



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana Instituto
Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura Engenharia
Civil de Infraestrutura

CARACTERIZAÇÃO DE ASFALTOS ENVELHECIDOS EM SERVIÇO

CLESCA EDDY LUBERISSE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o.Dr^o. Ricardo Oliveira de Souza

Foz do Iguaçu, PR

Abril de 2024

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho marca não apenas o término de uma jornada acadêmica, mas também o começo de uma nova fase. Este momento não seria possível sem o apoio incondicional de muitas pessoas que contribuíram de maneira significativa. Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder sabedoria, força e direção ao longo desta jornada para enfrentar os desafios e superar os obstáculos encontrados ao longo do caminho.

Agradeço aos meus pais e irmãos pelo apoio inabalável e incentivo constante. Suas palavras de encorajamento foram um farol de luz em momentos de dúvida e uma fonte constante de inspiração para eu perseguir meus objetivos.

Ao meu orientador, Prof^o.Dr^o. Ricardo Oliveira de Souza, agradeço pela sua orientação especializada e paciência que foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação e compromisso foram verdadeiramente inspiradores.

Aos meus colegas de curso, que compartilharam esta jornada comigo, agradeço pela colaboração, troca de conhecimento e apoio mútuo ao longo destes anos. Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos bons e difíceis, obrigado por seu apoio incondicional, amizade verdadeira e momentos de descontração que me ajudaram a manter o equilíbrio durante este percurso.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho e para minha formação acadêmica, meu sincero obrigado.

RESUMO

Este estudo avaliou o desempenho de asfaltos envelhecidos oriundos de misturas asfálticas fresadas em via urbana de Foz do Iguaçu/Paraná. Foram realizados ensaios convencionais, tipo ensaio de penetração e ponto de amolecimento para avaliar a consistência do asfalto envelhecido em serviço. Também foram realizados ensaios reológicos para avaliar a resistência do asfalto envelhecido em serviço ao afundamento de trilha de roda em altas temperaturas. Adicionalmente, também se avaliou a resistência ao trincamento por fadiga em temperaturas intermediárias para esse asfalto envelhecido em serviço. Comparando um asfalto 50/70 original com o asfalto envelhecido em serviço, se constatou desempenho inferior do asfalto envelhecido do ponto de vista do afundamento de trilha de roda, no entanto, para a resistência ao trincamento por fadiga, o asfalto envelhecido apresentou comportamento superior. Além disso, do ponto de vista da viscosidade do asfalto para adição aos agregados numa mistura asfáltica, se observou que o asfalto envelhecido em serviço requer, em média, temperatura 5°C acima da temperatura média verificada para o asfalto 50/70 original.

Palavras-chave: asfalto, envelhecimento, pavimentos, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This study evaluated the performance of an aged asphalt binder recovered from in service asphalt mixture milled in an urban road in Foz do Iguassu/Paraná. Conventional laboratory tests were carried out, such penetration and softening point, to evaluate the aged recovered binder consistency. Moreover, rheological tests were accomplished to assess the rut depth resistance at high temperatures as well as the resistance to fatigue cracking at intermediate temperatures. Comparing an unaged asphalt binder 50/70 (grade of penetration) to recovered aged binder, it was found the last one showed better resistance to fatigue cracking at intermediate temperatures, however, at high temperatures, the unaged 50/70 binder presented higher resistance to rut depth. Furthermore, considering the viscosity required to mix asphalt and aggregates at mixing plant, it was observed that the aged recovered binder needs, in average, 5°C in addition to the temperature required for the 50/70 unaged binder to produce an asphalt mixture.

Keywords: asphalt, aging, pavements, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP)	14
Figura 2 – Equipamentos utilizados para obtenção do CAP envelhecido	20
Figura 3 – Ensaio de penetração	21
Figura 4 – Ensaio do ponto de amolecimento	22
Figura 5 – Ensaio de viscosidade rotacional	23
Figura 6 – Ensaio de cisalhamento dinâmico	24
Figura 7 – Resultados do ensaio de penetração	25
Figura 8 – Ensaio do ponto de amolecimento	26
Figura 9 – Ensaio de viscosidade rotacional	27
Figura 10 – Ensaio de cisalhamento dinâmico em altas temperaturas	28
Figura 11 – Módulo complexo $ G^* $ em altas temperaturas.....	29
Figura 12 – Ângulos de fase (δ) em altas temperaturas.....	30
Figura 13 – Ensaio de cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias	31
Figura 15 – Ângulos de fase (δ) em temperaturas intermediárias	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Mecanismos de envelhecimento dos asfaltos em serviço	14
2.1.1 Reologia vs envelhecimento	17
2.2 Caracterização das propriedades físicas dos asfaltos envelhecidos	18
3. METODOLOGIA	20
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE ASFALTOS	21
3.2.1 Ensaio convencionais	21
3.2.2 Ensaios reológicos	23
4. Resultados e Discussão	25
4.1 Ensaios convencionais	25
4.1.1 Ensaio de penetração	25
4.1.2 Ensaio do ponto de amolecimento	26
4.2 Ensaios reológicos	27
4.2.1 Ensaio de viscosidade rotacional	27
4.2.2 Ensaio de cisalhamento dinâmico em altas temperaturas	27
4.2.3 Ensaio de cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias	30
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação de estradas e vias públicas desempenha um papel fundamental na infraestrutura de transporte para a mobilidade e a economia de qualquer região. No entanto, com o passar do tempo e devido a fatores como tráfego intenso, exposição às intempéries e envelhecimento natural, o asfalto utilizado em pavimentos pode degradar-se e perder suas propriedades originais. Para enfrentar esse desafio e garantir a durabilidade das vias, a reciclagem de misturas asfálticas envelhecidas em serviço tem surgido como uma alternativa viável e sustentável.

A reciclagem de misturas asfálticas envelhecidas em serviço é uma prática sustentável e econômica que permite reutilizar materiais asfálticos existentes em pavimentos degradados, reduzindo a necessidade de matéria-prima virgem e diminuindo os resíduos de construção e a pegada de carbono. Esse processo envolve a coleta, trituração e reprocessamento do asfalto retirado de pavimentos antigos para criar um novo material que possa ser utilizado na construção ou reabilitação de estradas. Algumas das técnicas comuns de reciclagem de misturas asfálticas envelhecidas em serviço são: reciclagem a frio, reciclagem a quente, reciclagem in situ, reciclagem a quente em usina.

É importante ressaltar que a reciclagem de asfalto envelhecido não é adequada em todos os casos e que a escolha da técnica de reciclagem depende de vários fatores, incluindo a qualidade do asfalto envelhecido, as condições da estrada, o tipo de tráfego, o orçamento disponível e as regulamentações locais. Antes de realizar qualquer processo de reciclagem, é necessário realizar testes laboratoriais para avaliar a viabilidade e determinar os ajustes necessários para alcançar o desempenho desejado do pavimento reciclado. Portanto, a decisão de reciclar asfalto envelhecido deve ser baseada em uma avaliação cuidadosa das condições locais e das necessidades do projeto.

O envelhecimento dos asfaltos em serviço é um fenômeno complexo que afeta suas propriedades físicas e mecânicas ao longo do tempo, resultando em deterioração das pavimentações e exigindo intervenções de manutenção e reabilitação. Compreender as mudanças que ocorrem nos asfaltos durante seu serviço é crucial para desenvolver estratégias eficazes de gerenciamento de pavimentos e prolongar sua vida útil.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar as propriedades físicas de um asfalto envelhecido em serviço, o qual foi obtido mediante fresagem do revestimento asfáltico na Avenida General Meira, localizada na região Sul da cidade de Foz do Iguaçu (Brasil, Paraná). Os resultados dos ensaios laboratoriais efetuados visam contribuir para uma melhor compreensão dos processos de envelhecimento de asfaltos em serviço.

Este estudo se concentrará na caracterização das propriedades físicas de asfaltos envelhecidos em serviço, limitando-se a uma análise das mudanças que ocorrem no seu comportamento mecânico ao longo do tempo de serviço. Não serão abordados aspectos relacionados à produção de asfalto, processos de mistura ou aplicação em novas pavimentações.

Objetivo geral:

Este estudo pretende investigar as propriedades físicas de asfaltos envelhecidos em serviço.

Objetivos específicos:

Para alcançar o objetivo geral, serão realizados:

- a) Ensaios convencionais (penetração e ponto de amolecimento) para classificação do asfalto envelhecido;
- b) Ensaios reológicos de cisalhamento dinâmico em altas temperaturas para avaliar o comportamento do asfalto envelhecido em relação ao afundamento de trilha de roda;
- c) Ensaios reológicos de cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias para avaliar o comportamento do asfalto envelhecido em relação ao trincamento por fadiga;
- d) Ensaios reológicos de viscosidade rotacional com viscosímetro Brookfield para avaliar a consistência do asfalto envelhecido em serviço.

