



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
CAMPUS CAMPINA GRANDE – PB

AMANDA MENDES ARRUDA

**ANÁLISE DO FENÔMENO FADIGA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE  
FREQUÊNCIA E TEMPERATURA**

CAMPINA GRANDE – PB

2021

AMANDA MENDES ARRUDA

**ANÁLISE DO FENÔMENO FADIGA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE  
FREQUÊNCIA E TEMPERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG  
como requisito para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Carina Silvani  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

2021

AMANDA MENDES ARRUDA

ANÁLISE DO FENÔMENO FADIGA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE  
FREQUÊNCIA E TEMPERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade  
Federal de Campina Grande – UFCG como requisito para a  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em \_\_\_\_\_ de Outubro de 2021

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carina Silvani – UFCG**  
**Orientadora**

---

**Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça – UFCG**  
**Co – Orientadora**

---

**Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Aline Figueirêdo Nóbrega de Azeredo – UFCG**  
**Examinadora Interna**

---

**Osires de Medeiros Melo Neto**  
**Examinador Externo**

---

**M.Sc. Tairone Albuquerque**  
**Examinador Externo**

## AGRADECIMENTOS

Gratidão, primeiramente, a Deus - por guiar meus passos e estar ao meu lado, mesmo quando não sou digna de Teu amor, tens me mostrado que sou Tua filha e que Teus planos para a minha vida são maiores do que eu possa imaginar.

Gratidão aos meus pais, Carlos e Janete, por todo o amor, carinho, e dedicação que tiveram e têm em criar seus filhos, por todo o esforço e trabalho que tiveram conosco, por nunca nos desamparar, por todo o apoio, incentivo, paciência e cuidado nos meus dias ruins – que não foram poucos. Eu não teria chegado até aqui sem vocês e os amo demais.

Aos meus irmãos, Matheus e Sonaly, por todas as brincadeiras, brigas, reclamações, incentivos, apoio e ensinamentos. Vocês foram meu exemplo em muitas etapas da vida, mas em especial nestes últimos 5 anos. Tenho orgulho e admiração por quem vocês se tornaram e o meu amor por vocês é indiscutível.

À minha adorável sobrinha Letícia, que ainda não tem idade para entender o tamanho amor que eu sinto por ela, mas que chegou para mudar minha perspectiva de vida. Seu nascimento é uma benção para todos nós, você é a luz da nossa vida e espero ser digna de dar a você todo o amor que recebi e recebo da minha família.

Aos meus demais familiares pelo amor, carinho, apoio, ensinamentos, brincadeiras e risadas durante toda a minha vida. Vocês são parte integrante e fundamental da minha história.

A todos os meus amigos, e em especial a Aline, Luan, Letícia, Alysson e Hebert por estarem comigo sempre, aguentarem minhas loucuras, inseguranças, ansiedades e medos, sem nunca sair do meu lado, me mostrando que família também pode ser uma escolha. Obrigada por fazerem parte da minha família de coração.

À professora Ana Maria, por toda a orientação e por nunca me abandonar, mesmo em face à tantas dificuldades.

À Priscila, por todos os ensinamentos, dúvidas sanadas, construção de conhecimento e por toda a sua dedicação em fazer minha iniciação científica dar certo. Eu não estaria aqui sem seu apoio.

Por último, aos professores da UFCG que se disponibilizaram em ensinar seus alunos, se importaram conosco e com nosso aprendizado, que nos ajudaram e nos escutaram. Ser professor é uma vocação. Obrigada por todos os ensinamentos.

