistência à tração (RT).....	51
6.2 Módulo de resiliência (MR).....	51
6.3 Fadiga.....	53
6.4 Módulo complexo (G^*).....	55
6.5 FTIR.....	56
6.6 Ensaio de adesividade.....	58
7 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos, a necessidade de deslocamento e expansão territorial levou à criação das primeiras vias, que inicialmente foram constituídas por trilhas de animais e posteriormente adaptadas pelo ser humano. Essas rotas evoluíram de simples ligações entre moradias para conexões comerciais, tornando-se uma infraestrutura fundamental para o funcionamento da sociedade (KHAN, 2025). Um exemplo marcante disso é o do Império Romano, que construiu cerca de 85.000 km de vias, partindo de Roma e interligando todo o território imperial. Essa complexa rede viária favorecia o comércio e a movimentação de tropas, conectando regiões da Europa Ocidental, Central e Setentrional, além do Mediterrâneo Oriental e do Norte da África (STEIGER, 1995). Entre essas vias, a Via Ápia, construída por volta de 300 a.C., destacava-se pelo sistema construtivo em múltiplas camadas com funções estruturais definidas. Sobre o solo compactado, aplicavam-se sucessivamente as camadas *statumen*, *rudus* e *nucleus*, formadas por pedras, britas e materiais granulares cimentados com cal, garantindo resistência e drenagem. O revestimento final *summum dorsum*, composto por blocos de lava, conferia elevada durabilidade ao pavimento. (BERECHMAN, 2002).

Figura 01: Seção transversal de estradas romanas.



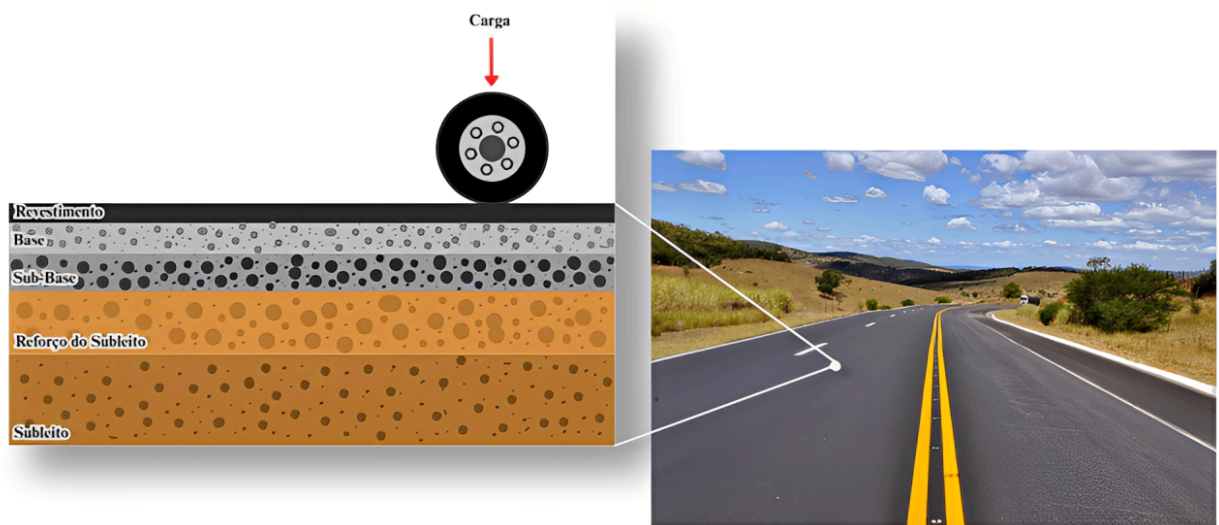
Fonte: Próprio autor.

A utilização dessas múltiplas camadas com funções estruturais específicas assegurou não apenas a funcionalidade, mas também a preservação ao longo de mais de dois milênios, evidenciando a impressionante sofisticação técnica alcançada pela engenharia romana daquela época (MATTEAZZI, 2023).

Atualmente, o pavimento rodoviário é definido como uma estrutura composta por camadas de espessuras definidas, construídas sobre um solo terraplenado com a função de

suportar os esforços gerados pelo tráfego e pelas condições climáticas, garantindo conforto, segurança e economia às pessoas. Comumente, os pavimentos são classificados como rígido (revestimento em concreto, podendo ser armado ou não) ou asfáltico (revestimento asfáltico sobre camadas granulares). Nos pavimentos asfálticos, a estrutura é formada por revestimento, base, sub-base e reforço do subleito, embora nem todas as camadas estejam sempre presentes, dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis (BERNUCCI et al., 2022).

Figura 02: Camadas do pavimento asfáltico.



Fonte: Próprio autor.

O revestimento dos pavimentos asfálticos é comumente construído a partir de uma mistura de agregados minerais de diferentes dimensões, combinados com ligantes asfálticos devidamente dosados e processados. Essa composição busca assegurar propriedades fundamentais, como impermeabilidade, flexibilidade e resistência às deformações (BERNUCCI et al., 2022). Entretanto, ao longo da vida útil, esses materiais permanecem constantemente sujeitos às ações climáticas, as quais provocam alterações em suas propriedades físicas e químicas. Esse processo, característico do envelhecimento, promove o enrijecimento do ligante asfáltico comprometendo a própria mistura, reduzindo sua capacidade de desempenho e longevidade (GÓMEZ et al., 2013).

O envelhecimento do ligante asfáltico é provocado por processos de oxidação, perda de componentes voláteis, aumento da viscosidade e da rigidez do ligante. Tais processos podem acelerar a formação e a propagação de fissuras por fadiga ao longo do tempo (BEHNOOD, 2019).

As ações do envelhecimento também exercem influência direta na perda de adesão na interface entre o ligante asfáltico e o agregado mineral. A oxidação, quando combinada com variações de temperatura e com a presença de umidade, acelera a deterioração dessa interface, reduzindo a energia de adesão e enfraquecendo a ligação do ligante com a superfície mineral. Nesse cenário, metodologias como espectroscopia no infravermelho e ensaios reológicos vêm sendo empregadas para investigar o comportamento do material sob diferentes condições ambientais, ressaltando a importância de pesquisas voltadas à durabilidade dos pavimentos asfálticos (GUO et al., 2023).

2 JUSTIFICATIVA

Du, et al., (2023) destacaram que o ligante asfáltico apresenta propriedades que influenciam diretamente o desempenho estrutural dos pavimentos. Segundo os autores, fatores como fissuração e deformação permanente estão diretamente associados às propriedades mecânicas da mistura e à interação entre seus constituintes. Além disso, os autores ressaltam que a proporção e o tipo de ligante empregado influenciam a viscosidade, a resistência à deformação e a suscetibilidade ao envelhecimento, evidenciando que o conhecimento detalhado dessas propriedades é indispensável para o desenvolvimento de projetos mais duráveis.

Complementando essa visão, Krishnan e Rajagopal (2004) destacam que as propriedades mecânicas das misturas dependem do tipo e da quantidade do ligante utilizado, bem como da interação com modificadores, o que amplia a complexidade na modelagem do comportamento constitutivo do material. Dessa forma, o entendimento aprofundado das propriedades reológicas é condição fundamental para prever o desempenho das misturas sob diferentes condições de tráfego e ambiente.

Ademais, a compreensão dessas propriedades traz benefícios financeiros concretos. Segundo pesquisas da Confederação Nacional de Transportes (CNT) em 2024, 40,4% das rodovias no país estão em condições apenas “regulares”, enquanto 20,80% estão “ruins” e 5,80% “péssimas”, o que reflete a necessidade de recuperação e manutenção preventiva. Ainda segundo a CNT, em 2024, a má conservação dessas vias fez com que 1,18 bilhão de litros de diesel fossem consumidos de forma desnecessária, acarretando um custo de R\$ 6,81 bilhões ao setor de transporte, recursos que poderiam ser destinados ao desenvolvimento de novos materiais de melhor desempenho e à preservação do pavimento. Além disso, o mesmo órgão destacou que para reconstrução, restauração e manutenção adequada da malha rodoviária, seriam necessários cerca de R\$ 99,70 bilhões, um sinal claro de que os investimentos em conhecimento técnico e uso de materiais superiores têm retorno direto na redução de despesas futuras.

Em outras palavras, entender como os materiais da camada de revestimento asfáltico se comportam diante do envelhecimento significa escolher materiais e técnicas que aumentam a durabilidade das estradas. Essas escolhas, além de melhorar o desempenho estrutural, se traduzem em economia real com menos gastos em manutenção, menor consumo de combustível e uso mais eficiente dos recursos públicos. Saber dessas propriedades, portanto, é investir no futuro sem desperdiçar no presente.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho constitui-se em compreender os mecanismos que promovem o envelhecimento asfáltico e como esses processos se propagam ao longo do revestimento asfáltico, por meio da avaliação das propriedades mecânicas, reológicas e de adesividade das porções superior, inferior e total dessa camada.

3.2 Específicos

1. Avaliar a rigidez de cada porção do revestimento asfáltico, tanto por meio de ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova quanto por meio de ensaios reológicos aplicados aos ligantes extraídos dessas porções, com o objetivo de identificar eventuais variações no desempenho estrutural da camada, decorrentes dos efeitos do envelhecimento.
2. Determinar qual dos ligantes asfálticos extraídos dos corpos de prova estudados — correspondentes ao corpo de prova íntegro e às suas porções superior e inferior — apresenta maior suscetibilidade ao envelhecimento, relacionando esse comportamento com as condições de exposição e de solicitação em serviço.
3. Investigar os efeitos do envelhecimento na interação ligante-agregado por meio de ensaios de adesividade, observando possíveis impactos desse fenômeno na capacidade de ligação entre esses materiais, tanto em condição seca quanto úmida.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Pavimentos asfálticos

Conforme discutido anteriormente, o pavimento pode ser entendido como uma estrutura constituída por múltiplas camadas, cada qual desempenhando funções específicas no sistema global viário. De acordo com Balbo (2007), são apresentadas as principais funcionalidades das camadas que compõem o pavimento asfáltico nas sub-seções a seguir.

4.1.1 Subleito

O subleito é a camada de fundação constituída tanto por material natural consolidado e compactado, no caso de cortes, quanto por material previamente transportado e devidamente compactado, no caso de aterros. Os esforços transmitidos ao subleito tendem a se dissipar em profundidade, concentrando-se com maior intensidade nas camadas superiores, por esse motivo, torna-se imprescindível dedicar maior atenção à qualidade e às características dessas camadas, onde os esforços solicitantes atingem suas maiores magnitudes.

4.1.2 Reforço do Subleito

Trata-se de uma camada de solo de melhor qualidade, executada com a finalidade de reforçar o subleito, de modo que este receba pressões reduzidas e compatíveis com sua capacidade resistente. Sobre a camada de reforço podem incidir pressões mais elevadas provenientes das cargas aplicadas ao pavimento, uma vez que sua resistência é, em tese, superior à do solo de fundação. A adoção dessa camada não é obrigatória, visto que o aumento das espessuras das camadas superiores podem, em princípio, atenuar as solicitações sobre um subleito ruim. Entretanto, sua aplicação costuma ser preferida por razões econômicas, uma vez que subleitos de baixa resistência demandam, especialmente em pavimentos flexíveis, maiores espessuras de base e sub-base.

4.1.3 Base e Sub-Base

A base é uma camada de solo com uma capacidade mecânica superior ao subleito e ao reforço a fim de reduzir as pressões incidentes sobre esses estratos inferiores. Ela pode

ser constituída por diferentes tipos de materiais, como solos naturalmente estabilizados, misturas de solos e agregados, solos estabilizados quimicamente com ligantes hidráulicos ou asfálticos, concreto, entre outros. Quando a espessura da base necessária para promover a adequada distribuição dos esforços se torna excessiva, adota-se, por razões técnicas e econômicas, a divisão em duas camadas distintas, instituindo-se a sub-base, que geralmente apresenta menor custo. Na prática, o material empregado na sub-base pode ser o mesmo utilizado na base, variando em qualidade e especificações conforme a função que desempenhará.

4.1.4 Revestimento

O revestimento é a camada superficial do pavimento que recebe diretamente as cargas estáticas e dinâmicas sem apresentar deformações excessivas, sejam elas elásticas ou plásticas, nem sofrer desagregação de seus componentes ou perda de compactação. Para tanto, é imprescindível que seja constituído por materiais devidamente aglutinados ou dispostos de forma a impedir movimentos horizontais indesejáveis. Entre os materiais capazes de atender a essas exigências destacam-se, nos pavimentos flexíveis, as misturas asfálticas em geral.

4.2 Ligantes asfálticos

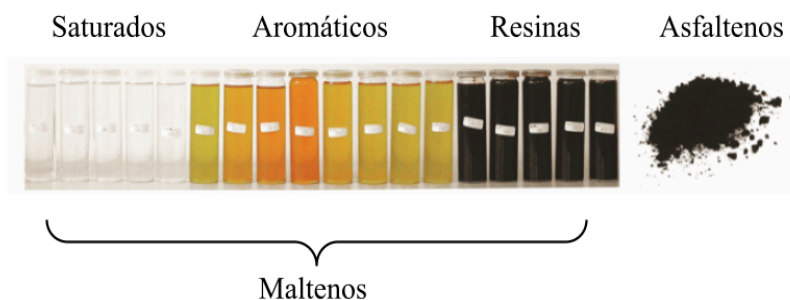
Exceto uma pequena fração proveniente de ocorrências naturais, os asfaltos de uso comercial são produtos resultantes de processos de refino do petróleo. Dessa forma, a composição de um asfalto está intrinsecamente relacionada às características do petróleo bruto a partir do qual é produzido. Em geral, os asfaltos comerciais correspondem aos resíduos obtidos nas etapas finais da destilação do petróleo (PETERSEN et al., 1994). Quando o ligante asfáltico atende características específicas, geralmente definidas a partir de propriedades físicas destinadas a garantir o bom desempenho do material em aplicações de pavimentação, ele passa a ser denominado pela sigla CAP, que corresponde a Cimento Asfáltico de Petróleo (BERNUCCI et al., 2022).