Estrutura do trabalho:

Este estudo está dividido em 5 (cinco) capítulos. Inicialmente, tem-se o capítulo de introdução do trabalho. No capítulo dois, a revisão bibliográfica apresenta uma síntese sobre reciclagem de revestimentos asfálticos e envelhecimento de asfaltos. No capítulo três, a metodologia detalha os ensaios laboratoriais realizados. No capítulo quatro, são apresentados os resultados obtidos com respectiva discussão. O capítulo cinco apresenta as considerações finais e o capítulo seis apresenta sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pavimentação é o processo de construção de superfícies duras e niveladas em estradas, ruas, calçadas e outras áreas de tráfego, com o propósito de permitir o deslocamento de veículos e pedestres. A pavimentação tem um papel essencial na infraestrutura e na conectividade das comunidades, facilitando o transporte e o acesso a locais de importância econômica, social e cultural.

A pavimentação envolve várias etapas, que incluem:

Preparo do Solo: A superfície onde a pavimentação será aplicada deve ser devidamente preparada, o que pode envolver escavação, nivelamento e compactação do solo subjacente.

Construção da Base: A base é uma camada de material, frequentemente composta de agregados, que serve como suporte para o pavimento. Ela é projetada para distribuir as cargas do tráfego uniformemente.

Camada de Revestimento: A camada de revestimento é a parte visível do pavimento e pode ser composta de mistura asfáltica, concreto de cimento Portland, blocos de pedra, entre outros materiais. É projetada para resistir ao desgaste causado pelo tráfego.

Compactação: Dependendo do tipo de revestimento utilizado, após a aplicação do material, a superfície é compactada para garantir a estabilidade e a uniformidade do pavimento.

Acabamento: O acabamento final envolve a disponibilização de sinalização e marcações, tornando a área segura e funcional para uso.

A escolha dos materiais de pavimentação, como mistura asfáltica ou concreto de cimento Portland, depende de vários fatores, incluindo o tráfego esperado, o ambiente, o orçamento e os requisitos de durabilidade. Manter a pavimentação regularmente por meio de reparos e manutenção é crucial para garantir sua longevidade e segurança.

O ligante asfáltico, geralmente denominado asfalto, desempenha um papel fundamental na criação de superfícies de pavimentação duráveis, é um material betuminoso de origem natural ou obtido por processos de refinação do petróleo bruto. É uma substância viscosa, de cor escura, que se torna líquida quando aquecida e sólida à temperatura ambiente. O asfalto é amplamente

utilizado na construção civil, particularmente em projetos de pavimentação, e desempenha um papel fundamental na criação de superfícies de estradas e ruas duráveis e resistentes ao tráfego.

O asfalto é utilizado como um ligante que se combina com agregados minerais, como pedra britada, cascalho e areia, para formar misturas asfálticas. Essas misturas são frequentemente chamadas de "asfalto quente" e são aplicadas em camadas sobre a base da estrada para criar uma superfície de rodagem sólida e durável. O asfalto é conhecido por sua capacidade de aderir bem aos agregados, resistência à água e à maioria dos produtos químicos, bem como sua flexibilidade, o que o torna adequado para suportar as cargas do tráfego.

O asfalto é versátil e é usado em uma variedade de aplicações na construção civil, incluindo pavimentação de estradas, estacionamentos, pistas de aeroportos, calçadas, revestimentos de telhados e impermeabilizações. Sua capacidade de aderência, juntamente com a capacidade de ser reaplicado e reciclado, o torna um material de escolha para muitas obras de infraestrutura.

A avaliação das propriedades físicas de um asfalto envelhecido em serviço é importante para determinar o estado e a qualidade do pavimento, bem como para planejar a manutenção e reabilitação adequadas. Para avaliar essas propriedades, são realizados ensaios laboratoriais em amostras representativas do asfalto envelhecido. Os resultados desses testes fornecem informações valiosas para a tomada de decisão sobre a manutenção, reabilitação ou substituição do pavimento, garantindo sua segurança e durabilidade adequadas. É importante que essas avaliações sejam realizadas periodicamente ao longo da vida útil do pavimento para monitorar seu estado e tomar medidas preventivas quando necessário.

No Brasil, os asfaltos para pavimentação rodoviária são classificados segundo seu grau de penetração, em amostras ensaiadas submetidas à uma carga padronizada e à temperatura de 25°C. A Figura 1 apresenta um quadro resumo quanto a classificação de asfaltos.

Figura 1 – Classificação dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP)

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín.	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	–	–
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutibilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

2.1 MECANISMOS DE ENVELHECIMENTO DOS ASFALTOS EM SERVIÇO

O envelhecimento do asfalto, tanto físico quanto químico, é um processo complexo que envolve uma série de mudanças nas propriedades do material ao longo do tempo de serviço. Uma das principais consequências do envelhecimento físico é a perda gradual de voláteis, como os componentes leves do petróleo, que evaporam da matriz asfáltica devido à exposição à radiação solar, ao oxigênio do ar e às altas temperaturas (HOU *et al.*, 2018). Essa perda de volatilidade resulta em uma diminuição da flexibilidade e da capacidade de deformação do asfalto, tornando-o mais suscetível a fissuras e trincas sob cargas repetidas de tráfego (AMANI *et al.*, 2023).

O asfalto é composto por uma matriz de maltenos dispersos em uma fase contínua de asfaltenos, com resinas atuando como agentes de ligação entre os dois componentes (HOU et al., 2018). No entanto, com o envelhecimento, ocorrem mudanças na distribuição e na concentração desses componentes, afetando a estrutura e a coesão do asfalto.

Um dos efeitos do envelhecimento é a separação dos componentes do asfalto, com os asfaltenos tendendo a se aglomerar e formar agregados de maior tamanho e densidade (AMANI et al., 2023). Isso resulta em uma maior rigidez e fragilidade do material, tornando-o mais suscetível a trincas e deformações. Além disso, a migração dos asfaltenos para a superfície do revestimento asfáltico pode levar à formação de uma película dura e quebradiça, conhecida como crosta, que prejudica a aderência pneu-agregado e aumenta o risco de desgaste prematuro (WANG et al., 2019).

Por outro lado, o envelhecimento também pode levar à degradação dos maltenos, resultando na quebra de suas cadeias poliméricas e na redução de sua capacidade de suportar esforços de tração (HOU et al., 2020). Isso contribui para a diminuição da coesão e da resistência à fadiga do asfalto envelhecido, aumentando sua suscetibilidade a rachaduras e fissuras.

Conforme citado anteriormente, a exposição à radiação solar é um dos principais agentes externos que promovem o envelhecimento do asfalto, causando degradação molecular e alterações em suas propriedades físicas e mecânicas (AMANI et al., 2023). A radiação ultravioleta (UV) presente na luz solar desencadeia reações fotoquímicas no asfalto, resultando na quebra de ligações químicas e na formação de radicais livres, que contribuem para a oxidação do material (HOU et al., 2018).

Esse processo de oxidação é responsável pelo aumento da rigidez do asfalto e pela diminuição de sua capacidade de deformação, tornando-o mais suscetível a trincas e fissuras (WANG et al., 2019). Além da radiação UV, a exposição ao oxigênio do ar, leva à formação de grupos funcionais oxidados, como hidroxilas e cetonas, que reagem entre si para formar estruturas poliméricas mais complexas (LUO et al., 2018). Essas mudanças na estrutura molecular do asfalto resultam em uma série de efeitos adversos sobre suas propriedades mecânicas e reológicas. A formação de ligações cruzadas aumenta a rigidez e a coesão do asfalto, tornando-o mais frágil e suscetível a

trincas e deformações sob cargas de tráfego (YIN et al., 2017). Além disso, a presença de produtos oxidados na matriz asfáltica reduz a capacidade de adesão entre as partículas de agregados, comprometendo a coesão e a durabilidade da mistura asfáltica (LIU et al., 2020).

Além da oxidação, a polimerização é outro processo químico significativo que ocorre durante o envelhecimento do asfalto (YIN et al., 2017). Durante a polimerização, ocorre a formação de cadeias poliméricas mais longas e complexas a partir dos componentes do asfalto (LUO et al., 2018). Essas cadeias poliméricas adicionais contribuem para aumentar a coesão do asfalto, tornando-o mais rígido e menos flexível (YU et al., 2014). Como resultado, o asfalto envelhecido se torna mais propenso a trincas e deformações sob cargas de tráfego (WU et al., 2017).

Ademais das reações de oxidação e polimerização, também ocorrem outras reações químicas indesejadas devidas a agentes químicos presentes no ambiente, como poluentes atmosféricos e substâncias presentes no solo, durante o envelhecimento do asfalto (LIU et al., 2020; YIN et al., 2017; YANG et al., 2017). A presença de ácidos, sais e compostos orgânicos pode acelerar a degradação do asfalto, aumentando sua suscetibilidade à formação de trincas e panelas (buracos) no pavimento (YU et al., 2014). Assim, podem surgir compostos indesejados, como resíduos de combustão, aldeídos e cetonas, que afetam negativamente as propriedades do asfalto (AMANI et al., 2023). Esses compostos podem aumentar a fragilidade do asfalto envelhecido, tornando-o mais suscetível a falhas prematuras.