*“Se te mostrares fraco no  
dia da angústia, é que a  
tua força é pequena”*

**(Provérbios 24:10)**

## RESUMO

Os pavimentos são parte integrante do desenvolvimento das regiões, garantindo infraestrutura e conexões entre as áreas mais remotas. Sendo os mais utilizados, os pavimentos flexíveis possuem vida útil de até 10 anos, desde que sejam feitas manutenções periódicas. Na busca por manter a qualidade e durabilidade do pavimento, algumas técnicas, como a utilização de ligantes modificados, para adiar a ocorrência de defeitos, como as trincas por fadiga. Os principais fatores intervenientes à vida de fadiga do pavimento são o ligante asfáltico, as propriedades dos agregados e o foco deste estudo: as variações de frequência e temperatura. Para tal, foi realizada a caracterização mecânica da mistura seguida pelo ensaio de vida de fadiga, considerando a variação de temperatura e frequência. Após esta análise, foi possível observar que os pavimentos se comportam de maneiras distintas quando expostos a frequências ou temperaturas diferentes. Quando expostas a altos valores de frequência, da ordem de 30 Hz, as misturas apresentaram menor vida de fadiga. Observou-se também que o pavimento, quando submetido a maiores temperaturas, apresentou menor rigidez e maior deformação, necessitando de menor número de aplicações de carga para atingir a condição de ruptura. A menores temperaturas, da ordem de 10°C, observou-se que a rigidez influenciou no aumento do número de aplicações necessárias para atingir a ruptura, indicando maior resistência da mistura à fadiga. No entanto, a rigidez proveniente do ligante asfáltico e transmitida à mistura asfáltica completa causou diferentes tipos de ruptura.

**Palavras-chave:** Pavimentos Flexíveis, Vida de Fadiga, Temperatura, Frequência.

## ABSTRACT

The pavements are an integral part of the development of the regions, ensuring infrastructure and connections between the most remote areas. Being the most used, flexible pavements have a useful life of up to 10 years, provided that periodic maintenance is carried out. In the search for maintaining the quality and durability of the pavement, there are some techniques, such as the use of modified binders, to delay the occurrence of defects, like fatigue cracks. The main factors intervening in the fatigue life of the pavement are the asphalt binder, the properties of the aggregates and the focus of this study: frequency and temperature variations. To this end, the mechanical characterization of the mixture was performed, followed by the fatigue life test, considering the variation in temperature and frequency. After this analysis, it was possible to observe that pavements behave in different ways when exposed to different frequencies or temperatures. When exposed to high frequency values (30 Hz), the mixtures had a shorter fatigue life. It was also observed that the pavement, when subjected to higher temperatures, presented lower stiffness and greater deformation, requiring fewer load applications to reach the failure condition. At lower temperatures (10°C), it was observed that stiffness influenced the increase in the number of applications necessary to reach rupture, indicating greater resistance of the mixture to fatigue. However, the stiffness from the asphalt binder and transmitted to the complete asphalt mixture caused different types of rupture.