O ligante asfáltico é constituído predominantemente por carbono (80–88%) e hidrogênio (8–12%), o que resulta em um teor de hidrocarbonetos superior a 90%. Além desses elementos, estão presentes heteroátomos, como enxofre (0–9%), nitrogênio (0–2%) e oxigênio (0–2%). Também podem ser encontrados traços de metais, destacando-se o vanádio (até 2000 ppm) e o níquel (até 200 ppm). A composição elementar do asfalto, entretanto, não

é fixa, variando conforme a origem do petróleo utilizado, dificultando assim uma caracterização química completa e universal (LESUEUR, 2009).

Portanto, para viabilizar a análise e a compreensão desse material, sua composição é tradicionalmente classificada em grupos químicos com características estruturais semelhantes. Essa classificação divide o ligante asfáltico em duas grandes frações: os asfaltenos, que correspondem à parte mais polar e de maior massa molecular, e os maltenos, que representam a fração mais volátil e de menor massa molecular. Os maltenos, por sua vez, podem ser separados em três subgrupos principais: saturados, aromáticos e resinas. (LI et al., 2025). As técnicas cromatográficas são os métodos mais utilizados para determinar experimentalmente a constituição do ligante asfáltico. A base desses métodos é inicialmente precipitar os asfaltenos usando n-heptano, seguido pela separação cromatográfica dos constituintes restantes. Usando essa técnica, o CAP pode ser separado em quatro grupos: saturados (S), aromáticos (A), resinas (R) e asfaltenos (A) ou simplesmente SARA (HUNDLE et al., 2016).

Figura 03: Frações SARA via cromatografia.



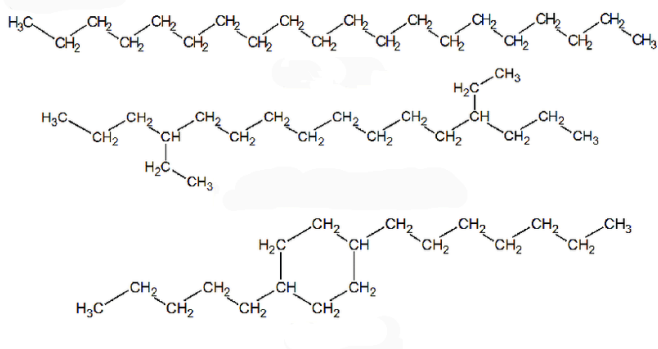
Fonte: Adaptado de Hundle et al., 2016.

De acordo com a Shell (2015), são apresentadas as principais características das frações SARA nas sub-seções a seguir.

4.2.1 Saturados

Os saturados correspondem a hidrocarbonetos alifáticos de cadeia reta ou ramificada, além de compostos cicloalifáticos. Tratam-se de moléculas viscosas, não polares, geralmente incolores ou com coloração amarelo-palha. A razão molar hidrogênio/carbono (H/C) dessa fração é próxima de 2. O peso molecular médio situa-se, em geral, entre 470 e 880 g/mol. No asfalto, os saturados representam aproximadamente 5 a 20% da massa total.

Figura 04: Exemplos de moléculas saturadas.

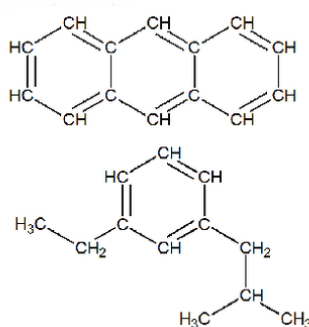


Fonte: Adaptado de Nahar, 2016.

4.2.2 Aromáticos

Os aromáticos são formados por cadeias de carbono não polares associadas a sistemas de anéis insaturados. Essa fração corresponde a cerca de 40–65% da massa do asfalto e apresenta-se como moléculas viscosas de coloração marrom-escura. A razão molar hidrogênio/carbono (H/C) varia entre 1,4 e 1,6, enquanto o peso molecular médio situa-se na faixa de 570 a 980 g/mol.

Figura 05: Exemplos de moléculas aromáticas.



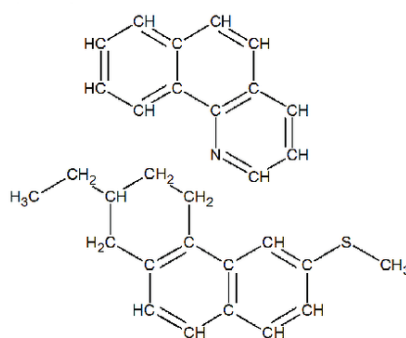
Fonte: Adaptado de Nahar, 2016.

4.2.3 Resinas

As resinas são componentes solúveis em n-heptano e compostas, predominantemente, por carbono e hidrogênio e um pequeno número de átomos de oxigênio, enxofre e nitrogênio. Apresentam coloração marrom-escura e ocorrem em estado sólido ou

semi-sólido. De natureza polar, exibem forte caráter adesivo e atuam como agentes dispersantes (ou peptizantes) dos asfaltenos. A proporção entre resinas e asfaltenos influencia diretamente a viscosidade do material, conferindo-lhe maior ou menor fluidez. Quando isoladas do asfalto, as resinas apresentam pesos moleculares na faixa de 780 a 1400 g/mol e uma razão atômica H/C entre 1,4 e 1,7.

Figura 06: Exemplos de moléculas resinadas.

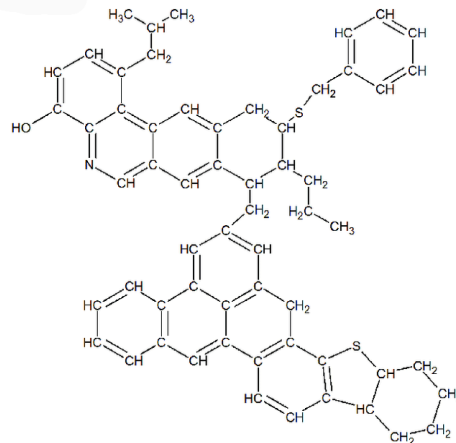


Fonte: Adaptado de Nahar, 2016.

4.2.4 Asfaltenos

Os asfaltenos são sólidos amorfos compostos de carbono e hidrogênio e alguns átomos de nitrogênio, enxofre e oxigênio. Eles possuem coloração preta ou marrom-escura e são insolúveis em n-heptano. Os asfaltenos são geralmente descritos como materiais aromáticos polares e estruturalmente complexos, apresentando pesos moleculares elevados, variando entre 800 e 3500 g/mol. A razão atômica H/C situa-se entre 0,98 e 1,6, enquanto o tamanho médio das partículas encontra-se na faixa de 2 a 5 nm. O teor de asfaltenos exerce forte influência sobre as propriedades reológicas do ligante: concentrações mais elevadas resultam em asfaltos mais rígidos, com menor penetração, maior ponto de amolecimento e, conseqüentemente, viscosidade superior. Essa fração representa aproximadamente 5 a 25% da massa do asfalto.

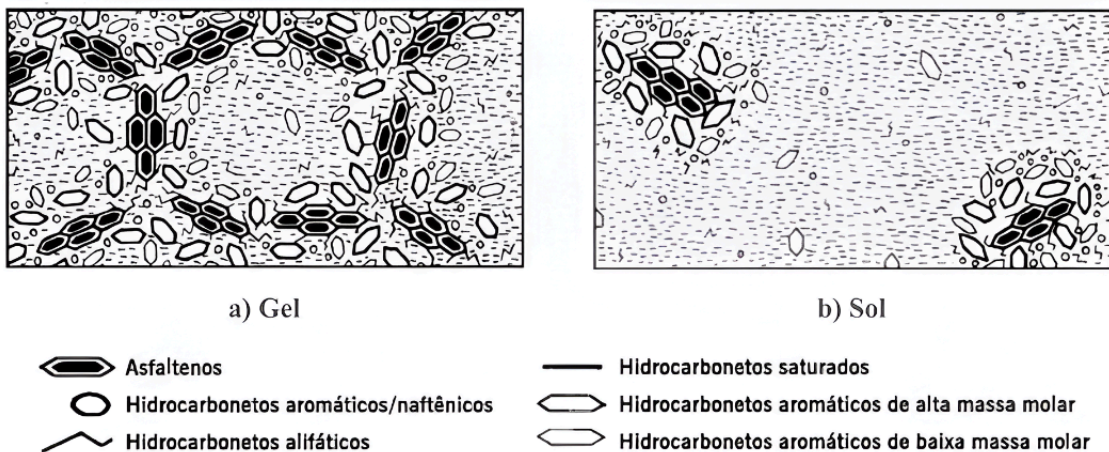
Figura 07: Exemplo de molécula de asfalteno.



Fonte: Adaptado de Nahar, 2016.

A mistura de componentes saturados, aromáticos e asfaltenos forma micelas com as resinas que conferem ao ligante um estrutura coloidal. Estas micelas podem ser do tipo diretas ou inversas, conforme a orientação dos grupos polares. Além disso, a proporção entre resinas e asfaltenos no colóide desempenha papel fundamental no estado físico do ligante, podendo este, comportar-se como uma solução (sol), quando há maior dispersão, ou como um gel, sendo uma estrutura mais rígida e viscosa predominando os asfaltenos (LESUEUR, 2009; BERNUCCI et al., 2022).

Figura 08: Exemplo de estrutura sol e gel.



Fonte: Adaptado de Lesueur, 2009.

A estrutura do ligante, no entanto, varia com a origem do petróleo, o que pode gerar colóides com propriedades físico-químicas diferentes e, por consequência, pode influenciar o desempenho estrutural no pavimento. Desta forma, para garantir uma boa durabilidade em serviço foram criadas normativas que garantem a qualidade e durabilidade do

ligante no pavimento. As características requisitadas para o ligante são regulamentadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

4.2.5 Caracterização de ligantes asfálticos

Os intervalos limites das propriedades comerciais requisitadas pelo DNIT estão descritas na Tabela 01.

Tabela 01: Limites dos ensaios

Ensaio	Unidades	Limites			
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200
Penetração	0,1 mm	30-45	50-70	85-100	150-200
Ponto de amolecimento	°C	52	46	43	37
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7
Viscosidade Brookfield					
135 °C, SP 21	cP	374	274	214	155
150 °C, SP 21	cP	203	112	97	81
177 °C, SP 21	cP	76-285	57-285	28-114	28-114
Ponto de fulgor	°C	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductibilidade	cm	60	60	100	100
RTFOT					
Varição de massa	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5
Penetração retida	%	60	55	55	50
Aumento máximo do ponto de amolecimento	°C	8	8	8	8
Ductibilidade	cm	10	20	50	50

Fonte: Adaptado de DNIT 095/2006 – ME.

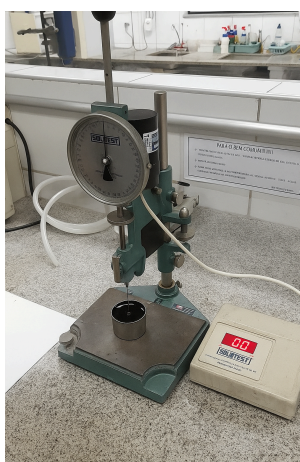
A seguir, são apresentados os ensaios de caracterização previstos pela referida norma nacional.

4.2.5.1 Penetração

O ensaio de penetração consiste em determinar a profundidade, expressa em décimos de milímetro (0,1 mm), que uma agulha padrão incide verticalmente em uma amostra

de ligante asfáltico, quando submetida a condições controladas de carga, tempo e temperatura. Para a realização do ensaio, a haste e a agulha devem possuir massa total de 100 g, sendo a penetração medida após um período de 5 segundos, à temperatura de 25 °C. Esse parâmetro é um dos principais critérios de classificação do CAP, pois os próprios limites de penetração constam em sua denominação. Por exemplo, o CAP 50/70 corresponde a um ligante cuja penetração se situa entre 50 e 70 décimos de milímetro (DNIT 155/2010 – ME).

Figura 09: Ensaio de penetração.

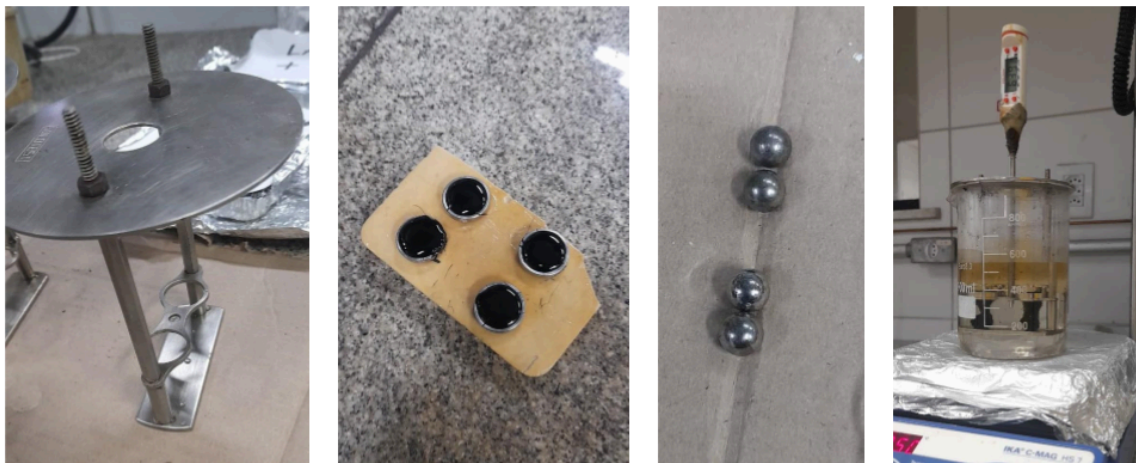


Fonte: Próprio autor.

4.2.5.2 Ponto de amolecimento

O procedimento é realizado pelo método anel e bola, o qual o ligante é fundido e moldado em dois anéis metálicos padronizados, e após o resfriamento, cada anel é posicionado em um suporte e, sobre a superfície do ligante, coloca-se uma pequena esfera de aço de 3,5g e 9,5 mm de diâmetro. Em seguida, o conjunto é imerso em banho de líquido aquecido (água ou glicerina, dependendo da faixa de temperatura), com elevação controlada da temperatura a uma taxa de $5 \pm 0,5$ °C por minuto. O ponto de amolecimento é definido como a temperatura média registrada no momento em que as esferas atravessam a camada de ligante e atingem uma placa metálica localizada a 25 mm abaixo da base do anel (DNIT 131/2010 - ME).