A ação do tráfego veicular também é um fator importante a considerar, pois as cargas repetidas aplicadas sobre o pavimento podem acelerar o processo de deterioração do asfalto, resultando em fissuras e deformações (HOU et al., 2020; YIN et al., 2017). O atrito entre os pneus dos veículos e a superfície do revestimento asfáltico provoca desgaste gradual do asfalto, levando à exposição de agregados e à perda de aderência no contato pneu-revestimento (LIU et al., 2020). Além disso, a umidade proveniente de chuvas e infiltrações pode penetrar, por exemplo, em fissuras e trincas, promovendo a desagregação das partículas do asfalto e comprometendo sua coesão (LUO et al., 2018).

As variações de temperatura, especialmente os ciclos de aquecimento e resfriamento, também desempenham um papel significativo no processo de envelhecimento, contribuindo para a perda de elasticidade e aumento da rigidez do material (HOU et al., 2020; WANG et al., 2019).

2.1.1 Reologia vs envelhecimento

Durante o processo de envelhecimento, as mudanças na reologia do asfalto desempenham um papel fundamental na determinação de seu comportamento mecânico e na capacidade de resistir às cargas aplicadas. A reologia do asfalto refere-se à sua capacidade de fluir e deformar-se sob diferentes condições de temperatura e carga, e é influenciada por fatores como a temperatura, o tempo e a taxa de aplicação de carga.

Inicialmente, o asfalto apresenta um comportamento viscoelástico, ou seja, exibe tanto propriedades viscosas quanto elásticas. Isso significa que ele é capaz de fluir e se deformar lentamente sob a ação de uma carga aplicada, mas também possui uma capacidade de recuperação elástica quando a carga é removida (YIN et al., 2017). No entanto, com o envelhecimento, ocorrem mudanças na estrutura molecular do asfalto, levando à transição de um comportamento viscoelástico para um comportamento mais rígido e frágil.

Essa transição é resultado da formação de ligações cruzadas entre as moléculas de asfalto, que aumentam a rigidez e a coesão do material (LIU et al., 2020). Como resultado, o asfalto envelhecido torna-se menos capaz de fluir e se deformar sob cargas aplicadas, o que pode levar à formação de trincas, deformações e fadiga prematura do pavimento.

As mudanças na reologia do asfalto afetam sua capacidade de absorver e dissipar energia sob cargas de tráfego, o que pode levar a um aumento da tensão nos materiais adjacentes, contribuindo para a propagação de defeitos e danos no pavimento (WU et al., 2017). A rigidez crescente do asfalto envelhecido também pode resultar em uma distribuição desigual de tensões e cargas ao longo do pavimento, aumentando o risco de falhas localizadas e reduzindo a vida útil do pavimento.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS ASFALTOS ENVELHECIDOS

A caracterização das propriedades físicas dos asfaltos envelhecidos é crucial para entender as mudanças que ocorrem em sua estrutura e comportamento mecânico ao longo do tempo de serviço. Diversas técnicas e metodologias são empregadas para essa caracterização, permitindo uma avaliação abrangente das propriedades reológicas, morfológicas e químicas dos asfaltos envelhecidos.

A avaliação do comportamento mecânico dos asfaltos envelhecidos pode ser feita mediante ensaios convencionais, tipo ensaio de penetração e ensaio do ponto de amolecimento, os quais serão detalhados no capítulo 3. Além desses ensaios, também são efetuados ensaios reológicos para avaliação do comportamento do material envelhecido. O ensaio de cisalhamento dinâmico é utilizado para avaliação do desempenho em altas temperaturas e em temperaturas intermediárias. O ensaio de fluência de viga é utilizado para avaliação do desempenho em temperaturas negativas (que provocam congelamento).

Do ponto de vista químico, os asfaltos envelhecidos podem ser avaliados por meio de ensaios de espectroscopia, os quais avaliam a capacidade de absorção de radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda (HOU et al., 2018). A espectroscopia infravermelha (FTIR) e a espectroscopia UV-visível são amplamente empregadas para identificar e quantificar grupos funcionais e produtos de oxidação presentes no asfalto envelhecido, fornecendo informações sobre sua composição química e nível de degradação (WANG et al., 2019).

Ainda do ponto de vista químico, existe a técnica de microscopia utilizada para investigar a morfologia e a estrutura interna dos asfaltos envelhecidos em nível microscópico (LUO et al., 2018). A microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV) permite visualizar e analisar a distribuição de partículas, vazios, poros e microfissuras no asfalto, fornecendo compreensão sobre sua integridade estrutural e capacidade de suportar cargas.

Outras abordagens complementares incluem técnicas de análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC), empregadas para investigar as mudanças térmicas e a estabilidade térmica dos asfaltos envelhecidos, fornecendo entendimento sobre sua resistência à temperatura e à degradação térmica (YU et al., 2014).

A análise dos resultados obtidos por meio dessas técnicas permite identificar as principais alterações que ocorrem nos asfaltos ao longo do tempo de serviço, como o aumento da rigidez, a redução da capacidade de deformação e a formação de microfissuras e trincas.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados de forma sucinta os ensaios laboratoriais realizados neste estudo.

3.1 EXTRAÇÃO DO ASFALTO ORIUNDO DE MISTURA ASFÁLTICA FRESADA EM CAMPO

Neste estudo, o asfalto também denominado ligante asfáltico ou Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), foi extraído de mistura asfáltica envelhecida em serviço. O CAP envelhecido foi extraído com aparelho extrator de betume elétrico (Figura 2a), segundo instruções da norma DNER-ME 053/94.

Figura 2. Equipamentos utilizados para obtenção do CAP envelhecido



Inicialmente se adicionou querosene à uma amostra de mistura asfáltica obtida por fresagem num revestimento asfáltico em serviço. Este solvente foi o escolhido haja vista que ele é menos tóxico que o tricloroetileno e o tetracloreto de carbono, também utilizados para extração de CAP. Ao final deste procedimento, foram obtidos separadamente agregados graúdos e CAP envelhecido+querosene+agregados finos. Na sequência, se procedeu a nova centrifugação. Por meio de centrífuga de bancada (Figura 2b), o material fino foi separado do CAP envelhecido+querosene. Posteriormente, com o aparelho Rotavapor e auxílio de vácuo a 740 mmHg (Figura 2c), foram separados o CAP envelhecido e o querosene.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE ASFALTOS

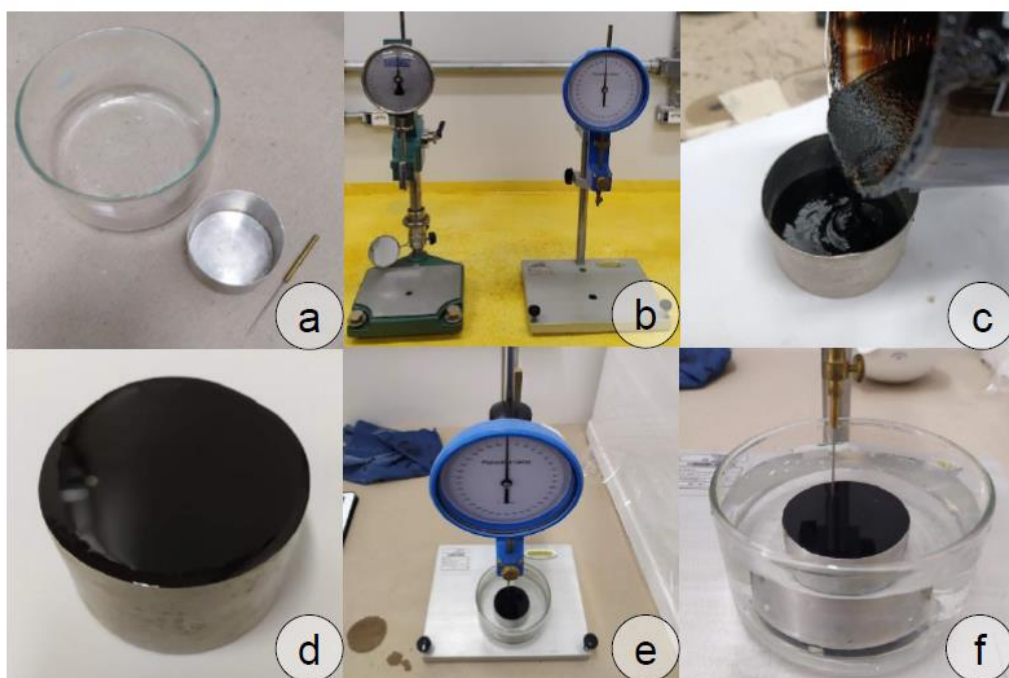
A caracterização de asfaltos pode ser feita por meio de ensaios convencionais e mediante ensaios reológicos. Nos ensaios convencionais tem-se, entre outros, o ensaio de penetração e o ensaio do ponto de amolecimento.