**Keywords:** Flexible Pavements, Fatigue Life, Temperature, Frequency.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> - Tensões em um pavimento .....   | 17 |
| <b>Figura 2</b> - Curva típica de um ensaio de fadiga.....  | 18 |
| <b>Figura 3</b> - Estágios presentes no processo de fadiga .....  | 19 |
| <b>Figura 4</b> – Envelhecimento do ligante durante as fases de utilização .....                          | 28 |
| <b>Figura 5</b> – Composição química do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento ..... | 29 |
| <b>Figura 6</b> – Influência da temperatura nas propriedades do revestimento asfáltico .....              | 31 |
| <b>Figura 7</b> - Ensaio de fadiga por tração indireta por compressão diametral .....                     | 36 |
| <b>Figura 8</b> - Fluxograma da determinação das propriedades físicas dos materiais. ....                 | 38 |
| <b>Figura 9</b> - Fluxograma da dosagem Superpave. ....   | 39 |
| <b>Figura 10</b> - Fluxograma da caracterização mecânica da mistura. ....                                 | 39 |
| <b>Figura 11:</b> Corpos de Prova produzidos pelo autor.....  | 46 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| <b>Gráfico 1 :</b> Distribuição Granulométrica dos Agregados .....                 | 41 |
| <b>Gráfico 2:</b> Comparativo da viscosidade rotacional .....                      | 45 |
| <b>Gráfico 3:</b> Módulo de Resiliência.....                                       | 48 |
| <b>Gráfico 4:</b> Resistência à tração por compressão diametral.....               | 48 |
| <b>Gráfico 5:</b> Dano por umidade induzida da mistura asfáltica .....             | 49 |
| <b>Gráfico 6:</b> Análise do fenômeno de fadiga com a variação da temperatura..... | 50 |
| <b>Gráfico 7:</b> Análise do fenômeno de fadiga com a variação da frequência.....  | 51 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1</b> - Fatores que influenciam no comportamento à fadiga de pavimentos asfálticos ..... | 21 |
| <b>Tabela 2</b> - Relação dos ensaios realizados e as normas utilizadas. ....                      | 40 |
| <b>Tabela 3</b> - Massa específica dos agregados. ....   | 41 |
| <b>Tabela 4</b> - Índice de forma dos agregados. ....  | 42 |
| <b>Tabela 5</b> - Equivalente areia dos agregados. ....  | 42 |
| <b>Tabela 6</b> - Variação de massa do ligante após RTFO. ....                                     | 43 |
| <b>Tabela 7</b> - Caracterização física do ligante asfáltico. ....                                 | 43 |
| <b>Tabela 8</b> - Dosagem Superpave. ....  | 46 |
| <b>Tabela 9</b> - Resumo das informações da mistura. ....  | 47 |
| <b>Tabela 10</b> - Módulo de resiliência da MAC .....  | 63 |
| <b>Tabela 11</b> - Dano por umidade induzida (Lottman). ....                                       | 63 |
| <b>Tabela 12</b> - Resistência a tração por compressão diametral. ....                             | 63 |
| <b>Tabela 13</b> - Fadiga por compressão diametral realizada a 10°C. ....                          | 64 |
| <b>Tabela 14</b> - Fadiga por compressão diametral realizada a 25°C. ....                          | 64 |
| <b>Tabela 15</b> - Fadiga por compressão diametral realizada a 35°C. ....                          | 65 |
| <b>Tabela 16</b> - Fadiga por compressão diametral realizada com frequência de 10Hz. ....          | 65 |
| <b>Tabela 17</b> - Fadiga por compressão diametral realizada com frequência de 30Hz. ....          | 65 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | 13 |
| <b>1.1. OBJETIVO GERAL</b> .....  | 14 |
| <b>1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....   | 14 |
| <b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....   | 15 |
| <b>2.1. PATOLOGIAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS</b> .....                              | 15 |
| <b>2.2 FADIGA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS</b> .....                               | 16 |
| <b>2.3. FATORES INTERVENIENTES AO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO POR FADIGA</b> .....     | 21 |
| <b>2.3.1. LIGANTE ASFÁLTICO</b> .....   | 22 |
| <b>2.3.2. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA</b> .....      | 25 |
| <b>2.3.3. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA</b> .....                                     | 26 |
| <b>2.3.4. ENVELHECIMENTO DO LIGANTE ASFÁLTICO</b> .....                           | 27 |
| <b>2.3.5. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS</b> .....  | 30 |
| <b>2.3.6. CARREGAMENTO</b> .....  | 31 |
| <b>2.4. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE FADIGA EM PAVIMENTOS</b> ..... | 34 |
| <b>2.4.1. ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA FADIGA</b> .....                           | 35 |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | 38 |
| <b>3.1. MATERIAIS</b> .....   | 38 |
| <b>3.2. MÉTODOS</b> .....   | 38 |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | 41 |
| <b>4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS</b> .....                             | 41 |
| <b>4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LIGANTE ASFÁLTICO</b> .....                      | 42 |
| <b>4.3. DOSAGEM SUPERPAVE</b> .....   | 45 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....</b>                                  | <b>47</b> |
| <b>4.5. ENSAIO DE VIDA DE FADIGA.....</b>                                  | <b>49</b> |
| <b>4.5.1. PRIMEIRA CONSIDERAÇÃO: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA. .</b>            | <b>49</b> |
| <b>4.5.2. SEGUNDA CONSIDERAÇÃO: VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA .....</b>           | <b>50</b> |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                       | <b>52</b> |
| <b>6. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>                             | <b>53</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>8. ANEXOS .....</b>   | <b>63</b> |
| <b>8.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA ...</b>          | <b>63</b> |
| <b>8.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA ANÁLISE DO FENÔMENO DE FADIGA.....</b> | <b>64</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Um estudo realizado pela Confederação Nacional de Transportes (CNT) apontou que pavimentos com vida útil de cinco anos começam a apresentar problemas de desgaste em menos de sete meses. Em 2019 foram avaliados pela CNT 108.863 quilômetros de rodovias, das quais 54,2% apresentaram algum tipo de problema, sendo 35,0% classificadas como regular, 13,7% como ruim e 3,7% péssimo.