Figura 10: Ensaio de Ponto de Amolecimento.



a) Suporte

b) Anéis e amostras

c) Esferas metálicas

d) Sistema

Fonte: Próprio autor.

4.2.5.3 Índice de Suscetibilidade Térmica (IST)

Com os valores de penetração e ponto de amolecimento é possível descrever a sensibilidade do ligante em relação a temperatura através do *IST*, determinado pela equação abaixo (DNIT 095/2006 - ME):

$$IST = \frac{500 \cdot \log(PEN) + 20 \cdot PA - 1951}{120 - 50 \cdot \log(PEN) + PA} \quad (1)$$

Onde:

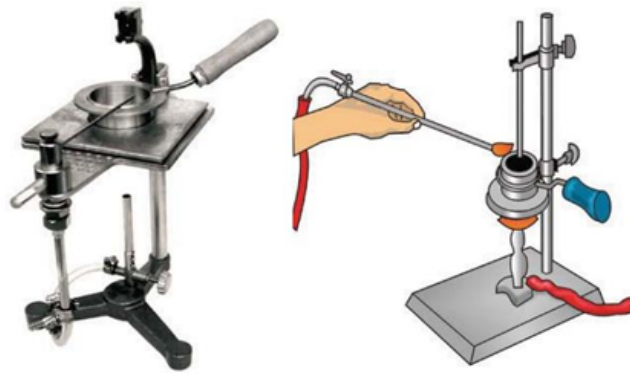
PA - ponto de amolecimento em °C;

PEN - penetração a 25°C, 100g, 5s.

4.2.5.4 Ponto de fulgor

O ponto de fulgor é a temperatura mínima na qual os vapores liberados por um produto asfáltico inflamam-se momentaneamente ao contato com uma chama padronizada, em condições controladas de ensaio. O teste é realizado no vaso de Cleveland, aquecendo a amostra a uma taxa de 5 a 6 °C por minuto, até que ocorra a ignição dos vapores. A temperatura registrada nesse instante corresponde ao ponto de fulgor (ABNT NBR 11341/2014).

Figura 11: Ensaio ponto de fulgor.

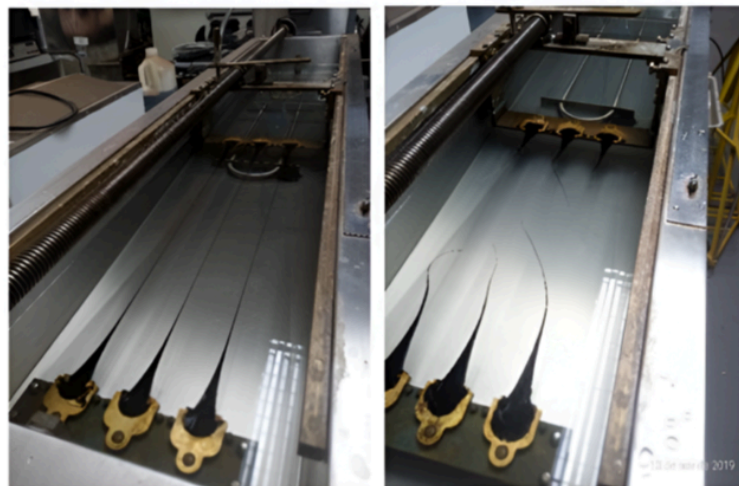


Fonte: Bernucci et al., 2022.

4.2.5.5 Ductilidade

A ductilidade de ligantes asfálticos corresponde à capacidade do material de se alongar de forma contínua sob a ação de uma força de tração, sem sofrer ruptura. Para sua determinação, o ligante é imerso em água mantida a $25 \pm 0,5$ °C e submetido a alongamento sob velocidade constante de $5 \pm 0,25$ cm/min, até que ocorra a ruptura do próprio material. O resultado é expresso pelo comprimento máximo atingido pela amostra, em centímetros, representando de maneira quantitativa a capacidade de deformação do ligante asfáltico (DNER-ME 163/1998; ABNT NBR 6293/2015).

Figura 12: Ensaio de ductilidade.



a) Amostras alongadas

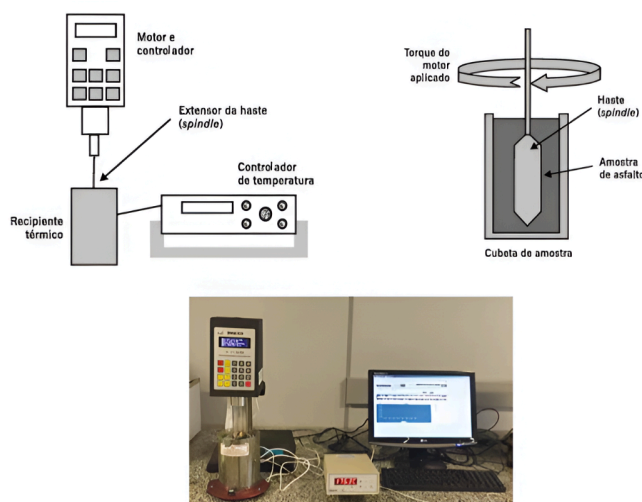
b) Amostras rompidas

Fonte: Adaptado de Amaral e Alves, 2019.

4.2.5.6 Viscosidade

A viscosidade é a propriedade que expressa a resistência interna de um fluido ao escoamento. Atualmente, o método mais empregado para a determinação dessa propriedade é dado pelo viscosímetro *Brookfield*. Esse equipamento baseia-se na resistência ao torque exercida sobre um rotor que gira em diferentes velocidades dentro da amostra, permitindo determinar a viscosidade aparente em função da temperatura. Esse mesmo equipamento pode ser aplicado com vários tipos de hastes (*spindles*) e para cada tipo de material ou faixa de temperatura é preciso especificar a haste correta. (ABNT NBR 15184/2021, ASTM D4402/2006).

Figura 13: Ensaio Brookfield.

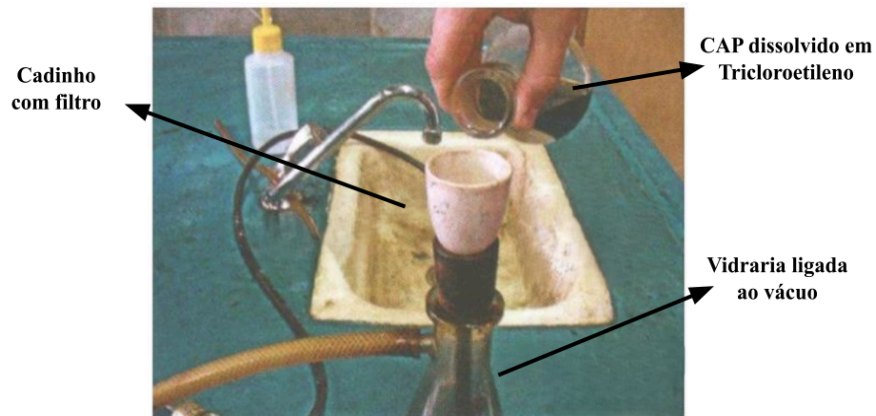


Fonte: Adaptado de Bernucci et al., 2022.

4.2.5.7 Solubilidade em Tricloroetileno

A determinação da solubilidade do ligante asfáltico em tricloroetileno tem como finalidade identificar a fração efetivamente ativa do material. A porção solúvel representa os constituintes que desempenham função ligante, enquanto a insolúvel indica impurezas ou resíduos indesejáveis. O ensaio consiste em dissolver aproximadamente 2 g de amostra em 100 mL de tricloroetileno, promovendo agitação até completa homogeneização. A solução é então filtrada em cadinho de Gooch com membrana de fibra de vidro, retendo o material insolúvel, que é posteriormente lavado, seco em estufa a 110 °C, resfriado em dessecador e pesado até atingir massa constante. Os resultados são expressos em termos de porcentagem de material insolúvel e, complementarmente, de solubilidade, permitindo avaliar a pureza do ligante (ASTM D2042/2022, ABNT NBR 14855/2002).

Figura 14: Ensaio de solubilidade em tricloroetileno.



Fonte: Adaptado de Bernucci et al., 2022.

4.2.5.8 Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT)

O ensaio RTFOT tem como objetivo simular as condições de oxidação e perda de voláteis sofridas pelo ligante durante o processo de usinagem. O método consiste em acondicionar o ligante em frascos de vidro, formando filmes delgados que são submetidos, em um forno rotativo a 163 °C, com uma corrente contínua de ar incidindo nas amostras durante 85 minutos. Os frascos são posicionados em um carrossel vertical, que gira ao longo do ensaio, garantindo a exposição uniforme da amostra ao calor e ao fluxo de ar. No final, o ligante envelhecido é coletado e submetido novamente aos ensaios de ductilidade e penetração, permitindo avaliar as alterações em suas propriedades (ASTM D2872/2022).

Figura 15: Ensaio RTFOT.



a) Amostras



b) Forno

Fonte: Próprio autor.

4.3 Envelhecimento

O processo de envelhecimento do ligante consiste principalmente na perda de seus componentes mais voláteis, os maltenos, levando a um aumento na viscosidade e na rigidez desse material. Possivelmente, o envelhecimento é um dos fatores mais importantes que afetam o ligante, uma vez que, devido a essas mudanças na estrutura coloidal, a mistura asfáltica também é afetada e várias patologias podem aparecer no revestimento de pavimentos flexíveis, como a desagregação de partículas, maior probabilidade de fratura por fadiga, aumento na probabilidade de fissuração térmica associada à maior rigidez do ligante, entre outras (TAUSTE et al., 2018).

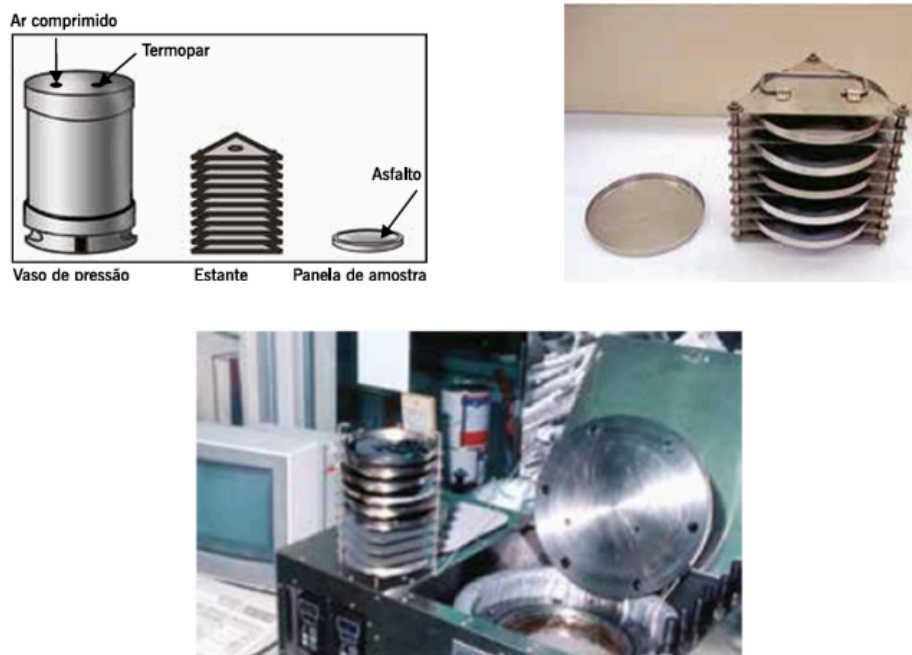
O envelhecimento do ligante asfáltico ocorre tanto na fase de construção quanto ao longo da vida de serviço do pavimento. A primeira etapa, denominada envelhecimento de curto prazo, manifesta-se de forma acelerada durante a produção das misturas asfálticas, em decorrência das elevadas temperaturas que promovem a volatilização de frações mais leves, resultando no enrijecimento do material. A segunda etapa, conhecida como envelhecimento de longo prazo, ocorre durante a vida útil do pavimento, quando a superfície é continuamente exposta a fatores ambientais ao longo do tempo, provocando graus variáveis de enrijecimento em função das condições específicas a que está submetida. O envelhecimento de curto prazo é influenciado por aspectos operacionais, como o tipo de usina utilizada, as condições de mistura e o período de estocagem. Por sua vez, o envelhecimento de longo prazo está sempre associado às condições ambientais em campo, incluindo variações de temperatura, incidência de radiação ultravioleta e a ação de agentes atmosféricos ao longo do tempo (ABOUELSAAD et al., 2024).

Em relação ao envelhecimento de longo prazo, também chamado de envelhecimento oxidativo irreversível, o oxigênio se difunde no asfalto e reage com suas estruturas moleculares, gerando compostos de elevada polaridade por meio de reações de oxidação, desidrogenação, condensação e polimerização (HU et al., 2022). Os principais grupos funcionais formados durante o envelhecimento incluem sulfóxidos (S=O) e carbonilas (C=O), que promovem a formação de moléculas maiores e mais complexas, responsáveis pelo aumento contínuo do teor de asfaltenos ao longo do tempo, elevando a viscosidade e tornando o ligante mais rígido e frágil (YAO et al., 2015). Além disso, análises espectroscópicas por FTIR demonstram que as bandas de absorção por volta de 2920 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} correspondem, respectivamente, às vibrações de estiramento assimétrico e simétrico dos

grupos metileno (CH_2) e metil (CH_3), enquanto as bandas em 1456 cm^{-1} e 1375 cm^{-1} estão associadas às vibrações de deformação desses mesmos grupos, logo, a estabilidade dessas bandas após a oxidação indica a integridade molecular do ligante durante o processo de envelhecimento (LI e YANG, 2020).