3.2.1 Ensaio convencionais

Ensaio de penetração de asfaltos

Este ensaio tem por objetivo avaliar a consistência do asfalto. De acordo com a norma DNIT 155/2010 – ME, a penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga (100 g), tempo (5 s) e temperatura (25°C). A norma mencionada detalha os procedimentos a serem seguidos para obtenção da consistência do material.

Figura 3 – Ensaio de penetração



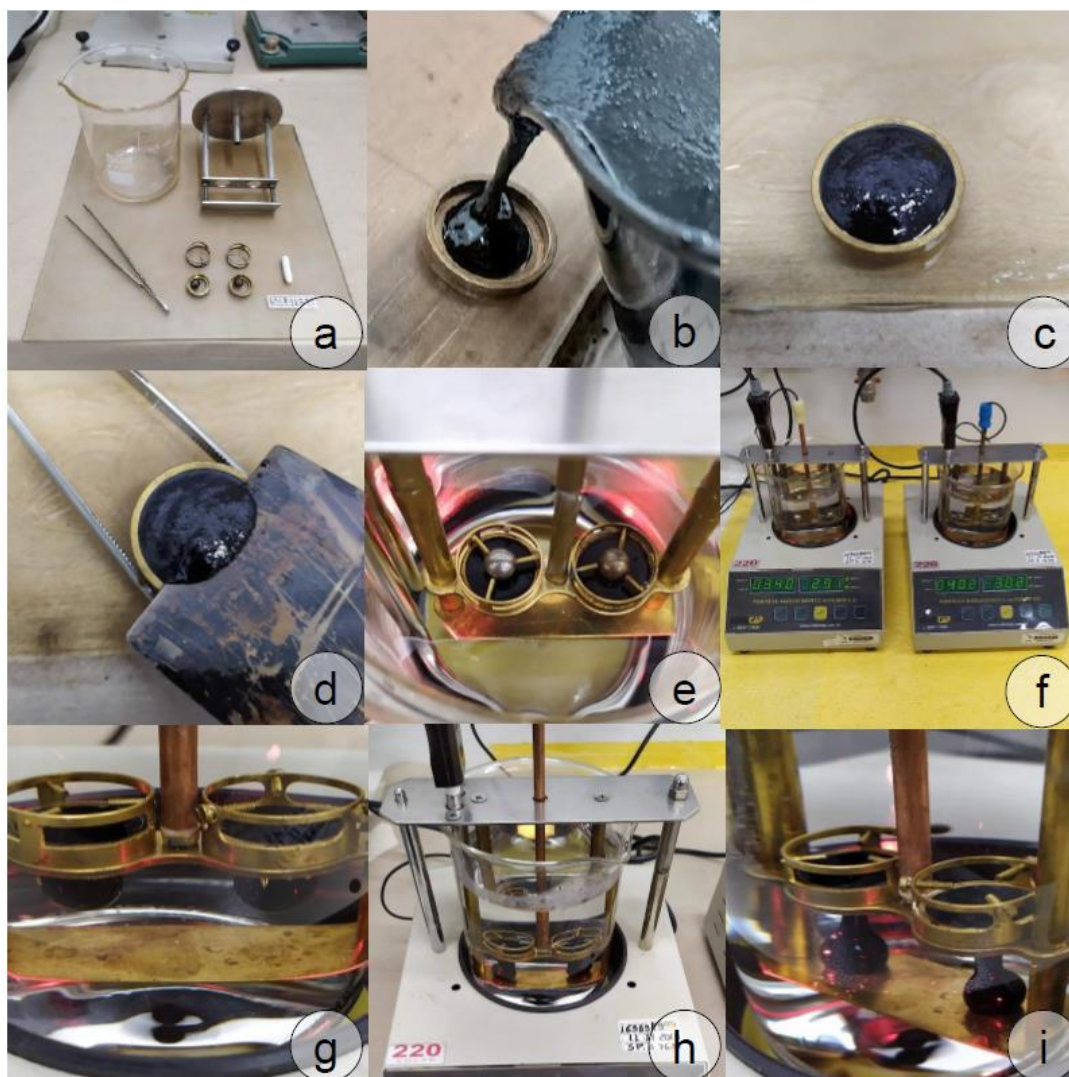
a) Cápsula e agulha; b) Penetrômetros; c) Preparação da amostra; d) amostra resfriando; e) Posicionamento da cápsula; f) Posicionamento da agulha.

Fonte: Grando (2022)

Ensaio do ponto de amolecimento – Método do anel e bola

Este ensaio tem por objetivo avaliar a consistência do asfalto à medida que a temperatura de ensaio aumenta. A norma DNIT 131/2010-ME descreve os procedimentos para realização do ensaio.

Figura 4 – Ensaio do ponto de amolecimento



a) Aparentagem; b) Preparação da amostra; c) Amostra resfriando em temperatura ambiente; d) Raspagem do excesso; e) Esferas posicionadas; f) Execução do ensaio; g) Início do escoamento; h) Final do ensaio; i) Esferas envolvidas por ligante no fundo do conjunto após a finalização do ensaio.

Fonte: Grando (2022)

3.2.2 Ensaios reológicos

Além dos ensaios convencionais, tem-se os ensaios reológicos nos quais se avalia a capacidade do asfalto fluir e deformar sob diferentes condições de temperatura e carga. Neste caso, tem-se o ensaio de cisalhamento dinâmico e o ensaio de viscosidade rotacional.

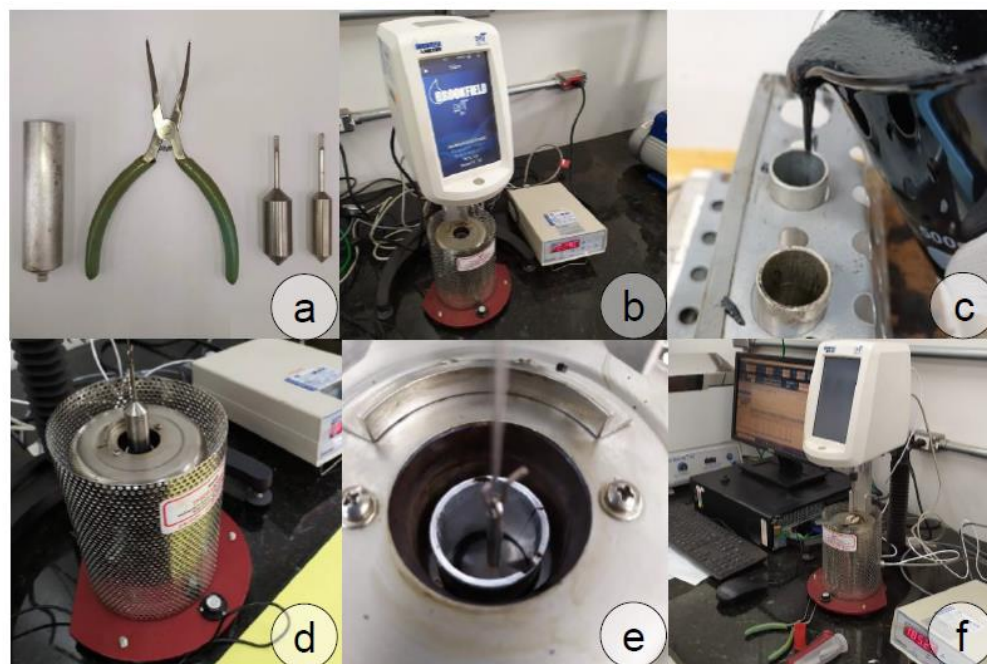
Ensaio de viscosidade rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional avalia a capacidade do asfalto ser bombeado e misturado aos agregados durante a fase de produção da mistura asfáltica em usina.

Neste ensaio, considerando velocidade de rotação constante (por exemplo, 20 RPM), se determina o torque necessário para girar uma haste (spindle) imersa numa pequena amostra de asfalto aquecido. Esse torque é então convertido em viscosidade pela razão entre a tensão aplicada e a taxa de cisalhamento do fluido.

O procedimento de ensaio é descrito nas normas ASTM D4402 e AASHTO T316.

Figura 5 – Ensaio de viscosidade rotacional



a) Cápsula e spindles; b) Viscosímetro Brookfield; c) Pesagem da amostra; d) Posicionamento da spindle dentro da cápsula; e) Spindle submersa na amostra de asfalto; f) Execução do ensaio.