Fontes (2009) aponta que a adição de polímeros no ligante asfáltico otimiza o desempenho da mistura em aspectos específicos. Este é o caso do polímero SBS (estireno-butadieno-estireno). O SBS trata-se de um polímero elastômero que, quando adicionado ao ligante asfáltico, traz benefícios quanto à deformação permanente, trincas térmicas, envelhecimento e o objeto deste estudo – as trincas por fadiga (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo Gama (2016) o trincamento das misturas asfálticas devido ao dano por fadiga é um dos mecanismos de degradação mais encontrados nas rodovias. Nesse fenômeno os esforços repetidos de compressão vertical oriundos do tráfego pesado mobilizam esforços de flexão na camada de revestimento resultando na perda da resistência do material e, fazendo com que, ao longo do tempo, microtrincas se desenvolvam (BALBO, 2010). Esse fenômeno tornou-se ainda mais importante devido ao novo método de dimensionamento MeDiNa (método de dimensionamento brasileiro), que entrará em vigência no ano de 2021, que busca dimensionar os pavimentos levando em consideração as patologias do pavimento, tais como trincamento por fadiga.

De acordo com Hintz (2012) as trincas estão normalmente ligadas ao ligante asfáltico ou a interface ligante-agregado, conferindo ao material viscoelástico um papel fundamental no desempenho absoluto da fadiga do pavimento, no entanto, o seu comportamento na interpretação do processo é complexo já que depende de uma combinação de fatores (amplitudes de tensão/deformação, temperatura, taxa de carregamento e tempo). Estudos feitos por Hintz & Bahia (2013) indicaram que o tipo de ligante asfáltico modifica a resposta no comportamento da fadiga aumentando a resistência ao dano. Hintz (2012) para acrescentar encontrou resultados que o efeito dos modificadores varia significativamente dependendo das condições utilizadas no ensaio.

Elseifi et al. (2006) mostraram que a temperatura tem grande influência na resposta a resistência ao dano visto que o aumento da temperatura aumenta a parcela viscosa do comportamento viscoelástico, enquanto a redução da temperatura aumenta a parcela elástica, tornando o material mais rígido. Sua influência torna-se mais relevante

devido as grandes variações térmicas a que os revestimentos asfálticos são submetidos no Brasil e às diferentes condições de temperatura de campo e ensaios laboratoriais, pois os testes de fadiga são conduzidos a temperaturas fora da realidade de campo (BALBO, 2010). No que se refere a frequência, Al-Khateeb & Ghuzlan (2014) apontam que altas velocidades estão relacionadas a tempos de carregamento mais curtos e frequências mais altas.

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar o fenômeno de fadiga em diferentes condições de temperatura e frequência.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar as propriedades mecânicas da mistura asfáltica completa (MAC) por meio de ensaios laboratoriais;
- Analisar o desempenho à fadiga em diferentes temperaturas;
- Avaliar a influência da frequência de carregamento no desempenho a fadiga.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. PATOLOGIAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

Na engenharia de pavimentos, assim como nas diversas áreas da engenharia existe o ramo da patologia das estruturas que é uma ciência que tem por objetivo estudar os efeitos das situações, nas quais as estruturas mostram redução de sua performance (COSTA, 2018). Existem diversos fatores que interferem na vida útil do pavimento, variando desde os erros na fase do projeto ou construção como o controle de qualidade dos materiais (tipo de ligante asfáltico, teor e quantidade de vazios e propriedades dos agregados como adesividade e granulometria) e controle da etapa de usinagem até a compactação das misturas asfálticas (MARINHO FILHO, 2017).