Como mencionado anteriormente, o ensaio utilizado para simular o envelhecimento de curto prazo é o RTFOT. Já para a simulação do envelhecimento de longo prazo, emprega-se o método *Pressurized Aging Vessel* (PAV). Nesse ensaio, o ligante previamente envelhecido em RTFOT é distribuído em bandejas de aço inoxidável, formando uma película delgada de aproximadamente 3,2 mm de espessura, a fim de maximizar a área de contato com o ar. Em seguida, as bandejas são posicionadas em suportes específicos no interior do vaso de pressão, que é hermeticamente selado. O equipamento consiste em uma câmara pressurizada e aquecida, capaz de manter uma pressão constante de 2,1 MPa combinada a uma temperatura controlada entre $90\text{ }^\circ\text{C}$ e $110\text{ }^\circ\text{C}$. O ensaio é conduzido durante 20 horas, período padronizado que acelera os mecanismos oxidativos característicos do envelhecimento em campo. No final, o PAV é resfriado e despressurizado de forma controlada, e o ligante envelhecido é coletado para caracterização (ASTM D 6521/2008).

Figura 16: Ensaio PAV.



Fonte: Adaptado de Bernucci et al., 2022.

O fenômeno de envelhecimento dos ligantes asfálticos apresenta distinções em campo e laboratório. Em condições reais, ligantes recuperados da camada de revestimento frequentemente exibem maior endurecimento do que o previsto por protocolos laboratoriais, os quais, apesar de empregarem métodos padronizados como o PAV, podem gerar efeitos artificiais devido às altas temperaturas, pressões e ausência de agregados e cargas de tráfego. Além disso, o envelhecimento é fortemente influenciado por fatores estruturais das misturas como o teor de vazios, sendo mais pronunciado em misturas menos densas, ou seja, elevado volume de vazios, enquanto misturas mais densas envelhecem mais lentamente. Ademais, o envelhecimento trata-se de um fenômeno não homogêneo, concentrando-se nas camadas superficiais e reduzindo-se em profundidade. Recentemente, consolidou-se a prática de cortar corpos de prova do revestimento asfáltico em finas fatias horizontais para analisar separadamente o ligante em diferentes porções (SOENEN et al., 2021).

4.3.1 Principais parâmetros de avaliação química e reológica em ligantes envelhecidos

O envelhecimento altera as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos, promovendo o endurecimento do material e, conseqüentemente, a fragilização e a redução da vida útil dos pavimentos. Por isso, compreender as mudanças na reologia e na estrutura dos ligantes em diferentes condições de envelhecimento é fundamental para o desenvolvimento de materiais mais duráveis e com melhor desempenho em campo (QIN et al., 2013).

Reologia, termo cunhado no ano de 1920 pelo professor Eugene C. Bingham, do *Lafayette College* (EUA), refere-se ao estudo dos fenômenos de deformação e escoamento da matéria, abrangendo uma ampla gama de materiais. Oficialmente reconhecida com a criação da *American Society of Rheology* em 1929, a área consolidou-se por meio de estudos sobre materiais importantes para a indústria, como asfaltos, lubrificantes, tintas, plásticos e borrachas, destacando sua interdisciplinaridade e relevância científica. (BARNES et al., 1989). No contexto dos ligantes asfálticos, a caracterização reológica tornou-se uma ferramenta essencial para compreender o impacto do envelhecimento e otimizar o desempenho dos pavimentos. A maior parte das pesquisas concentra-se no uso do módulo complexo (G^*) como parâmetro principal de análise, uma vez que esse indicador reflete, de forma aproximada, a rigidez do ligante, permitindo prever seu comportamento em serviço e apoiar o desenvolvimento de especificações técnicas (ZHANG et al., 2018).

4.3.1.1 Módulo complexo (G^*)

O módulo complexo de cisalhamento (G^*) é uma grandeza fundamental para caracterizar o comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos. Ele estabelece a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação resultante em um material viscoelástico submetido a carregamento oscilatório. O módulo é definido como um número complexo, composto por uma parte real e uma parte imaginária, representadas, respectivamente, pelo módulo de armazenamento (G'), associado à energia elástica armazenada, e pelo módulo de perda (G''), relacionado à energia dissipada (DNIT 448-ME/2024; SHELL, 2015). A expressão matemática é:

$$G^* = G' + i.G'' \quad (2)$$

Sendo:

$$G' = |G^*|. \cos(\delta) \quad (3)$$

$$G'' = |G^*|. \sin(\delta) \quad (4)$$

Onde:

G^* - Módulo complexo;

G' - Módulo de armazenamento;

G'' - Módulo de perda;

δ - Ângulo de fase.

Essa decomposição permite avaliar a capacidade do ligante de resistir à deformação sob solicitação repetida e compreender sua resposta mecânica em diferentes temperaturas e frequências.

4.3.1.1 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Além das propriedades apresentadas anteriormente, o FTIR também é utilizado para analisar o envelhecimento, pois permite monitorar grupos funcionais que atuam como marcadores da oxidação. Assim como nas demais técnicas espectroscópicas, seu princípio baseia-se na interação da radiação infravermelha com a matéria, que ocorre por meio do acoplamento entre o campo elétrico oscilante das vibrações moleculares e a radiação incidente. A região espectral de maior interesse localiza-se entre 4000 e 400 cm^{-1} , faixa em que as bandas de absorção revelam componentes e estruturas moleculares específicas de cada grupo funcional. Essa identificação é possível porque a frequência de absorção varia de acordo com a natureza dos grupos químicos, de suas massas molares e da intensidade das

ligações atômicas. O funcionamento da técnica consiste na incidência de radiação infravermelha sobre a amostra, parte da qual é absorvida e parte transmitida, gerando um espectro característico de cada grupo funcional presente no material (BERNUCCI et al., 2022).

4.4 Concreto asfáltico

De acordo com a norma DNIT 031/2024 - ME, o Concreto Asfáltico é uma mistura, caracterizada por uma distribuição granulométrica, produzida, lançada e compactada, geralmente, a quente. Essa mistura é composta por Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e agregados minerais. É utilizada, tradicionalmente, na camada de revestimento de pavimentos a fim de obter maior resistência e durabilidade.

Figura 17: Mistura Asfáltica.



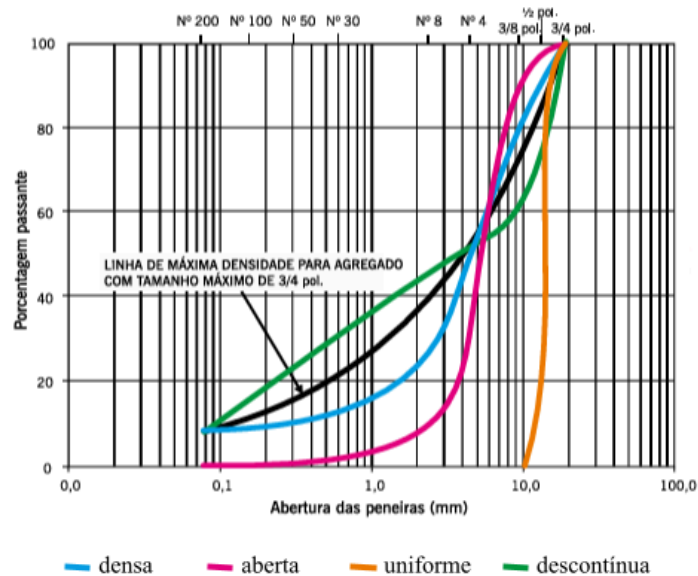
fonte:Próprio autor.

As misturas asfálticas a quente podem ser classificadas em diferentes grupos de acordo com a granulometria dos agregados. Os quatro tipos mais comuns são (BERNUCCI et al., 2022):

- **Densa:** apresenta curva granulométrica contínua e bem graduada, formando um esqueleto mineral com reduzido volume de vazios, uma vez que as partículas menores preenchem os espaços deixados pelas maiores.
- **Aberta:** também apresenta uma curva granulométrica contínua e bem graduada, no entanto, não possui material fino ($< 0,075$ mm) para preencher os vazios existentes.
- **Uniforme:** caracteriza-se por curva granulométrica uniforme, composta predominantemente por agregados de dimensões semelhantes. Essa configuração gera um esqueleto mineral com elevada porosidade, permitindo a percolação de água no interior da mistura e conferindo-lhe caráter drenante.
- **Descontínua:** possui curva granulométrica marcada pela predominância de partículas graúdas em relação às intermediárias, complementadas por uma fração de finos. Essa

descontinuidade granulométrica resulta em menor presença ou ausência de determinadas faixas de peneiras, favorecendo a formação de um esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente, devido ao maior número de contatos entre os agregados de maiores dimensões.

Gráfico 01: Curvas granulométricas.



Fonte: Adaptado de Bernucci et al., 2022.

4.4.1 Agregados

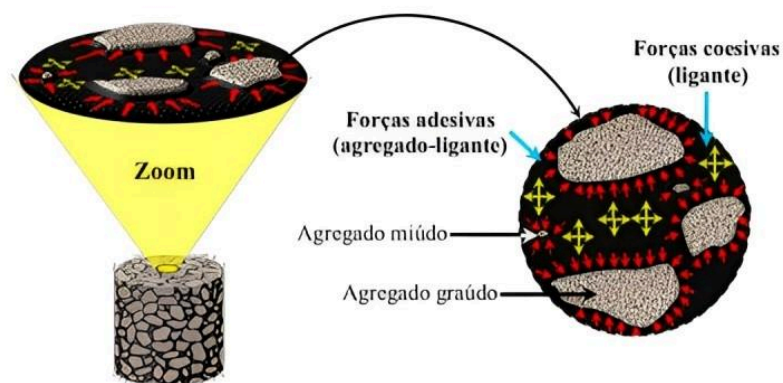
O agregado pode ser definido como um material particulado, incoesivo e de reatividade química praticamente nula, formado por misturas de partículas que abrangem uma ampla faixa de tamanhos. Sua classificação pode ser realizada segundo diferentes critérios, como a origem, a dimensão das partículas e o peso específico aparente. Quanto à origem, distinguem-se os agregados naturais, encontrados diretamente na natureza em estado particulado, como areia e cascalho, e os agregados industrializados, cuja fragmentação é obtida por meio de processos industriais. Em relação às dimensões das partículas, os agregados são categorizados em miúdos ou graúdos, a depender do diâmetro predominante. Já de acordo com o peso específico aparente, a classificação baseia-se na densidade do material constituinte, sendo considerados leves, médios ou pesados, o que permite a adequada seleção para diferentes aplicações em engenharia civil (BAUER, 2000).

4.4.2 Adesividade Ligante-Agregado

Os minerais que compõem os agregados possuem átomos organizados em uma rede cristalina, cuja superfície apresenta capacidade de atrair átomos ou moléculas de gases, líquidos ou sólidos em contato, promovendo processos de adsorção química. Essa adsorção constitui o principal mecanismo de adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2022).

A natureza mineralógica do agregado exerce influência direta nessa interação, visto que agregados de caráter ácido ou eletronegativo, ricos em sílica, apresentam comportamento hidrofílico. Já agregados mais básicos, por possuírem baixo teor de sílica, mostram-se mais resistentes ao descolamento da película asfáltica, uma vez que estabelecem ligações covalentes entre o cálcio presente em sua superfície e os constituintes do asfalto. Nesse sentido, agregados com alto teor de sílica tendem a atrair preferencialmente moléculas de água, altamente polares, em detrimento das moléculas do ligante asfáltico, predominantemente apolares. No contexto das misturas asfálticas, o mecanismo de ligação entre agregado e ligante é regido por duas interações fundamentais: a adesão, relacionada ao estabelecimento de ligações físico-químicas entre a película de ligante e a superfície do agregado; e a coesão, associada à resistência das ligações intermoleculares e interatômicas presentes no próprio ligante. Entre as forças de interação predominantes na interface ligante-agregado destacam-se as interações íon-dipolo, as forças de Van der Waals e as ligações covalentes, as quais, em conjunto, condicionam a durabilidade e o desempenho mecânico da mistura (JÚNIOR, 2018).

Figura 18: Forças atuantes na interface ligante-agregado.



Fonte: Adaptado de Júnior, 2018.

4.4.3 Principais propriedades mecânicas estudadas neste trabalho para as Misturas Asfálticas

4.4.3.1 Resistência à tração (RT)

A resistência à tração (RT) é obtida pelo ensaio de compressão diametral, o qual consiste na aplicação de um carregamento crescente até a ruptura completa ao longo do plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico. Este parâmetro expressa a capacidade do material em resistir a esforços de tração e está diretamente associado à coesão interna da mistura e à qualidade do ligante e dos agregados. O ensaio utiliza corpos de prova moldados em laboratório ou extraídos da rodovia, posicionados entre frisos metálicos e submetidos a uma prensa mecânica com controle preciso de deslocamento e carga aplicada (DNIT 136, 2018). A resistência é calculada pela expressão:

$$\sigma_R = \frac{2.F}{\pi.D.h} \quad (5)$$

Onde:

σ_R - Resistência à tração (MPa);

F - Carga de ruptura (N);

D - Diâmetro (mm);

h - Altura do corpo de prova (mm).

Isolando a carga de ruptura F da Equação 5, é possível determinar as cargas cíclicas empregadas nos demais ensaios mecânicos abordados, sendo essas, cargas com magnitude menor que a de F , visto que, esta é a força que romperia os corpos de prova assim que fosse submetida.

$$F = \frac{\sigma.\pi.D.h}{2} \quad (6)$$

4.4.3.2 Fadiga

A fadiga é caracterizada pela redução progressiva da resistência de um material submetido a carregamentos repetidos, sendo a vida de fadiga definida pelo número total de ciclos de carga necessários para provocar a ruptura do corpo de prova em condições

controladas de ensaio. Esse parâmetro é determinado experimentalmente por meio do ensaio de compressão diametral à tensão controlada, no qual corpos de prova cilíndricos são submetidos a pulsos de carga verticais cíclicos que induzem tensões de tração no plano diametral horizontal (DNIT 183/2018-ME).