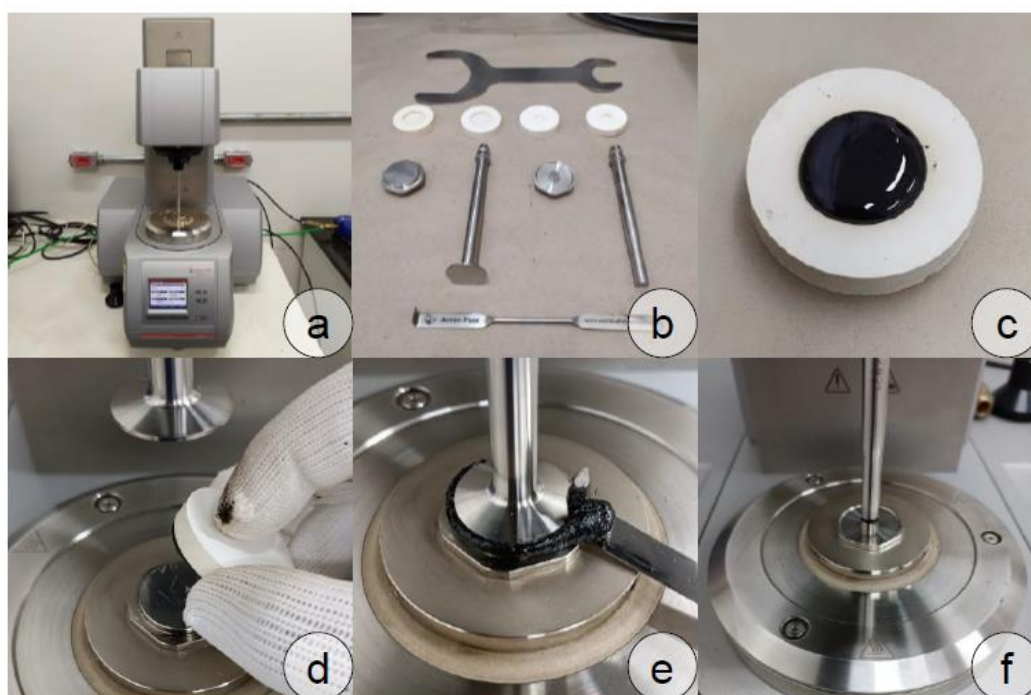
Fonte: Grando (2022)

Ensaio de cisalhamento dinâmico

Este ensaio pode ser realizado em temperaturas altas ou em temperaturas intermediárias. Em temperaturas altas, o ensaio permite avaliar o a resistência do asfalto aos afundamentos de trilha de roda, enquanto em temperaturas intermediárias, se avalia a resistência ao trincamento por fadiga. As normas AASTHO T315 e ASTM D71750 descrevem os procedimentos para realização do ensaio. Por meio deste ensaio são obtidos o módulo de cisalhamento complexo $|G^*|$ e o ângulo de fase (δ). O parâmetro $|G^*|$ representa a resistência total à deformação. Ele é calculado dividindo-se a tensão máxima cisalhante pela deformação resultante que ocorre durante um ciclo de carga. Quanto maior o parâmetro $|G^*|$, menor é a deformabilidade do asfalto.

O ângulo de fase, δ , representa o atraso (defasagem) na resposta do material à carga aplicada, ou seja, permite avaliar a elasticidade do asfalto. Quanto menor o ângulo de fase, maior será sua deformação recuperável (ROBERTS et al., 1996; BERNUCCI et al., 2008).

Figura 6 – Ensaio de cisalhamento dinâmico



a) Reômetro de cisalhamento dinâmico; b) Aparelhagem; c) Amostra resfriando em temperatura ambiente; d) Posicionamento da amostra entre as placas de 25 mm; e) Raspagem do excesso de material; f) Ensaio com a placa de 8 mm de diâmetro.

Fonte: Grando (2022)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

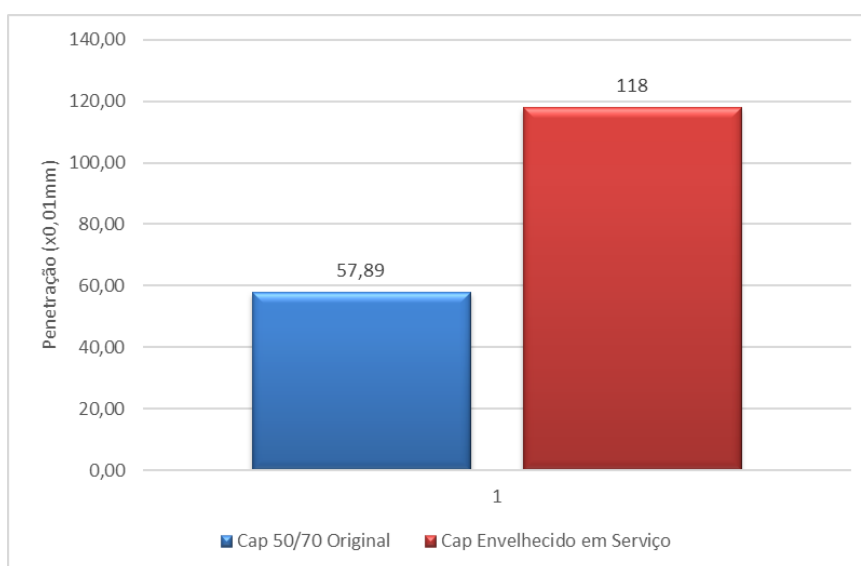
Neste capítulo são apresentados os resultados acompanhados de discussões. O desempenho do asfalto envelhecido em serviço foi comparado ao asfalto 50/70 original, que é o asfalto geralmente utilizado durante a produção de misturas asfálticas nesta região.

4.1 ENSAIOS CONVENCIONAIS

4.1.1 Ensaio de penetração

Este ensaio foi realizado à temperatura de 25°C. Para cada tipo de asfalto foram ensaiadas 3 (três) amostras. De cada amostra foi obtido um valor médio entre os 3 (três) valores de penetração medidos. Posteriormente, se calculou a média entre os 3 (três) valores médios para cada tipo de asfalto. O asfalto envelhecido em serviço apresentou (Figura 7) penetração média igual a 118 ($\times 0,01$ mm), ou seja, esse asfalto não atende os intervalos de classificação de asfalto brasileiros, pois o mesmo está numa situação intermediária entre CAP 85/100 e 150/200. Esperava-se que o valor médio de penetração fosse igual ou inferior à penetração média do CAP 50/70, haja vista o tempo de vida em serviço desse material, exposto aos carregamentos do tráfego e ao envelhecimento.

Figura 7 – Resultados do ensaio de penetração



Fonte: Autor (2024)

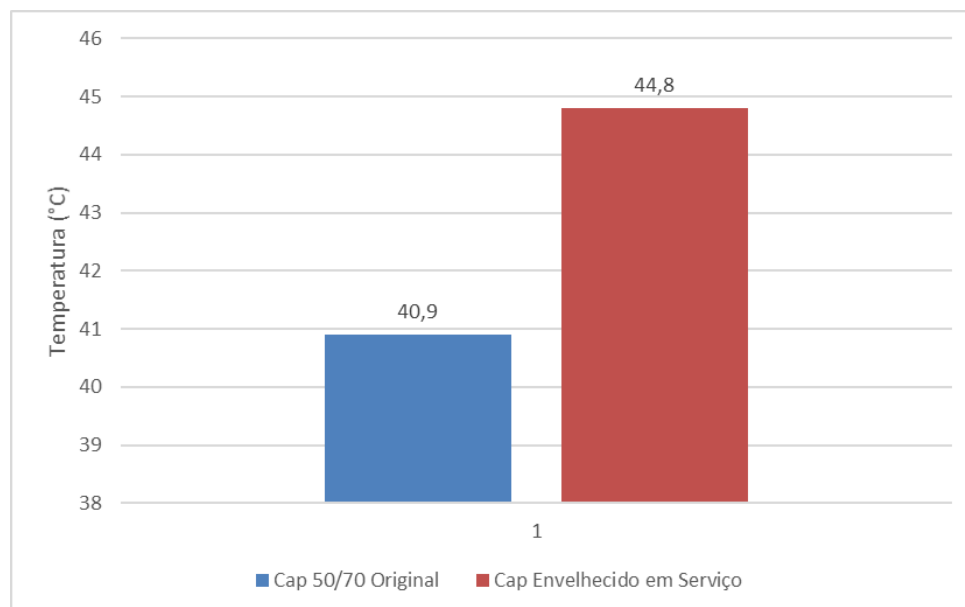
O comportamento observado para o asfalto envelhecido em serviço poderia ser atribuído, por exemplo, a alguma reação entre o querosene e o asfalto durante o processo de extração. Também se poderia especular que o ensaio convencional de penetração pode não ser adequado para avaliação da consistência de asfaltos que tenham sido recuperados via centrifugação com querosene.

4.1.2 Ensaio do ponto de amolecimento

Neste ensaio foram avaliadas 4 (quatro) amostras para cada tipo de asfalto. Os resultados representam o valor médio das temperaturas de amolecimento em cada caso (Figura 8).