As falhas nos pavimentos podem ser agrupadas em três categorias: deformação permanente, trincas por fadiga e trincas por origem térmica. O desenvolvimento dessas falhas no pavimento se mostra em um processo iterativo. A evolução de algum defeito dará origem a novos tipos de degradações, que por consequência, irá interferir com as características da degradação anterior, tanto em extensão como em evolução (MINHOTO, 2005).

De acordo com a norma do DNIT 005/2003 os principais defeitos nos pavimentos flexíveis podem ser separados em:

- Ondulação ou corrugação – são definidas como deformações descritas por ondulações no sentido transversal ao eixo da pista;
- Exsudação – é a migração do excedente do ligante asfáltico do revestimento para as camadas mais superiores e/ou profundas do pavimento;
- Desgaste – é a consequência de esforços tangenciais provocados pelo tráfego que leva à retirada progressiva do agregado do pavimento, reconhecido pela aspereza superficial do revestimento;
- Escorregamento – é provocado pelo deslocamento horizontal do revestimento provocado pela frenagem e aceleração dos veículos, gerando ondulações em formato de meia lua;
- Panela ou buraco - é a concavidade produzida no pavimento provocando a retirada da capa das camadas, podendo atingir as camadas mais profundas do pavimento gerando a desagregação dessas camadas;

- Remendo – é a panela preenchida com uma ou mais camadas de pavimento; sua operação é conhecida como “tapa-buraco”.
- Afundamento – conhecido como deformação permanente é descrita por uma depressão da superfície do pavimento, e pode ser seguida de solevamento e se apresentar de maneira plástica ou de consolidação;
- Fendas – caracterizadas como qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que leva ao aparecimento de pequeno ou grande porte, podendo ser apresentada de várias maneiras.

## 2.2 FADIGA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

O trincamento por fadiga é o segundo defeito mais encontrado nas estradas. Essa patologia é definida como a deterioração do revestimento submetido às tensões e deformações repetidas, resultando na redução da resistência do material gerando o surgimento de trincas (GAMA et al., 2018). Apesar de não ser a patologia que mais coloque em ameaça o conforto e segurança do usuário quando em escala reduzida, esta pode aumentar gerando problemas mais graves. As trincas em maior dimensão permitem o acúmulo de água e conseqüente enfraquecimento da estrutura, com a diminuição do módulo de rigidez das camadas granulares e subleito (GODOL, 2017).

A norma de restauração de pavimentos flexíveis DNIT 159/85 indica que dentre as fases de deterioração de uma estrutura, o trincamento por fadiga é o fator mais importante de sua instabilidade. Segundo o órgão, essa patologia muda rapidamente os estados de tensões e deformações das camadas e do conjunto, sendo o potencial residual da reflexão para a nova camada projetada um dos principais problemas na restauração dos pavimentos degradados.

Por um grande período, o trincamento por fadiga era atribuído às deformações plásticas em excesso apresentadas nas camadas granulares abaixo da camada de revestimento. No entanto, foi visto que as trincas são conseqüências, sobretudo, de altas deflexões reversíveis a que os pavimentos são sujeitos constantemente, que não são obrigatoriamente seguidas de deformações plásticas (SANTOS, 2015).

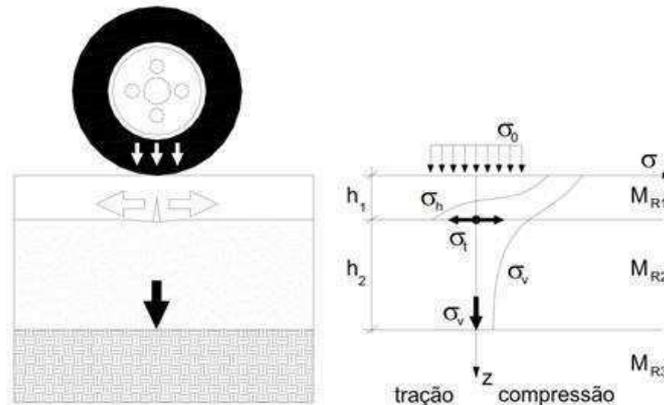
Na camada de rolamento são aplicadas cargas verticais de compressão devido à carga dos veículos, dessa maneira tensões de tração e compressão surgem nas fibras inferiores dessa camada. Devido a variação do tráfego, essas tensões possuem um momento de pico, e, após a passagem do veículo, cessam-se. Todo esse processo de