4.4.3.3 Módulo de resiliência (MR)

O módulo de resiliência (MR) é definido como o módulo elástico obtido sob condições de carregamento repetido, representando a relação entre a tensão aplicada e a deformação recuperável de uma mistura asfáltica. O MR expressa a capacidade do concreto asfáltico de recuperar sua forma original após a aplicação de uma carga transitória, sendo, portanto, um parâmetro de deformabilidade elástica fundamental no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos flexíveis. O ensaio típico para determinação do módulo de resiliência utiliza corpos de prova cilíndricos submetidos a carregamentos repetidos, geralmente na forma de pulsos, havendo um intervalo de repouso entre aplicações. A resposta resiliente da mistura é então registrada por meio de transdutores de deslocamento, e o módulo é calculado considerando a relação entre a tensão diametral e a deformação elástica recuperada. O valor de MR é influenciado por fatores como temperatura, frequência de carregamento, teor de ligante, granulometria e estrutura interna da mistura (DNIT 135/2018 – ME; PINTO e PREUSSLER, 1980).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

O trecho analisado pertence à rodovia CE-060, e apresenta extensão de 37,94 km em cada sentido, totalizando 75,88 km de pavimento. Conforme informações do projeto executivo, a estrutura do pavimento é constituída por uma camada de revestimento asfáltico em Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) com espessura de 65 mm, assentada sobre uma base granular de 150 mm de espessura, enquanto a espessura da sub-base apresenta variações ao longo do traçado, em função das condições geotécnicas locais e das soluções de engenharia adotadas para adequação estrutural dessa via.

Para a realização dos ensaios laboratoriais, foram extraídos corpos de prova (CP) do revestimento asfáltico em três diferentes janelas de inspeção. Na primeira janela foram coletados 17 corpos de prova e nas demais foram coletados 9, totalizando 35 amostras de

CBUQ.. No processo de extração, buscou-se que cada corpo de prova apresentasse altura próxima à espessura de projeto da camada de revestimento, ou seja, aproximadamente 65 mm, enquanto o diâmetro foi mantido em torno de 100 mm, conforme a Tabela 02, garantindo a adequada acomodação nos equipamentos utilizados para os ensaios mecânicos.

Tabela 02: Dimensões dos corpos de prova extraídos.

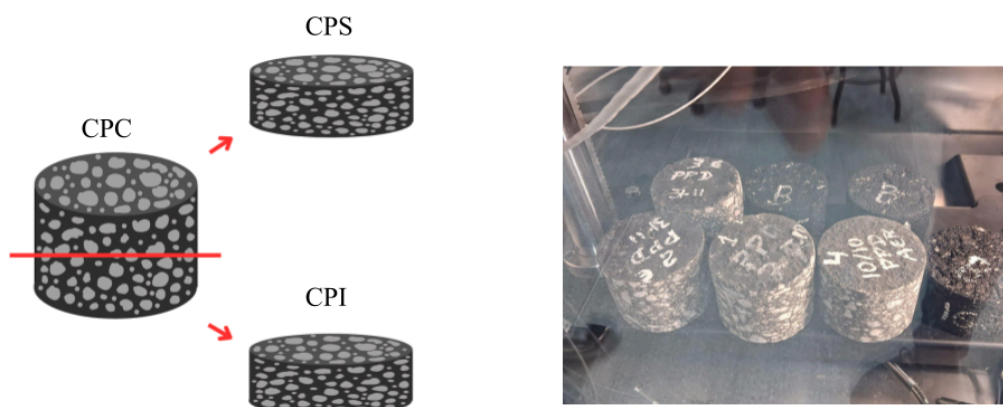
JANELA 1		Média de altura (mm):				75,12	Média de diâmetro (mm):		99,64
		Coeficiente de Variação:				5%	Coeficiente de Variação:		1%
CP's:	h 1 (mm)	h 2 (mm)	h 3 (mm)	h 4 (mm)	h_média (mm)	D 1 (mm)	D 2 (mm)	D_médio (mm)	
CP_1-1	73,9	75,8	74,9	73,5	74,53	99,5	99,9	99,7	
CP_1-2	70,6	70,2	70,7	70,9	70,6	100,5	100,4	100,45	
CP_1-3	70,6	69,5	69,5	70,3	69,98	100,5	100,2	100,35	
CP_1-4	77,9	78,7	78,6	78,3	78,38	99,9	99,6	99,75	
CP_1-5	71	72,2	72	71,5	71,68	100,8	100,1	100,45	
CP_1-6	78,8	78,9	79,8	79,3	79,2	99,5	100,4	99,95	
CP_1-7	78,6	77,4	78,5	78,8	78,33	100	99,4	99,7	
CP_1-8	74,6	74,7	74,1	74,2	74,4	99,8	99,6	99,7	
CP_1-9	63,9	64,6	65,1	65	64,65	100,2	100,6	100,4	
CP_1-10	76,6	77,7	75,8	76,5	76,65	99,6	99,6	99,6	
CP_1-11	75,02	74,41	75,79	75,03	75,06	99,48	99,37	99,43	
CP_1-12	76,88	77,08	76,69	76,98	76,91	99,52	98,42	98,97	
CP_1-13	77,49	79,08	78,53	76,33	77,86	99,28	99,82	99,55	
CP_1-14	76,79	79,21	78,99	77,81	78,2	99,14	98,44	98,79	
CP_1-15	77,12	76,61	76,29	77,85	76,97	97,31	98,63	97,97	
CP_1-16	75,19	75,22	74,83	75,14	75,1	99,52	99,22	99,37	
CP_1-17	78,49	78,99	78,94	77,67	78,52	99,72	99,69	99,71	
JANELA 2		Média de altura (mm):				67,72	Média de diâmetro (mm):		100,97
		Coeficiente de Variação:				2%	Coeficiente de Variação:		1%
CP's:	h 1 (mm)	h 2 (mm)	h 3 (mm)	h 4 (mm)	h_média (mm)	D 1 (mm)	D 2 (mm)	D_médio (mm)	
CP_2-1	66,6	67	66,4	67,4	66,85	100,9	101,3	101,1	
CP_2-2	68,8	69,3	68,8	68,3	68,8	99,9	99,8	99,85	
CP_2-3	67	66,9	67,8	68	67,43	101	102,1	101,55	

CP_2-4	67,9	68	68,3	67,8	68	101,4	101,2	101,3
CP_2-5	70,2	69,6	69,2	70,1	69,78	101,4	101,1	101,25
CP_2-6	66	65,5	66	66,9	66,1	100,7	100,2	100,45
CP_2-7	68,7	68,9	69,1	69	68,93	101	100,9	100,95
CP_2-8	65,6	65,9	65,3	65,5	65,58	101,4	101,1	101,25
CP_2-9	67,8	67,9	68	68,4	68,03	100,9	101,2	101,05
JANELA 3			Média de altura (mm):		67,91	Média de diâmetro (mm):		101,5
			Coefficiente de Variação:		2%	Coefficiente de Variação:		0,30%
CP's:	h 1 (mm)	h 2 (mm)	h 3 (mm)	h 4 (mm)	h_média (mm)	D 1 (mm)	D 2 (mm)	D_médio (mm)
CP_3-1	64,7	65,9	64,6	66,1	65,33	101,4	101,2	101,3
CP_3-2	67,9	67,4	67,2	67,1	67,4	101,6	101,1	101,35
CP_3-3	68,8	68,2	67,1	67,4	67,88	101,8	101	101,4
CP_3-4	66,5	66,1	66,6	67,6	66,7	101,7	101,2	101,45
CP_3-5	70,9	71,1	68,5	67,8	69,58	101,2	102,1	101,65
CP_3-6	68,2	68,5	68,1	67,7	68,13	101,6	101,4	101,5
CP_3-7	69,2	68,9	69,6	68,9	69,15	101,1	101,8	101,45
CP_3-8	67,1	67,8	67,5	67,8	67,55	101,9	102,3	102,1
CP_3-9	69,5	69,9	69,9	68,8	69,53	100,9	101,4	101,15

Fonte: Próprio autor.

Além disso, dois corpos de prova completo (CPC) foram seccionados ao meio na direção de sua seção circular, como demonstrado pela Figura 19, procedimento que possibilitou a obtenção de outros dois tipos corpos de prova: o da porção superior (CPS) e o da porção inferior (CPI), cujas dimensões são mostradas na Tabela 03. Essa divisão permitiu a análise diferenciada das características do material, distinguindo-se a região mais exposta às condições ambientais, da região interna do revestimento, menos suscetível às ações diretas de envelhecimento e degradação.

Figura 19: Corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 03: Dimensões dos corpos de prova seccionados.

CP's SECCIONADOS			Média de altura (mm):		36,71	Média de diâmetro (mm):		99,5
			Coeficiente de Variação:		5%	Coeficiente de Variação:		0,20%
CP's:	h 1 (mm)	h 2 (mm)	h 3 (mm)	h 4 (mm)	h_média (mm)	D 1 (mm)	D 2 (mm)	D_médio (mm)
CPS_1-14	34,05	33,81	33,96	34,02	33,96	99,57	99,84	99,71
CPI_1-14	40,12	40,02	39,92	39,85	39,98	99,68	99,53	99,61
CPS_1-15	33,01	33,85	33,98	33,68	33,63	99,46	99,3	99,38
CPI_1-15	40,33	39,14	38,95	38,73	39,29	99,2	99,24	99,22

Fonte: Próprio autor.

5.2 Métodos

Todos os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos. Posteriormente, procedeu-se à extração do ligante asfáltico presente em uma amostra completa (CPC), bem como nas seções correspondentes à parte superior (CPS) e à parte inferior (CPI). Esse procedimento teve como finalidade a realização de ensaios reológicos, os quais permitem investigar as alterações nas características viscoelásticas do ligante e compreender de forma mais aprofundada os efeitos do envelhecimento e das condições de serviço sobre o material asfáltico.

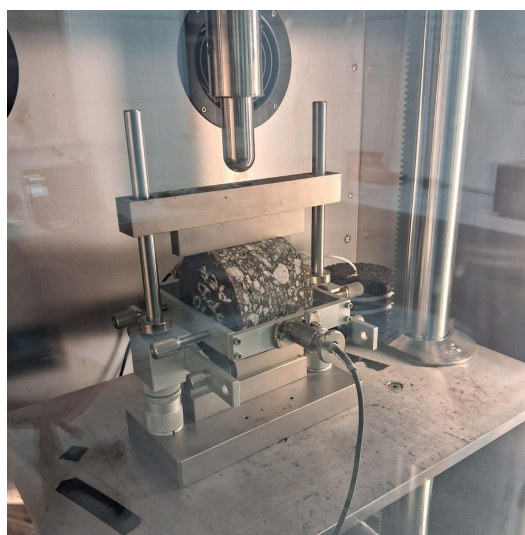
5.2.1 Ensaios mecânicos

5.2.1.1 Resistência à tração (RT)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi conduzido em conformidade com a norma DNIT 136/2018 – ME com um total de 9 amostras, sendo 3 amostras por janela de extração. Inicialmente, cada corpo de prova teve sua altura e diâmetro medidos com auxílio de paquímetro em quatro posições distintas e equidistantes, adotando-se, em ambos os casos, a média aritmética das leituras. Em seguida, os corpos de prova foram acondicionados em compartimento climatizado à temperatura de $25 \pm 0,5$ °C, por um período de quatro horas, de modo a assegurar a estabilização térmica necessária antes da execução do ensaio.

Após esse período, cada corpo de prova foi devidamente posicionado no dispositivo centralizador da prensa, de forma que sua superfície cilíndrica ficasse apoiada entre os frisos metálicos. Na sequência, iniciou-se a aplicação da carga vertical de compressão, a qual foi imposta progressivamente, a uma velocidade de deformação controlada de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até a ocorrência da ruptura completa do corpo de prova, caracterizada pela separação das suas duas metades ao longo do plano diametral vertical. Com o valor da carga de ruptura médio calculou-se a resistência à tração indireta média dos corpos de prova, utilizando-se a equação 5 (seção 4.5.3.1)

Figura 20: Ensaio RT.



Fonte: próprio autor.

5.2.1.2 Módulo de resiliência (MR)

Com base nos valores obtidos no ensaio de Resistência à Tração, foi iniciado o ensaio de Módulo de Resiliência, seguindo os procedimentos estabelecidos pela Norma DNIT 135/2018 – ME. O ensaio foi realizado com 8 amostras completas, 1 amostra da porção superior e 1 amostra da porção inferior. Inicialmente, os corpos de prova foram submetidos a condicionamento térmico em câmara climatizada à temperatura de $25 \pm 0,5$ °C por, no mínimo, quatro horas, assegurando a estabilização das condições de ensaio. Em seguida, cada corpo de prova foi devidamente posicionado e centralizado entre os frisos metálicos do dispositivo de carregamento, já equipados com sensores de deslocamento (LVDTs), acoplados de forma a registrar os deslocamentos horizontais e verticais. Após verificação da calibração dos sistemas de aquisição de dados, procedeu-se ao condicionamento inicial das amostras mediante a aplicação de 50 ciclos de carga repetida, garantindo a acomodação do material e a regularidade dos registros.

Concluída essa etapa, o ensaio foi realizado mediante aplicação de cargas cíclicas, cuja magnitude correspondeu a valores de 20% da carga de ruptura média para os corpos de prova completos (CPC) e de 10% para as porção superior (CPS) e inferior (CPI). Cada ciclo teve duração de 1 s, composto por um pulso de carregamento de 0,1 s seguido de 0,9 s de repouso. Após os 50 ciclos de pré-condicionamento, foram aplicados conjuntos de 15 ciclos adicionais, em três níveis progressivos de carga, acrescidos sequencialmente em 5% da carga inicial, registrando-se continuamente os deslocamentos e as tensões geradas. O módulo de resiliência foi determinado pela relação entre a tensão de tração horizontal e a deformação resiliente correspondente, considerando os últimos cinco ciclos de cada sequência, de modo a eliminar variações transitórias. Por fim, os valores médios de MR dos corpos de prova completos (CPC), bem como da porção superior (CPS) e inferior (CPI), foram utilizados para comparação da rigidez de cada uma das amostras para determinar qual sofreu maior influência do envelhecimento.

Figura 21: Ensaio MR.



Fonte: próprio autor.

5.2.1.3 Fadiga

O ensaio de fadiga foi conduzido em conformidade com a Norma DNIT 183/2018 – ME, tendo como objetivo principal avaliar o decaimento progressivo da resistência dos materiais asfálticos ao longo de sucessivos ciclos de carregamento. Para isso, uma amostra de cada porção, CPC, CPS e CPI, foi posicionada no mesmo dispositivo de compressão diametral do ensaio de resistência à tração, entre os frisos superior e inferior, de modo a garantir o correto alinhamento diametral vertical. Em seguida, aplicou-se uma tensão cíclica constante de 575 kPa, sendo cada ciclo constituído por 0,1 s de carregamento e 0,9 s de repouso. O ensaio foi mantido até a ocorrência da ruptura por fadiga das amostras (cerca de 40% de área fissurada), momento em que se definiu a vida de fadiga (N_f), correspondente ao número total de ciclos de carregamento suportados até o limite definido.