A temperatura de amolecimento do asfalto envelhecido em serviço (44,8°C) permite classificá-lo como CAP 85/100, considerando a classificação de CAP's apresentada na Figura 1. Tendo em vista a penetração média obtida anteriormente, era esperado uma temperatura média de amolecimento entre 43°C e 37°C. Desta forma, a consistência desse material é maior que a esperada.

Figura 8 – Ensaio do ponto de amolecimento



Fonte: Autor (2024)

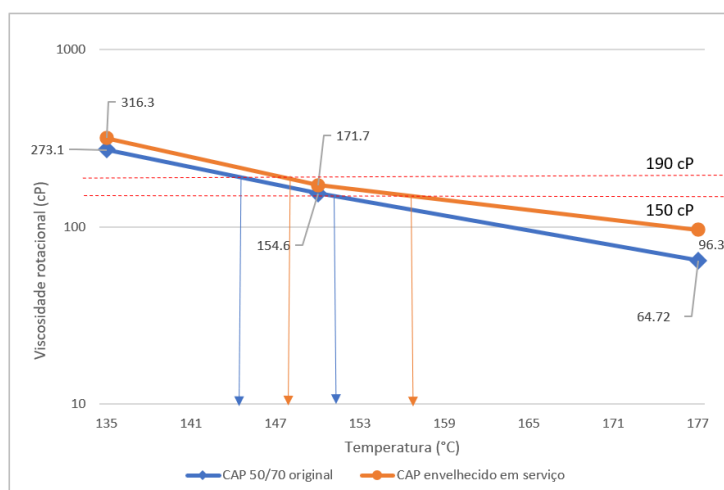
4.2 ENSAIOS REOLÓGICOS

4.2.1 Ensaio de viscosidade rotacional

Neste ensaio foram avaliadas 3 (três) amostras para cada tipo de asfalto. Os resultados representam o valor médio das viscosidades rotacionais em cada caso.

Os valores médios das viscosidades às temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C são ilustradas na Figura 9. Devido ao envelhecimento, a viscosidade média do asfalto envelhecido em serviço apresentou valores próximos aos registrados para o asfalto 50/70 original à 135°C e 150°C, porém a diferença entre viscosidades rotacionais cresceu com o aumento da temperatura de ensaio, ou seja, na maior temperatura avaliada o asfalto envelhecido em serviço se mostrou mais consistente.

Figura 9 – Ensaio de viscosidade rotacional



Fonte: Autor (2024)

Durante a produção da mistura asfáltica, a viscosidade rotacional do asfalto deve ser 170 ± 20 cP (centipoise) a fim de garantir um envolvimento adequado dos agregados.

Considerando as temperaturas para adição do asfalto aos agregados durante a produção duma mistura asfáltica, o intervalo de temperatura para utilização do asfalto envelhecido está entre 147°C e 157°C, sendo 152°C a temperatura média. Já para o asfalto original o intervalo está entre 143°C e 151°C, sendo 147°C a temperatura média. Assim, a utilização do asfalto

envelhecido requer, em média, 5°C a mais de calor para ter-se a viscosidade adequada.

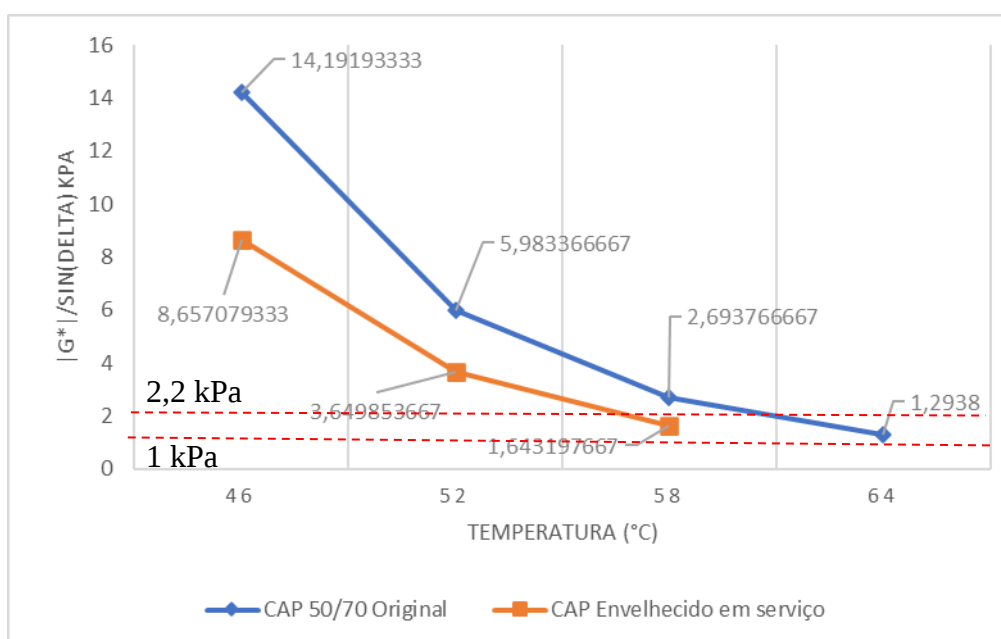
4.2.2 Ensaio de cisalhamento dinâmico em altas temperaturas

Neste ensaio foram utilizados pratos de 25 mm de diâmetro, gap entre os pratos igual a 1 mm e temperatura inicial de 46°C. O ensaio prosseguiu com incrementos de 6°C na temperatura de ensaio até que o valor do quociente $|G^*|/\sin\delta$ apresentasse valor inferior a 1,00 kPa para o asfalto 50/70 original e inferior a 2,20 kPa para o asfalto envelhecido em serviço (em longo prazo).

A Figura 10 apresenta a variação do quociente $|G^*|/\sin\delta$ à medida que aumenta a temperatura de ensaio. Os valores de $|G^*|/\sin\delta$ representam a média de 3 (três) amostras ensaiadas em cada temperatura avaliada.

Considerando o valor mínimo do parâmetro $|G^*|/\sin\delta$, se constatou que o asfalto envelhecido atendeu o requisito até a temperatura de 58°C, enquanto o asfalto 50/70 original alcançou a temperatura de 64°C. Tal fato mostra que a resistência do asfalto envelhecido ao afundamento de trilha de roda é inferior à do asfalto 50/70 original.

Figura 10– Ensaio de cisalhamento dinâmico em altas temperaturas

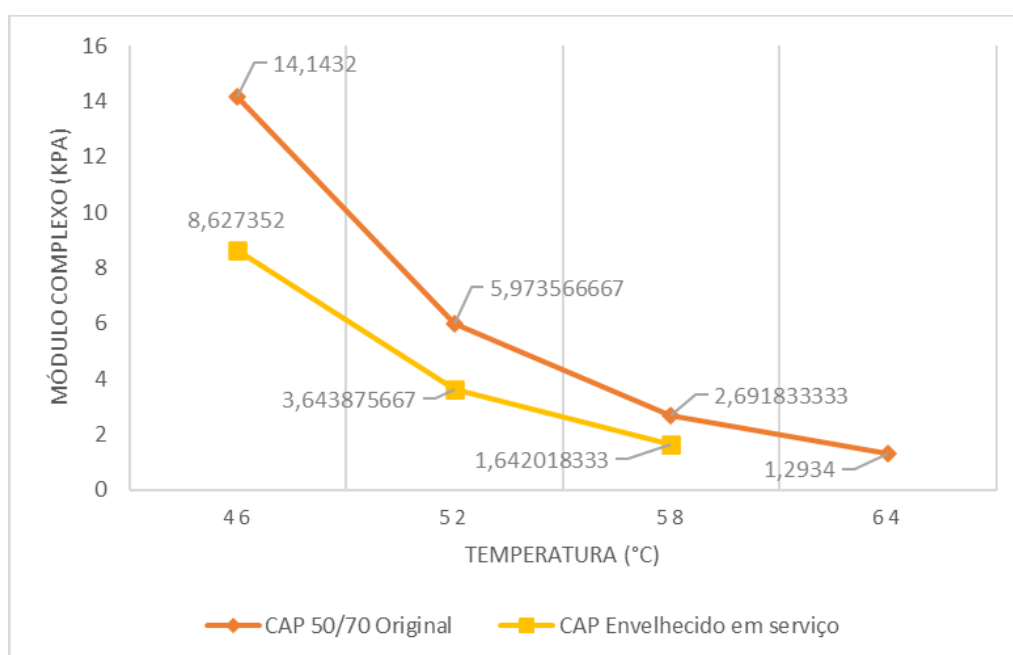


Fonte: Autor (2024)

Também se avaliou individualmente o comportamento do parâmetro $|G^*|$. A Figura 11 ilustra a variação desse parâmetro à medida que aumenta a temperatura de ensaio. Os valores de $|G^*|$ representam a média de 3 (três) amostras ensaiadas em cada temperatura avaliada.