tensões repetidas é o responsável pelo fenômeno de fadiga nas misturas asfálticas. Esse feito é gradativo, ou seja, à medida que as primeiras trincas surgem no pavimento a tendência é o aumento da deterioração da estrutura de maneira rápida na proporção que a rodovia é solicitada, por isso deve ser controlado logo nas idades iniciais (BARROS, 2020).

O comportamento viscoelástico dos materiais asfálticos depende do tempo que a carga é aplicada e sua intensidade. Cargas cíclicas, por menores que sejam, provocam deformações no revestimento asfáltico, essas deformações seguidas em um pequeno espaço de tempo não permitem a recuperação elástica do material e acabam por provocar o surgimento de fissuras, com o passar do tempo elas se unem e formam o fenômeno de fadiga (BERNUCCI et al., 2008).

Geralmente, as trincas por fadiga aparecem primeiramente na superfície inferior da capa asfáltica (Figura 1), onde as forças de tração são maiores sob a carga da roda. Dessa maneira, fica evidente a tese de que os revestimentos asfálticos possuem maior resistência a carregamentos repetidos de compressão do que de tração (BERNUCCI et al., 2008).

**Figura 1** - Tensões em um pavimento



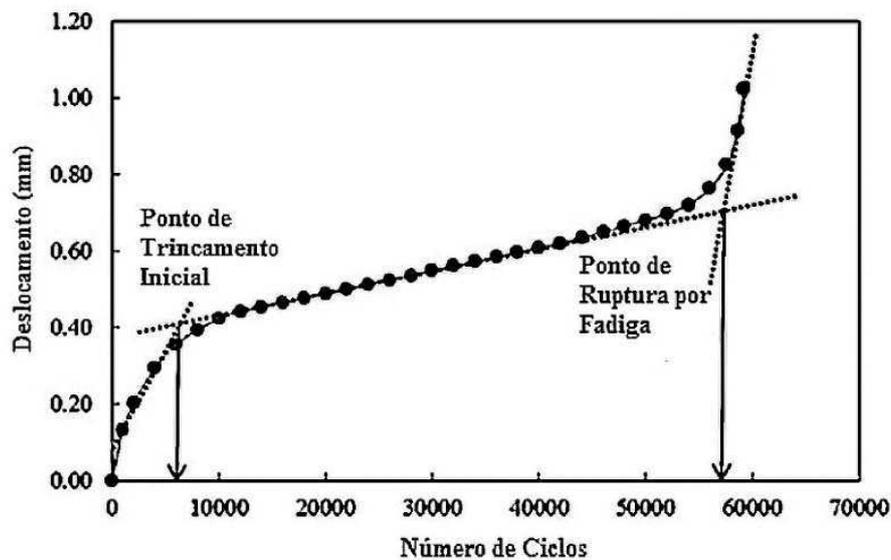
**Fonte:** Medina & Motta (2005)

O dano por fadiga em pavimentos asfálticos acontece devido a dois processos: aparecimento e propagação das trincas. De acordo com Huang et al. (2013) algumas das abordagens usadas para caracterizar essa patologia abrangem procedimentos fenomenológicos e a teoria da mecânica da fratura. O primeiro método está relacionado a parâmetros alcançados em ensaios de fadiga no qual ciclos de tensão ou deformação são aplicados na superfície da amostra, no modo de tensão ou deformação controlada com o objetivo de provocar a ruptura por fadiga.