5.2.2 Extração e recuperação dos ligantes asfálticos

Para a determinação das propriedades reológicas, o ligante asfáltico foi recuperado a partir dos corpos de prova por meio de extração com solvente, em conformidade com a norma ASTM D2172/2010. Para isso, uma amostra de cada porção, CPC, CPS e CPI foram colocadas em estufa para aquecer a mistura tornando possível destorroar, em seguida foram colocadas em cartuchos de papel e pesadas. Ademais, as amostras foram submetidas ao sistema *Soxhlet*, utilizando-se tricloroetileno como solvente. Durante o processo, o solvente em refluxo promoveu sucessivas lavagens da amostra, até que a solução resultante

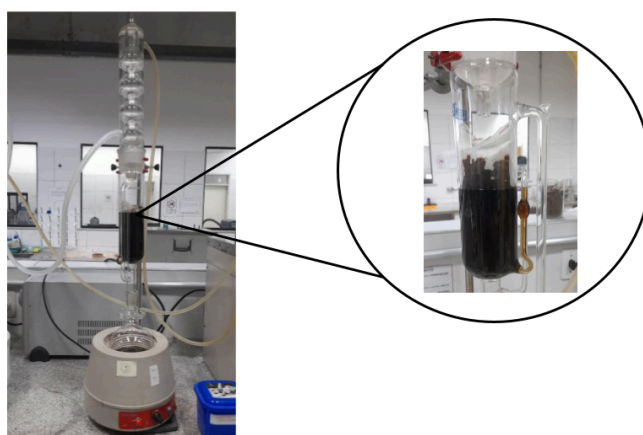
apresentasse coloração clara, condição que assegura a completa solubilização dos ligantes. Após a extração, os agregados residuais foram retirados por meio de rotação em uma centrífuga de alta velocidade enquanto o extrato líquido contendo os ligantes dissolvidos foram coletados para a etapa de recuperação.

Figura 22: Preparação de amostras.



Fonte: próprio autor.

Figura 23: Extração via *Soxhlet*.



Fonte: próprio autor.

A recuperação dos ligantes foi conduzida pelo Método *Abson*, conforme a norma ASTM D1856/2021. Nessa etapa, o extrato ligante-solvente foi submetido a destilação controlada em aparelho específico, sob aquecimento moderado, de modo a remover a maior parte do solvente. Na sequência, introduziu-se gás carbônico (CO_2) no sistema com o objetivo de eliminar traços residuais de solvente, prevenindo reações oxidativas indesejadas e assegurando que as propriedades dos ligantes recuperados permanecessem representativas do material presente nas misturas originais.

Figura 24: Sistema *Abson* de recuperação

Fonte: próprio autor

Dessa forma, foi possível obter os ligantes referentes ao corpo de prova completo (LAC), à porção superior (LAS) e à porção inferior (LAI), permitindo a análise comparativa de suas características reológicas.

5.2.3 Ensaio de módulo complexo

O parâmetro (G^*) dos ligantes asfálticos extraídos foi determinado por meio de ensaio de cisalhamento dinâmico, utilizando um reômetro de placas paralelas (DSR – *Dynamic Shear Rheometer*, modelo HR-3, TA Instruments), em conformidade com a norma ASTM D7175/2015. Inicialmente, o ligante foi aquecido até atingir consistência fluida suficiente para ser vertido e moldado entre as placas metálicas do reômetro. Após o posicionamento da amostra entre as placas, o excesso de material foi cuidadosamente removido com ferramenta de corte apropriada, assegurando a uniformidade. A câmara ambiental do equipamento foi então ajustada para controlar a temperatura do ensaio com precisão de $\pm 0,1$ °C, garantindo o equilíbrio térmico antes do início das medições.

As amostras foram submetidas a carregamento oscilatório em regime de deformação controlada, no qual uma das placas aplicava movimento senoidal enquanto a outra permanecia fixa, registrando-se a resposta em termos de tensão de cisalhamento. O ensaio de varredura de frequência foi conduzido em uma faixa de temperaturas de 46 °C a 86 °C, em incrementos de 6 °C, e em frequências variando de 0,1 a 160 rad/s. Essa metodologia permitiu a obtenção das curvas mestras do módulo complexo (G^*) normalizadas para a temperatura de referência de 60 °C.

Figura 25: Reômetro.



Fonte: Próprio autor

A partir dos resultados, foi possível avaliar o comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos em diferentes condições de solicitação, fornecendo subsídios para a análise de desempenho do material em campo, especialmente no que se refere à suscetibilidade ao envelhecimento.

5.2.4 FTIR

Para complementar a caracterização dos ligantes asfálticos recuperados, procedeu-se à análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR), em conformidade com a norma ASTM E1252/1998. O objetivo foi identificar grupos funcionais e avaliar diferenças químicas entre os ligantes obtidos do corpo de prova completo (LAC), da sua porção superior (LAS) e da porção inferior (LAI).

Inicialmente, cada amostra de ligante foi misturada ao KBr que é transparente ao infravermelho, e prensada formando uma pastilha delgada e uniforme. Essa preparação assegurou que a espessura da amostra fosse suficiente para permitir absorção detectável sem causar saturação do espectro. Os espectros foram obtidos em espectrômetro FTIR operando na faixa de varredura de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução espectral mínima de 4 cm^{-1} e acúmulo de 32 varreduras por amostra, de forma a garantir boa relação sinal-ruído.

Na análise FTIR, foram avaliadas especificamente as bandas de absorção correspondentes aos grupos carbonila (C=O) e sulfóxido (S=O) a fim de calcular os respectivos índices de oxidação (equações 7 e 8). Esses índices foram determinados pela

razão entre as áreas abaixo do gráfico das bandas de absorção de C=O e S=O e as áreas combinadas dos grupos metileno (CH₂, 1460 cm⁻¹) e metil (CH₃, 1375 cm⁻¹). Essa abordagem permite o monitoramento das mudanças estruturais resultantes do processo de envelhecimento do material. Dessa forma, os resultados refletem absorções relativas e possibilitam comparações entre amostras.

$$IC_{1700} = \frac{A_{1700}}{A_{1460} + A_{1375}} \quad (7)$$

$$IS_{1030} = \frac{A_{1030}}{A_{1460} + A_{1375}} \quad (8)$$

5.2.5 Ensaios de Adesividade

A adesividade entre os ligantes asfálticos recuperados das porções superior (LAS) e inferior (LAI) do revestimento e os agregados foi avaliada por meio do ensaio *Binder Bond Strength* (BBS), conduzido em conformidade com a norma AASHTO T361/2016. Nesse procedimento, empregou-se um sistema de prensa hidráulica capaz de registrar automaticamente a resistência à tração de desprendimento, do inglês *Pull-Off Tensile Strength* (POTS), definida como a maior tensão de tração aplicada até o destacamento da interface ligante-agregado. Tal método permite quantificar a força necessária para separar o ligante do agregado, tanto em condições simuladas de umidade quanto em condições de secagem.

Para a realização dos ensaios, foi utilizado placas de rochas de diferentes naturezas a fim de avaliar a influência mineralógica na adesividade. Foram adotadas placas de rocha granítica provenientes da pedreira Yolita LTDA – Pyla e placas de rocha fonolítica oriundas da OCS Mineradora, ambas localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza, no estado do Ceará. As placas foram cortadas de modo a apresentar espessura uniforme, posteriormente polidas para garantir uma superfície plana e submetidas a limpeza em banho ultrassônico a 60 °C durante 60 minutos. Após esse processo, foram secas em estufa a 150 °C por 30 minutos, procedimento que também foi aplicado aos pinos metálicos utilizados como suporte para os ligantes.

Os ligantes LAS e LAI foram fixados nos pinos e pressionados contra as placas de rocha, estabelecendo a interface adesiva. Em seguida, as amostras foram submetidas a duas condições experimentais distintas: a condição seca, caracterizada pela cura em temperatura ambiente, e a condição úmida, obtida por meio da imersão das amostras em água a 40 °C por 24 horas, seguida de estabilização em temperatura ambiente por 1 hora. Dessa

forma, foram gerados quatro conjuntos experimentais que contemplaram a interação dos ligantes LAS e LAI com os dois tipos de agregados (granítico e fonolítico), sob ambas as condições de exposição.

Figura 26: Amostras do ensaio



a) Amostras condição seca

b) Amostras condição úmida

Fonte: próprio autor.

O ensaio de arrancamento foi então realizado registrando-se o POTS de cada amostra. O desempenho adesivo dos ligantes frente aos diferentes agregados e as diferentes condições foi avaliado de forma comparativa, sendo o efeito da presença de água analisado por meio da razão de resistência à tração úmida/seca, calculada conforme a equação 9.

$$R_{POTS} = \frac{POTS_{\text{úmido}}}{POTS_{\text{seco}}} \times 100\% \quad (9)$$

Figura 27: Ensaio de adesividade



Fonte: Próprio autor

6 RESULTADOS

6.1 Resistência à tração (RT)

A Tabela 04 apresenta os dados obtidos para resistência à tração para os CPs estudados. Observa-se nesta que os valores médios de resistência à tração (RT) por janela de extração variaram entre 1,31 MPa e 1,52 MPa, apresentando um valor médio geral de 1,44 MPa. Valor este, que foi usado como base para definir a carga cíclica utilizada nos demais ensaios mecânicos.

Tabela 04: Valores de RT por janela de extração.

ENSAIO RT:			RT:	1,44 MPa	Desvio Padrão:	8%
CP'S:	h_média (mm)	D_médio (mm)	F (N)	RT (MPa)	Variação p/janela	RT-p/janela
CP_3-1	65,33	101,3	12635	1,216	7%	1,31 MPa
CP_3-2	67,4	101,35	14833	1,382		
CP_3-4	66,7	101,45	14225	1,338		
CP_2-2	68,8	99,85	16510	1,530	3%	1,48 MPa
CP_2-1	66,85	101,1	15461	1,456		
CP_2-9	68,03	101,05	15598	1,445		
CP_1-2	70,6	100,45	17099	1,535	3%	1,52 MPa
CP_1-3	69,98	100,35	16157	1,465		
CP_1-9	64,65	100,4	15902	1,560		

Fonte: Próprio autor.

6.2 Módulo de resiliência (MR)

A Tabela 05 a seguir sintetiza os resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência, evidenciando os principais parâmetros deste ensaio, que serviram de base para discussão deste tópico, especialmente a respeito da comparação dos módulos dos corpos de prova completo com os corpos de prova superior e inferior, a fim de avaliar a possível diferença de rigidez destas porções.

Tabela 05: Resultados do ensaio de MR.

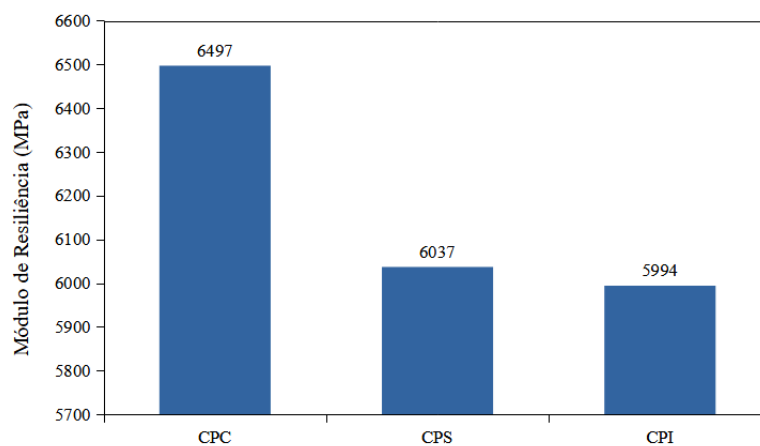
ENSAIO MR:	RT:	1,44 MPa	MR:	6497 MPa
------------	-----	----------	-----	----------

Janela 01				Coeficiente de Variação:		4%
CP's:	h_média (mm)	D_médio (mm)	NÍVEL D/TENSÃO	CARGA CÍCLIA (N)	MR's (MPa):	MR médio
CP_1-4	78,38	99,75	20%	3528	6741	6492 MPa
CP_1-6	79,2	99,95	20%	3572	6181	
CP_1-7	78,33	99,7	20%	3524	6556	
Janela 02				Coeficiente de Variação:		2%
CP's:	h_média (mm)	D_médio (mm)	NÍVEL D/TENSÃO	CARGA CÍCLIA (N)	MR's (MPa):	MR médio
CP_2-4	68	101,3	20%	3108	7078	6916 MPa
CP_2-5	69,78	101,25	20%	3188	6787	
CP_2-6	66,1	100,45	20%	2996	6883	
Janela 03				Coeficiente de Variação:		4%
CP's:	h_média (mm)	D_médio (mm)	NÍVEL D/TENSÃO	CARGA CÍCLIA (N)	MR's (MPa):	MR médio
CP_3-6	68,13	101,5	20%	3120	5906	6083 MPa
CP_3-9	69,53	101,15	20%	3173	6260	
Corpo de Prova Seccionado - CP_1-15				Coeficiente de Variação:		1%
CP's:	h_média (mm)	D_médio (mm)	NÍVEL D/TENSÃO	CARGA CÍCLIA (N)	MR's (MPa):	MR médio
CPS_1-15	33,63	99,38	10%	756	6037	6015 MPa
CPI_1-15	39,29	99,22	10%	881	5994	

Fonte: Próprio autor.

Analisando o Gráfico 02, observa-se que a porção superior (CPS) apresenta valor de MR ligeiramente superior (cerca de 0,71%) ao da porção inferior (CPI), indicando maior rigidez nesta região. Porém, apesar do CPS ter módulo maior que o CPI, a diferença entre os valores é pequena, indicando que a rigidez destas porções são semelhantes independente da condição de exposição aos agentes externos. Uma explicação para este comportamento pode estar relacionada às semelhanças dimensionais dos corpos de prova, uma vez que o CP original foi cortado ao meio para a obtenção das porções superior e inferior, o que pode afetar o comportamento mecânico e, conseqüentemente, o módulo de resiliência medido.