Em todas as temperaturas avaliadas, os valores do módulo complexo $|G^*|$ do asfalto 50/70 original foram superiores aos registrados para o asfalto envelhecido em serviço. Isso mostra que o asfalto envelhecido apresenta menor resistência total à deformação.

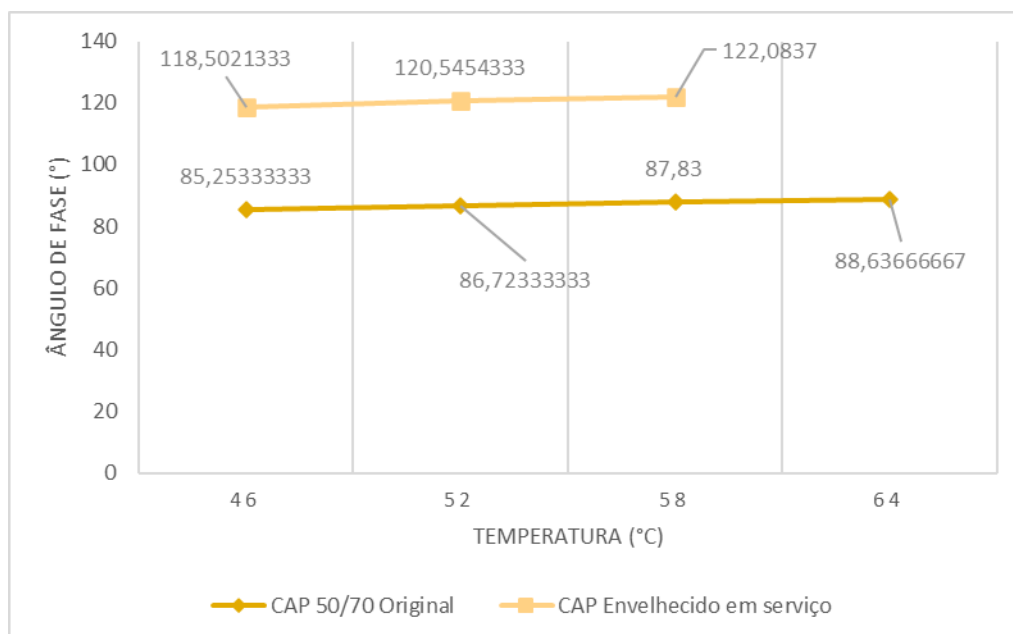
Figura 11 – Módulo complexo $|G^*|$ em altas temperaturas



Fonte: Autor (2024)

Se avaliou ainda individualmente o comportamento do ângulo de fase (δ). A Figura 12 ilustra a variação desse parâmetro à medida que aumenta a temperatura de ensaio. Os valores de (δ) representam a média de 3 (três) amostras ensaiadas em cada temperatura avaliada.

Neste caso, em todas as temperaturas avaliadas, os valores dos ângulos de fase (δ) do asfalto envelhecido em serviço foram superiores aos registrados para o asfalto 50/70 original. Assim, o asfalto envelhecido apresenta menor elasticidade comparado ao asfalto 50/70 original, o que enseja a adição de algum produto rejuvenescedor para recuperar sua elasticidade.

Figura 12 – Ângulos de fase (δ) em altas temperaturas

Fonte: Autor (2024)

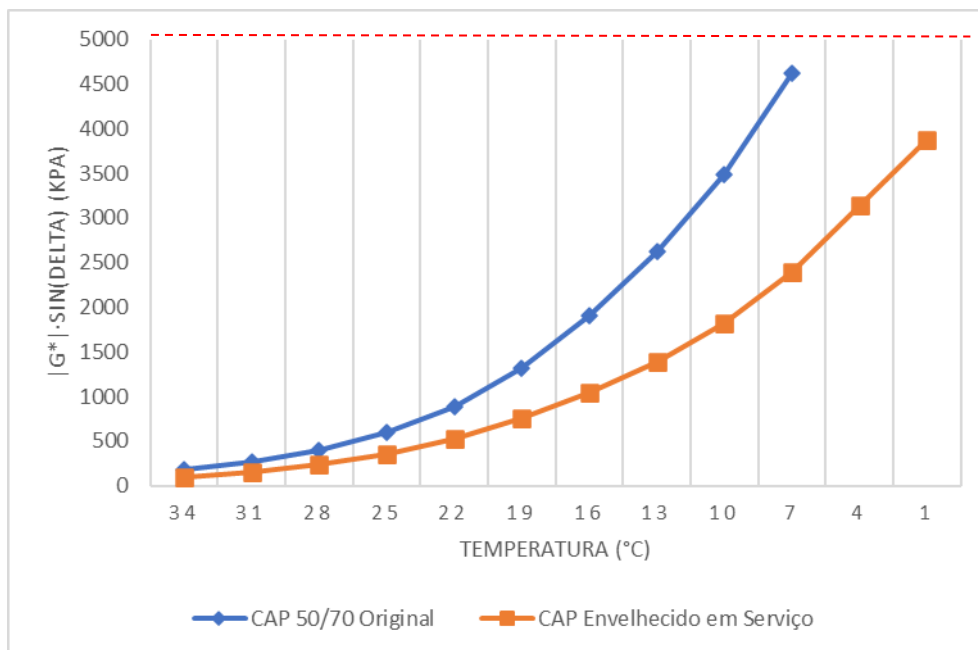
4.2.3 Ensaio de cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias

Neste ensaio foram utilizados pratos de 8 mm de diâmetro, gap entre os pratos igual a 2 mm e temperatura inicial de 34°C. O ensaio prosseguiu com decréscimos de 3°C na temperatura de ensaio até que o valor do produto $|G^*| \times \sin \delta$ apresentasse valor superior a 5000 kPa para o asfalto envelhecido em serviço (longo prazo).

A Figura 13 apresenta a variação do produto $|G^*| \times \sin \delta$ à medida que diminui a temperatura de ensaio. Os valores de $|G^*| \times \sin \delta$ representam a média de 3 (três) amostras ensaiadas em cada temperatura avaliada.

Em todas as temperaturas avaliadas, os valores do parâmetro $|G^*| \times \sin \delta$ para o asfalto envelhecido foram inferiores aos registrados para o asfalto 50/70 original. Além disso, o asfalto 50/70 original atendeu o valor limite (5000 kPa) para o parâmetro $|G^*| \times \sin \delta$ até 7°C, enquanto o asfalto envelhecido atendeu o requisito até 1°C. Desta forma, o asfalto envelhecido apresenta melhor desempenho em relação ao trincamento por fadiga em temperaturas intermediárias.

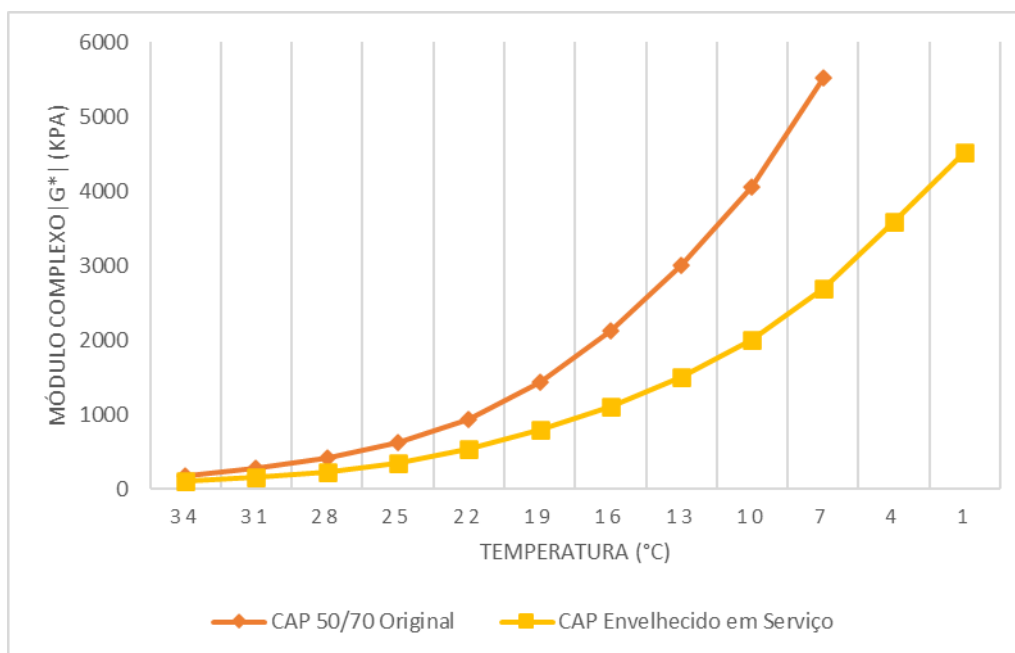
Figura 13 – Ensaio de cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias



Fonte: Autor (2024)

Também se avaliou individualmente o comportamento do parâmetro $|G^*|$. A Figura 14 ilustra a variação desse parâmetro à medida que diminui a temperatura de ensaio. Os valores de $|G^*|$ representam a média de 3 (três) amostras ensaiadas em cada temperatura avaliada.