De acordo com Pinto (1991) a fase inicial dos ensaios de fadiga, a qual o autor chama de “fase de condicionamento” corresponde a menos de 5% da vida útil do corpo de prova. Nesta fase existe um aumento das deformações permanentes com certa intensidade. Posteriormente, segue a “fase estável”, que corresponde a cerca de 70% do desempenho à fadiga do material e é identificada pelo aparecimento da primeira trinca visível na parte externa do corpo de prova. Por último, inicia a “fase de ruptura”, que corresponde a 25% do desempenho à fadiga e é caracterizada pelo acréscimo acelerado das deformações elásticas e plásticas e da ruptura total do corpo de prova ensaiado.

Para Gao & Ling, a Figura 2 mostra uma curva típica desse ensaio à tensão controlada, mostrando a relação deslocamento versus ciclos de carga.

**Figura 2** - Curva típica de um ensaio de fadiga



Fonte: Adaptado de Gao & Ling (2016)

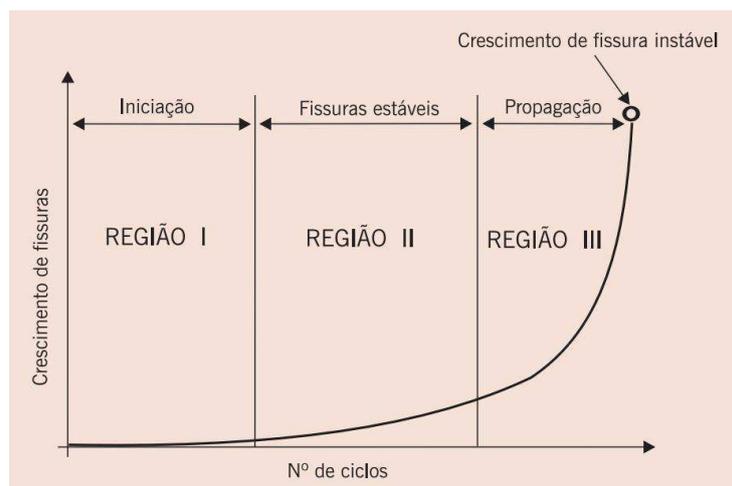
Na Figura 2 é possível observar três etapas: a primeira, onde o deslocamento cresce rapidamente até provocar a formação de uma trinca inicial; a segunda etapa é onde ocorre um aumento próximo à condição linear de deslocamento, procedimento que indica o crescimento progressivo de microtrincas para macrotrincas; e a terceira é onde o deslocamento aumenta muito rápido, indicando a ruptura da amostra ensaiada.

De acordo com Bernucci et al. (2008) o ensaio de ruptura por tração indireta produz cargas monotônicas que provocam trincas continuamente crescentes nos materiais de revestimento. Enquanto que, cargas cíclicas produzem danos intermitentes, ou seja, na fase de carregamento o dano cresce e na fase de descarregamento o dano fica constante, sem levar em consideração o efeito de “resselagem” das trincas (healing). Para os autores,

em uma estrutura imposta a um carregamento cíclico, diversos estágios (Figura 3) podem ser encontrados e evidenciados durante o processo de fadiga que são:

- Região I: ocorrência das primeiras mudanças microestruturais, formando microfissuras e a densidade dos deslocamentos aumenta, além disso tem início as zonas dos danos irreversíveis;
- Região II: aparecimento das microfissuras originadas pela coalescência das microfissuras;
- Região III: aumento das microfissuras levando o pavimento rapidamente ao colapso total.

**Figura 3** - Estágios presentes no processo de fadiga



**Fonte:** Bernucci et al. (2008)

A mecânica de fratura tem como premissa básica a que todos os materiais da engenharia se mostram inerentemente com falhas. Dessa maneira, a vida de fadiga indica o número de aplicações de carga ao qual o material em questão é submetido para o surgimento da falha inicial até um estágio crítico. Esse método usa um modelo empírico para a etapa de propagação das trincas, definida como Lei de Paris.