Gráfico 02: Valores de MR dos CP's.



Fonte: Próprio autor.

Por outro lado, quando se analisa o corpo de prova completo (CPC), observa-se que o valor de MR é ainda mais elevado do que o obtido para o CPS (cerca de 7,08% superior). Uma possível explicação disso também seria por conta da geometria que, quando avaliada de forma íntegra, proporciona um confinamento mais eficiente das partículas gerando maior rigidez.

6.3 Fadiga

A Tabela 06 a seguir diz respeito aos resultados do ensaio de fadiga dos corpos de prova analisados, tanto completo quanto superior e inferior, dando ênfase à vida de fadiga destes materiais, de modo a comparar essa propriedade entre as porções do revestimento asfáltico.

Tabela 06: Resultados do ensaio de fadiga.

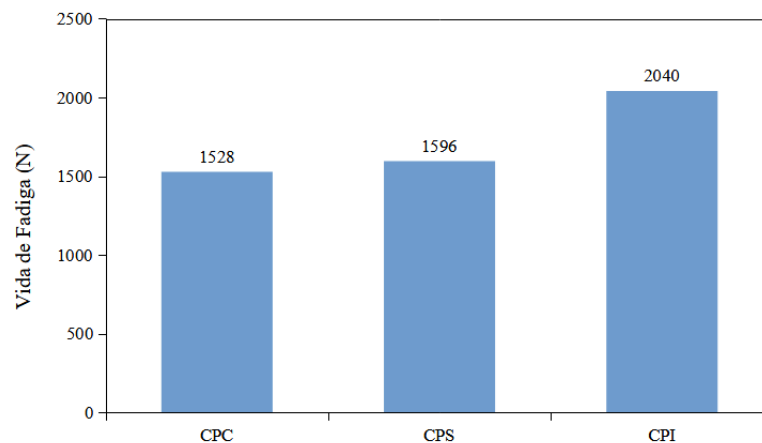
ENSAIO FADIGA:				
CP's	h_média (mm)	D_médio (mm)	Tensão Constante (KPa)	Vida de Fadiga (Nf)
CPC_3-7	69,15	101,45	575	1528
CPS_1-14	33,96	99,71	575	1596
CPI_1-14	39,98	99,61	575	2040

Fonte: Próprio autor.

Analisando os resultados apresentados no gráfico 03, que mostra a resistência do pavimento a danos progressivos causados pela passagem repetida de cargas do tráfego (cargas cíclicas), pode-se evidenciar que a porção inferior (CPI) apresentou o maior número de ciclos

até a ocorrência da ruptura por fadiga, com valores 25,09% e 21,76% superiores aos observados no corpo de prova completo (CPC) e na porção superior (CPS), respectivamente. Esses resultados sugerem que o CPI possui maior capacidade de suportar solicitações repetitivas, indicando um melhor desempenho e, conseqüentemente, maior potencial de durabilidade estrutural, certamente por sofrer menos influências das intempéries da superfície.

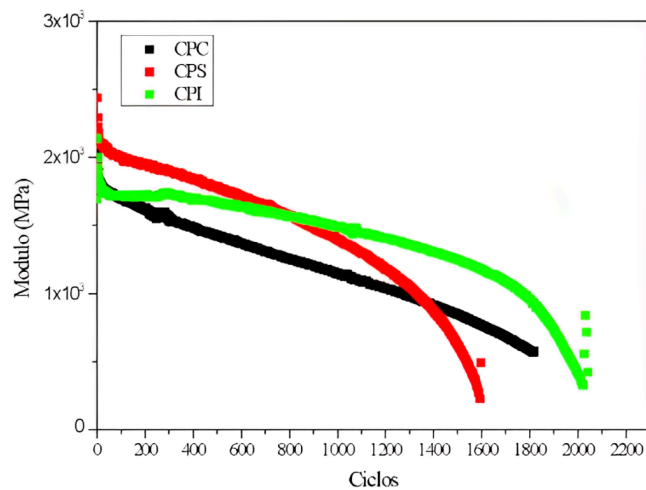
Gráfico 03: Valores de vida de fadiga (Nf) dos CP's.



Fonte: Próprio autor.

Analisando as curvas de decaimento da resistência no Gráfico 04 obtidas no ensaio de fadiga, observa-se que o CPS apresenta inicialmente os maiores valores de resistência. Entretanto, por volta do ciclo 900, ocorre uma queda abrupta da resistência dessa porção, indicando o início do processo de fadiga e o esgotamento da capacidade estrutural do material envelhecido. A partir desse ponto, o CPS apresenta valores menores de resistência em relação aos da porção inferior (CPI), cujo os valores de resistência se mantêm maiores e estáveis até o final do ensaio.

Gráfico 04: Decaimento da resistência dos CP's ao longo dos ciclos de carga.



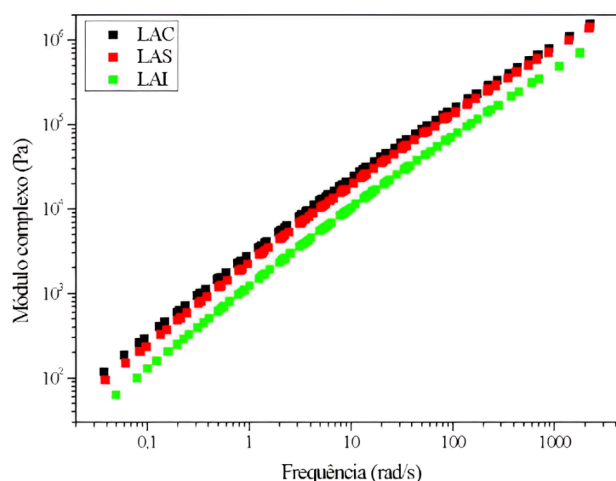
Fonte: Próprio autor.

O CPI, porção menos exposta às condições ambientais, teoricamente preserva um ligante menos envelhecido na sua mistura e, portanto, apresenta comportamento mais viscoelástico e dúctil, o que lhe confere maior durabilidade e resistência à fadiga. Sua curva de decréscimo é mais gradual, evidenciando melhor capacidade de acomodar tensões cíclicas sem perda abrupta de módulo. De maneira semelhante, o corpo de prova completo (CPC) apresenta decaimento de resistência mais gradual, porém com valores inferiores aos demais desde o início do ensaio.

6.4 Módulo complexo (G^*)

O Gráfico 5 apresenta as curvas de módulo complexo para os ligantes extraídos dos corpos de prova estudados. Analisando o Gráfico 05, nota-se que o G^* aumenta de forma consistente com a frequência, comportamento típico de materiais viscoelásticos, que se tornam mais rígidos sob altas frequências. No entanto, as diferenças dos valores de G^* entre os ligantes refletem claramente o efeito progressivo do envelhecimento sobre suas propriedades estruturais.

Gráfico 05: Curva Módulo Complexo.



Fonte: Próprio autor.

Verifica-se ainda no Gráfico 05 que, o ligante com maior G^* foi o LAC seguido do LAS e do LAI. A diferença entre o LAC e o LAS é pequena e tende a diminuir quando o módulo aumenta, indicando que o efeito envelhecimento no ligante fica mais evidente quando aumenta a carga. É importante observar que os estudos mecânicos realizados para os corpos de provas (LAC, LAS e LAI) mostraram que o LAC, apresentou valores intermediários para quantidades de ciclos acima de 1400, o que pode indicar uma possível interferência positiva do agregado na dissipação da carga, mesmo que o ligante esteja envelhecido.

Sabe-se que o envelhecimento diminui à presença de frações leves no ligante. Assim pode-se afirmar que o LAI apresenta maior proporção de componentes voláteis, o que lhe confere maior capacidade de relaxamento de tensões.

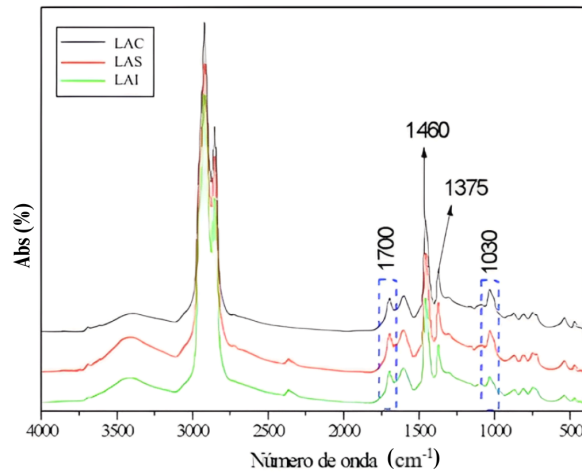
6.5 FTIR

Os espectros obtidos pelo FTIR, apresentados no Gráfico 06, mostram a presença dos grupos funcionais C=O (1700 cm^{-1}) referente a carbonila e S=O (1030 cm^{-1}) que correspondem aos sulfóxidos característico de ligantes asfálticos. Estes grupos funcionais são indicativos de processos oxidativos do ligante asfáltico as quais geram moléculas com alta polaridade e aumento da interação entre as moléculas do ligante, formando aglomerados, aumentando a viscosidade e a rigidez, tornando-o mais quebradiço e envelhecido.

É possível ainda avaliar que os picos referentes a C=O e S=O observados para o LAC e LAS são maiores que os apresentados no espectro do LAI confirmando o estudo de módulo complexo que indica que o LAI está menos envelhecido.

Não foi possível evidenciar, de forma clara, a redução dos picos referentes aos grupos funcionais de C-H (1460 cm^{-1}) e -CH (1375 cm^{-1}) os quais correspondem a redução de hidrocarbonetos pertencentes às frações mais leves do ligante.

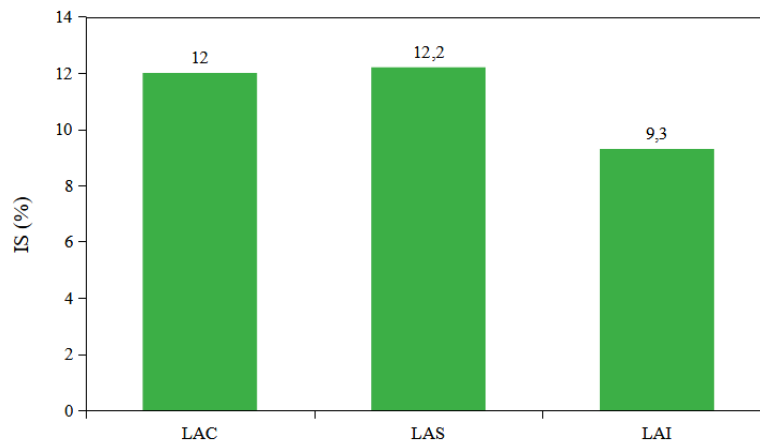
Gráfico 06: Espectros de IFTR dos LA's.



Fonte: Próprio autor.

A análise dos índices de sulfoxidação (IS) apresentados no Gráfico 07 fornece uma compreensão mais detalhada sobre o comportamento observado nos espectros do Gráfico 06. Verifica-se que os valores de IS apresentados para as amostras de LAS (12,2%) e de LAC (12%) indicam um maior envelhecimento devido à presença de grupos S=O em maior quantidade quando comparado com o LAI (9,3%) indicando ser, as duas primeiras amostras, mais envelhecida.

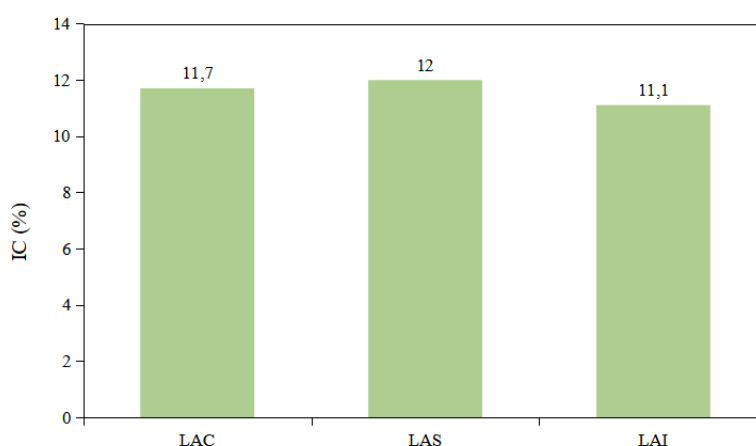
Gráfico 07: Índice de Sulfoxidação (IS)



Fonte: Próprio autor.

O índice de carbonilação (IC), mostrado no Gráfico 08, apresentou valores com pequenas diferenças entre os ligantes estudados. No entanto, é possível identificar a mesma tendência ao envelhecimento dos ligantes, sendo o LAS (12%) mais envelhecido seguido do LAC (11,7%) e do LAI (11,1%). Tal resultado está diretamente relacionado à formação de compostos oxigenados, como cetonas, ácidos carboxílicos e ésteres, provenientes da quebra e oxidação de frações mais leves, sugerindo também maior envelhecimento nesta região.

Gráfico 08: Índice de Carbonilação (IC)



Fonte: Próprio autor.

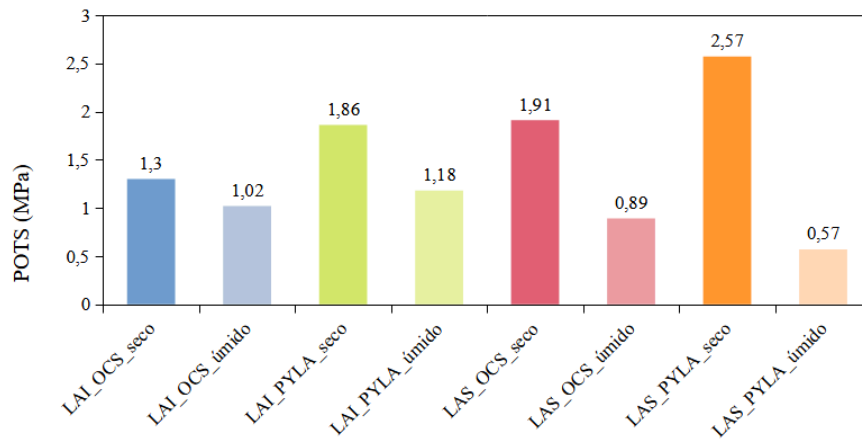
6.6 Ensaio de adesividade

Analisando o Gráfico 09, percebe-se que, em condição seca, os maiores valores de POTS ocorreram no LAS, apesar de essa porção estar mais exposta aos agentes de envelhecimento do que o LAI. Esse desempenho superior pode estar relacionado ao aumento da polaridade do ligante elevando a quantidade de grupos funcionais polares relacionados a esse fenômeno, os quais intensificam as interações físico-químicas com a superfície mineral do agregado, favorecendo a adesão inicial até certo ponto. Contudo, é importante destacar que esse benefício é temporário, pois à medida que o envelhecimento avança, o teor de asfaltenos aumenta, tornando o ligante excessivamente rígido e quebradiço, reduzindo sua capacidade de manter o contato com a superfície do agregado.