Figura 14 – Módulo complexo $|G^*|$ em temperaturas intermediárias



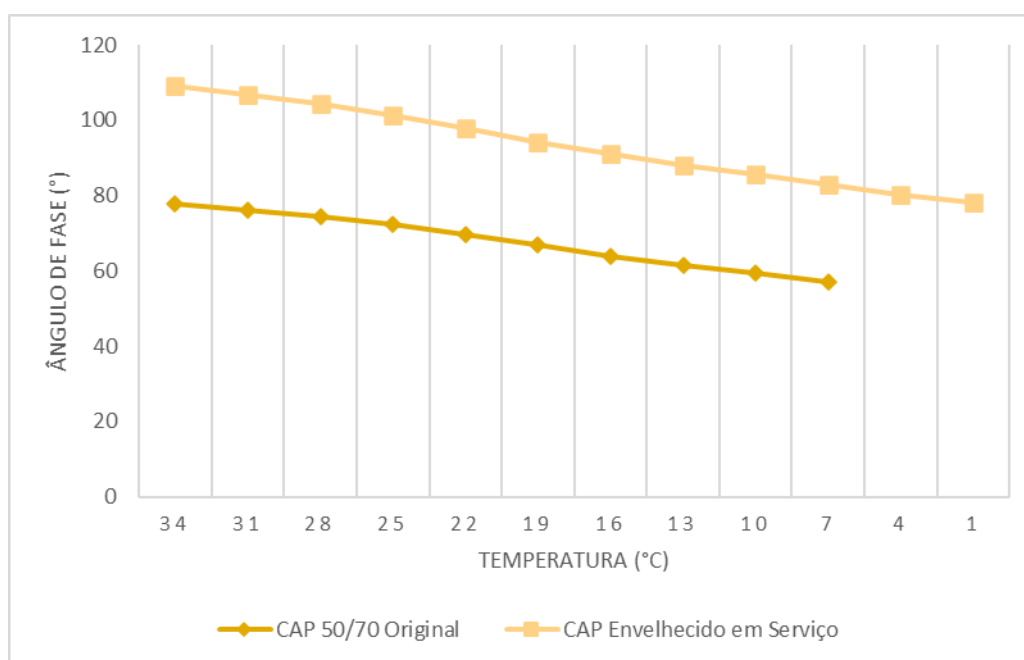
Fonte: Autor (2024)

Em todas as temperaturas avaliadas, os valores do módulo complexo $|G^*|$ do asfalto envelhecido em serviço foram inferiores aos registrados para o asfalto 50/70 original, o que confirma a menor resistência total à deformação em temperaturas intermediárias.

Se avaliou ainda individualmente o comportamento do ângulo de fase (δ). A Figura 15 ilustra a variação desse parâmetro à medida que diminui a temperatura de ensaio. Os valores de (δ) representam a média de 3 (três) amostras ensaiadas em cada temperatura avaliada.

Neste caso, em todas as temperaturas avaliadas, os valores dos ângulos de fase (δ) do asfalto envelhecido em serviço foram superiores aos registrados para o asfalto 50/70 original. Assim, o asfalto envelhecido apresenta menor elasticidade comparado ao asfalto 50/70 original, ensejando novamente a adição de algum produto rejuvenescedor para recuperar sua elasticidade.

Figura 15 – Ângulos de fase (δ) em temperaturas intermediárias



Fonte: Autor (2024)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da caracterização de asfaltos envelhecidos em serviço revela a complexidade dos processos de envelhecimento e deterioração que afetam a infraestrutura viária. A exposição a fatores ambientais, como radiação solar, variações de temperatura, ação do tráfego e agentes químicos, desencadeia uma série de mudanças nas propriedades físicas do asfalto ao longo do tempo.

Neste estudo foi avaliado o comportamento dum asfalto envelhecido em serviço, o qual foi recuperado de mistura asfáltica fresada em uma via urbana de Foz do Iguaçu/Paraná.

Os resultados dos ensaios laboratoriais mostraram que ensaios convencionais, tipo ensaio do ponto de amolecimento e ensaio de penetração, podem não ser adequados para identificar corretamente as propriedades de asfaltos recuperados.

Os ensaios reológicos de viscosidade e cisalhamento dinâmico permitiram uma análise mais ampla e confiável. Do ponto de vista da viscosidade rotacional, para o asfalto envelhecido em serviço se constatou temperaturas entre (147°C - 157°C) para adição aos agregados, comparado aos (143°C - 151°C) para adição do asfalto 50/70 original, o qual é geralmente utilizado na produção de misturas asfálticas nesta região. Assim, o asfalto envelhecido precisa de mais calor (em média +5°C) para ser atingida a viscosidade rotacional adequada para produção duma mistura asfáltica.

Considerando os ensaios de cisalhamento dinâmico, se constatou que o asfalto envelhecido em serviço apresentou resistência inferior ao afundamento de trilha de roda em altas temperaturas quando comparado ao asfalto 50/70 original. Isso enseja a utilização de algum aditivo para recuperar essa resistência.

Para os ensaios de cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias, o asfalto envelhecido em serviço apresentou comportamento superior ao observado para o asfalto 50/70 original, ou seja, houve melhor desempenho em relação ao trincamento por fadiga.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com o objetivo de complementar os resultados obtidos neste trabalho e contribuir para a evolução do conhecimento, sugere-se:

- a) misturar o asfalto envelhecido em serviço com óleo usado de motores e borracha triturada para rejuvenescimento do primeiro;
- b) misturar o asfalto envelhecido em serviço com asfalto-borracha produzido comercialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANI, Saeed; JAHANGIRI, Behnam; KARIMI, Mohammad M. Performance characterization of asphalt mixtures under different aging levels: A fracture-based method. *Construction and Building Materials*, v. 383, p. 131126, 2023.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO R28**: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). 06 ed. Washington: AASHTO, 2007b. 9 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T240**: Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). 13 ed. Washington: AASHTO, 2017a. 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. 19 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2019a. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D36**: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). 14E1 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2014. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D92**: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. 18 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2018. 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven). 19 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2019b. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7208**: Materiais betuminosos para emprego em pavimentação. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11314**: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 16 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2008. 504 f.

Disponível em: <<http://www.abeda.org.br/livro-pavimentacao/>>. Acesso em: 18 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (Brasil). Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR 719, 2006. 274 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/publicacoes>>. Acesso em: 19 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 6p.

Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/especificacao-de-materia>>. Acesso em: 19 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 129**: Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. Rio de Janeiro: IPR, 2011. 4 p.

Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/especificacao-de-materia>>. Acesso em: 18 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 131**: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2010. 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/metodo-de-ensaio-me>>. Acesso em: 18 out. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 155**: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2010. 7 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/metodo-de-ensaio-me>>. Acesso em: 18 out. 2019.

GRANDO, A. J. Avaliação do Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC) como agente redutor de viscosidade do asfalto-borracha. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR, 2022.

HOU, Xiangdao et al. Characterizing asphalt aging behaviors and rheological properties based on spectrophotometry. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119401, 2020.

HOU, Xiangdao et al. Identification of asphalt aging characterization by spectrophotometry technique. *Fuel*, v. 226, p. 230-239, 2018.

LIU, Chaochao et al. Analysis and comparison of different impacts of aging and loading frequency on fatigue characterization of asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 9, p. 04020240, 2020.

LUO, Xue et al. Kinetics-based aging evaluation of in-service recycled asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, v. 200, p. 934-944, 2018.

MENAPACE, Ilaria; YIMING, Wubulikasimu; MASAD, Eyad. Chemical analysis of surface and bulk of asphalt binders aged with accelerated weathering tester and standard aging methods. *Fuel*, v. 202, p. 366-379, 2017.

ROBERTS, F., L et al. Hot mix asphalt materials, mixture, design, and construction. Lanham: NAPA, 1996

WANG, Xiaofeng et al. Aging characteristics of bitumen from different bituminous pavement structures in service. *Materials*, v. 12, n. 3, p. 530, 2019.

WU, Shaopeng et al. Evaluation of mechanical properties and aging index of 10-year field aged asphalt materials. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 1158-1167, 2017.

YANG, Xu; MILLS-BEALE, Julian; YOU, Zhanping. Chemical characterization and oxidative aging of bio-asphalt and its compatibility with petroleum asphalt. *Journal of cleaner production*, v. 142, p. 1837-1847, 2017.

YIN, Fan et al. Characterization of non-uniform field aging in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, v. 153, p. 607-615, 2017.

YU, Xiaokong et al. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, v. 135, p. 162-171, 2014.