Já sob condição úmida é notório a perda de adesividade em todas as amostras, caracterizada pela redução nos valores de POTS de maneira geral, mostrando que a água afeta diretamente as forças de interação entre a interface ligante-agregado. No entanto, essa

influência se mostrou maior no LAS, o qual, de maneira completamente contrária à condição seca, obteve os menores valores de POTS em comparação com o LAI.

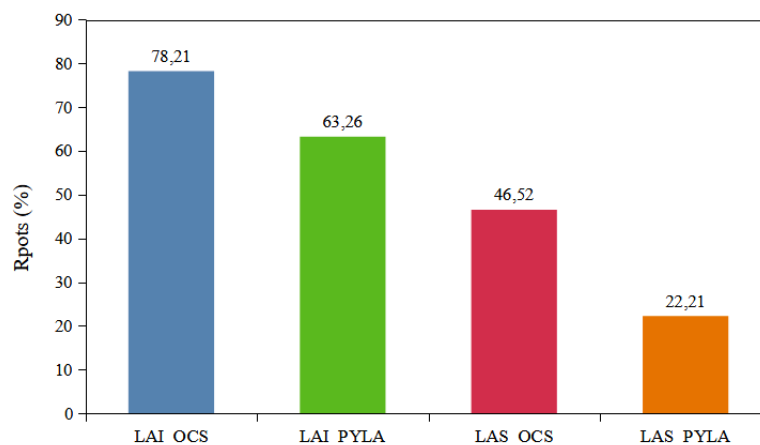
Gráfico 09: POTS das amostras



Fonte: Próprio autor.

Essa tendência é reforçada pelos valores observados no Gráfico 10 do Índice Relativo de Adesividade (Rpots). Observa-se que os maiores valores de Rpots foram obtidos para o LAI indicando que esse ligante manteve boa parte da sua adesividade mesmo após a ação da água. Em contrapartida, os menores valores foram observados no LAS evidenciando uma maior perda de adesividade em condição úmida. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior envelhecimento do LAS, que torna o ligante mais suscetível à ação da água, pois a presença de grupos funcionais polares, formados durante o envelhecimento, tende a atrair moléculas de água, facilitando o deslocamento do ligante da superfície mineral.

Gráfico 10: Rpots das amostras



Fonte: Próprio autor.

Em relação aos agregados, observou-se que, em condição seca, os maiores valores de POTS foram obtidos para o agregado PYLA (Gráfico 9), apresentando desempenho 27,54% superior ao do agregado OCS (Gráfico 9). Já sob condição úmida, o comportamento se inverte, e o agregado OCS apresentou desempenho superior (Gráfico 9), com diferença geral de 8,38%. Esse contraste evidencia que a interação entre o ligante e o agregado é fortemente influenciada pelas características mineralógicas de cada material. O agregado PYLA, de origem granítica, é constituído por minerais de caráter ácido e hidrofílico, que apresentam maior afinidade com a água em detrimento do ligante asfáltico. Essa característica explica o desempenho inferior dos valores de POTS sob condição úmida. Por outro lado, o agregado OCS, de natureza fonolítica, possui maior proporção de minerais básicos, ou seja, menos ácidos, conferindo maior resistência ao desprendimento da película ligante-agregado em presença de umidade, o que justifica o desempenho superior observado nessa condição.

7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitem compreender com maior profundidade a complexa interação entre os processos de envelhecimento do ligante asfáltico, a resposta mecânica das misturas e as características físico-químicas da interface ligante-agregado.

Em relação aos ensaios mecânicos, especialmente o MR, observou-se uma inversão não esperada entre os valores do corpo de prova completo (CPC) e da porção superior (CPS), sendo o CPC mais rígido do que o CPS. Considerando que o CPS é a camada mais exposta às intempéries e, portanto, mais suscetível ao envelhecimento, esperava-se comportamento diferente. Duas hipóteses plausíveis explicam esse resultado: a variação das janelas de extração, que reflete diferenças locais no nível de envelhecimento do revestimento, e a diferença dimensional entre o CPC e o CPS, a qual pode ter proporcionado ao CPC uma condição de confinamento mais eficiente e, conseqüentemente, maior resistência à deformação. Ainda assim, verificou-se que tanto o CPC quanto o CPS apresentaram maior rigidez em relação à porção inferior (CPI), que é a porção menos exposta, indicando que o envelhecimento atua de maneira mais pronunciada nas regiões superficiais, como esperado.

Essa tendência foi reforçada pelo ensaio reológico, o qual o módulo complexo (G^*) apresentou comportamento similar ao de MR. O ligante asfáltico completo (LAC) exibiu maior rigidez em toda a faixa de frequências, seguido pelo LAS e, por fim, pelo LAI. Isso

confirma o efeito cumulativo da oxidação sobre as propriedades viscoelásticas, em que o aumento do conteúdo de asfaltenos e a redução das frações leves elevam a rigidez do material. A aparente correspondência entre as propriedades mecânicas da mistura e as reológicas dos ligantes recuperados reforça uma correlação direta entre o comportamento macroestrutural e o microestrutural. Tal convergência representa uma contribuição importante para a engenharia de pavimentos, pois sugere que o comportamento global do revestimento pode ser previsto de forma eficiente a partir da caracterização reológica dos ligantes, reduzindo o número de amostras e o tempo de ensaio necessários.

Em nível molecular, os resultados de FTIR revelaram com grande clareza o avanço do envelhecimento. As bandas associadas aos grupos C=O e S=O apresentaram os maiores valores no LAS, evidenciado nos índices IC e IS, confirmando mais uma vez que essa amostra tende a sofrer mais o efeito oxidativo do envelhecimento. Além disso, a diferença dos espectros confirma que o envelhecimento ocorre de forma não uniforme tanto em profundidade quanto ao longo da extensão da rodovia. Essa constatação é crucial para a modelagem de desempenho de pavimentos, pois evidencia que o envelhecimento não pode ser tratado como um fenômeno homogêneo.

Por fim, os ensaios de adesividade (POTS e Rpots) revelaram que, em condição seca, os maiores valores de POTS foram no LAS com agregado de origem granítica (PYLA), sugerindo que o aumento da polaridade do ligante envelhecido favorece, inicialmente, as interações químicas com superfícies minerais ricas em silicatos. Entretanto, sob condição úmida, essa relação se inverteu: os ligantes mais envelhecidos apresentaram forte redução de adesividade, e o agregado fonolítico (OCS) mostrou melhor desempenho. Esse comportamento reflete uma dupla natureza do envelhecimento, que, embora aumente a adesividade, mesmo que de maneira inicial, também eleva sua afinidade com moléculas de água, facilitando o desprendimento da interface ligante-agregado. Assim, a perda de adesividade em meio úmido está intimamente relacionada à presença de grupos polares formados durante a oxidação, reforçando a necessidade de balancear a reatividade química do ligante com a mineralogia dos agregados empregados.

De modo geral, os resultados obtidos apontam que o envelhecimento oxidativo atua de forma heterogênea, progressiva e multifacetada, influenciando não apenas a rigidez e a durabilidade da mistura asfáltica, mas também a estabilidade da interface ligante-agregado. Do ponto de vista técnico, essas evidências fornecem subsídios para o aprimoramento dos critérios de projeto e manutenção de pavimentos, destacando a importância da escolha mineralógica e do monitoramento do envelhecimento em campo. Sob o aspecto científico, o

trabalho contribui para o entendimento integrado dos fenômenos físico-químicos e mecânicos associados ao envelhecimento asfáltico, evidenciando o valor da abordagem multiescalar — do nível molecular ao estrutural — como ferramenta para prever o desempenho e otimizar a durabilidade de revestimentos betuminosos.

REFERÊNCIAS

ABOUELSAAD, Ahmed, et al. State of the Art Review of Ageing of Bituminous Binders and Asphalt Mixtures: Ageing Simulation Techniques, Ageing Inhibitors and the Relationship between Simulated Ageing and Field Ageing. **Infrastructures**, v. 9, 2024.

AMARAL, Larissa Ramos de. **Comportamento de Mástiques Asfálticos a Partir da Adição de Diferentes Fíleres**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Trabalho de Conclusão de Curso, 2019.

Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/28208>. Acesso em: 06 set. 2025.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. T361-16. **Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Binder Bond Strength (BBS) Test**. Washington D. C.: AASHTO, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 1856. **Standard Test Method for Recovery of Asphalt from Solution by Abson Method**. Washington D. C.: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 2042. **Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene or Toluene**. Washington D. C.: ASTM, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 2172. **Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures**. Washington D. C.: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 2872. **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)**. Washington D. C.: ASTM, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 4402. **Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer**. Washington D. C.: ASTM, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 6521. **Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. Washington D. C.: ASTM, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 7175. **Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. Washington D. C.: ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS E 1252. **Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis**. Washington D. C.: ASTM, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11341. **Derivados de Petróleo - Determinação dos Pontos de Fulgor e de Combustão em Vasos Abertos de Cleveland**. São Paulo: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14855. **Materiais Betuminosos - Determinação da Solubilidade em Tricloroetileno**. São Paulo: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15184. **Materiais Betuminosos - Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas Usando um Viscosímetro Rotacional**. São Paulo: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6293. **Ligantes Asfálticos - Determinação da Ductibilidade**. São Paulo: ABNT, 2015.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, p. 36-38, 2007.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro, LTC, p. 63, 2000.

BEHNOOD, Ali. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 171, 2019.

BERECHMAN, Joseph. Transportation—economic aspects of Roman highway development: the case of Via Appia. **Transportation Research Part A**, v. 37, p. 453, 2003.

BERNUCCI, B. Liedi, et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília: CNT, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM ME 163. **Materiais Betuminosos - Determinação da Ductilidade**. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE EM 135. **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE ES 031. **Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2024.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE ME 183. **Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE ME 448. **Pavimentação – Ligante asfáltico – Determinação das propriedades reológicas de ligantes asfálticos usando reômetro de cisalhamento dinâmico – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT, 2024.

DU, Jiengui, et al. Effect of component characteristics on mechanical properties of asphalt: A molecular dynamics study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, 2023.

GÓMEZ, W. D. Fernandez, et al. El fenómeno de envejecimiento en asfaltos y mezclas asfálticas. Una revisión. **Ingeniería e Investigación**, v. 33, n. 1, p. 5, 2013.

HU, Yongping, et al. State of the art: Multiscale evaluation of bitumen ageing behaviour. **Fuel**, v. 326, 2022.

HUNDLE, Florian, et al. The bitumen microstructure: a fluorescent approach. **Materials and Structures**, v. 49, p. 167, 2016.

HUNTER, Robert, et al. **The Shell Bitumen Handbook**. 6. ed. Shell International Petroleum Company Ltd, 2015.

JÚNIOR, Jorge Luiz Oliveira Lucas. **Influência da Adesividade Agregado-Ligante no Trincamento por Fadiga de Misturas Asfálticas.** Ceará: Universidade Federal do Ceará, Dissertação, 2018.

Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/34068>. Acesso em: 31 ago. 2025.

KHAN, Zhakir. Rivers, Roads, and Empires: A Historical Perspective on Connectivity and Expansion. **International Research Journal of Arts, Humanities and Social Sciences (IRJAHSS)**, v. 2, n. 2, 2025.

KRISHNAN, J. Murali; RAJAGOPAL, K. R. On the mechanical behavior of asphalt. **Mechanics of Materials**, v. 37, p. 1085, 2005.

LESUEUR, Didier. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 145, p. 42, 2009.

LI, Fang; YANG, Yuyou. Experimental investigation on the influence of interfacial effects of limestone and fly ash filler particles in asphalt binder on mastic aging behaviors. **Construction and Building Materials**, v. 290, 2021.

LI, Zhihao, et al. Research on the Correlation Between the Chemical Components and the Macroscopic Properties of Asphalt Binder. **Materials**, v. 18, 2025.

MATTEAZZI, Michele. Road Building in Roman Times: an Insight from Northern Italy. **Itinera**, v. 3, p. 167, 2023.

MENG, Guo, et al. Effect of aging, testing temperature and relative humidity on adhesion between asphalt binder and mineral aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 363, 2023.

NAHAR, Sayeda Nowrozon. **Phase-Separation Characteristics of Bitumen and Their Relation to Damage-Healing**. Zutphen: Technische Universiteit Delft, Dissertação, 2016. Disponível em: <http://repository.tudelft.nl/>. Acesso em: 24 ago. 2025.

PETERSEN, J. C., et al. SRHP-A-367: **Binder Characterization and Evaluation**. 1. ed. Washington D. C.: National Research Council, p. 10-14, 1994.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis**. 1. ed. Rio de Janeiro, p. 79-81, 2002.

QIN, Qian, et al. Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging. **Fuel**, v. 121, p. 86, 2014.

SOENEN, X., et al. Rheological and chemical properties of field aged binders and their variation within the wearing course. **Road Materials and Pavement Design**, v. 23, p. 36, 2021.

STEIGER, Richard W. **Roads of the Roman Empire**. [S.l.]: The Aberdeen Group, 1995. Publicação #C950949.

TAUSTE, R., et al. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 593, 2018.

YAO, Hui, et al. Fourier Transform Infrared Spectroscopy characterization of aging-related properties of original and nano-modified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 101, p.1078, 2015.

ZHANG, Henglong, et al. Evaluation of aging behaviors of asphalt binders through different rheological indices. **Fuel**, v. 221, p. 78, 2018.