De acordo com a norma de defeitos em pavimentos flexíveis e semirrígidos, DNIT 005/2003, os defeitos provocados pelo fenômeno de fadiga podem ser divididos da seguinte maneira:

- Fenda: qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que leve à aberturas de pequeno ou grande porte, podendo se apresentar de diversas maneiras;

- Fissura: fenda de largura capilar presente no revestimento, posicionada longitudinal, transversal ou obliquamente ao eixo da via apenas evidente a vista desarmada de uma distância menor que 1,50m.
- Trinca: fenda presente no pavimento, facilmente perceptível à olho nu, com tamanho superior à da fissura, e pode mostrar-se sob a forma de trinca isolada ou interligada;
- Trinca isolada transversal: mostra direção majoritariamente ortogonal ao eixo da via. Quando possui extensão de até 100 cm é chamada de trinca transversal curta e quando for maior que esse valor é conhecida como trinca transversal longa;
- Trinca isolada longitudinal: sua direção é principalmente no sentido paralelo a via. Quando possui extensão de até 100 cm é chamada de trinca longitudinal curta e quando for maior que esse valor é conhecida como trinca longitudinal longa;
- Trinca interligada tipo “Couro de Jacaré”: conjunto de trincas ligadas sem direção definida, são semelhantes ao aspecto de couro de jacaré. Essas trincas podem apresentar, ou não, erosão grande nas suas bordas;
- Trinca de retração – são trincas que não estão relacionadas com o fenômeno de fadiga, mas a fenômenos de retração térmica ou do material do revestimento ou do material de base rígida/semirrígida subjacentes ao revestimento trincado.

O aparecimento das trincas retrata as diminuições da capacidade da camada asfáltica de suportar as cargas provenientes do tráfego. Porém, para a identificação das causas deste efeito é preciso ter atenção (ROSSATO, 2015). Segundo Bernucci et al. (2008) existem várias causas que podem provocar o começo do processo de trincamento por fadiga, além das grandes tensões produzidas pelo carregamento do tráfego e das condições climáticas, como:

- Falta de compactação do subleito e ou das camadas do pavimento, provocando um enfraquecimento da estrutura de maneira geral e fissuração precoce do revestimento;
- Falha na drenagem, gerando uma redução da resistência nas camadas afetadas pelo aumento da umidade;

- Incompatibilidade no projeto quanto à natureza e à espessura das camadas, sobretudo a camada de revestimento asfálticos em relação às outras camadas, onde a primeira é construída com uma pequena espessura e grande rigidez, diante à deformabilidade das outras camadas do pavimento decorrentes das solicitações de tráfego, conseqüentemente provocando grandes deformações no revestimento asfáltico, levando-o a ruptura;
- Revestimento asfáltico com teor de ligante menor que o determinado em projeto;
- Projeto de dosagem da mistura asfáltica inapropriado, podendo a quantidade de vazios permitir a entrada de água, mas não necessariamente facilitar a sua saída, levando a um acréscimo da poropressão da água para dentro dos vazios e conseqüentemente redução da resistência do material e;
- Temperatura de usinagem e compactação inadequadas, provocando o envelhecimento precoce do ligante a da mistura asfáltica como um todo.

### 2.3. FATORES INTERVENIENTES AO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO POR FADIGA

O fenômeno de fadiga em revestimentos asfálticos sofre uma influência de diversos fatores, alguns mais diretamente e outros de menor intensidade. Na Tabela 1 é apresentado alguns efeitos, que de acordo com Pinto (1991) podem influenciar de maneira direta a rigidez e o comportamento à fadiga das misturas asfálticas em ensaios de laboratório. Nesse tópico será apresentado alguns desses efeitos e outros balizadores do desempenho à fadiga.

**Tabela 1** - Fatores que influenciam no comportamento à fadiga de pavimentos asfálticos

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Fatores de carga</b>    | a) Magnitude do carregamento  |
|                            | b) Tipo de Carregamento; tensão ou deformação controlada                                |
|                            | c) Frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento |
|                            | d) Histórico de tensões: carregamentos simples ou composto                              |
|                            | e) Forma de carregamento: triangular, quadrado, etc.                                    |
| <b>Fatores de Misturas</b> | a) Tipo de agregado, forma e textura  |
|                            | b) Granulometria do agregado  |
|                            | c) Penetração do ligante asfáltico  |
|                            | d) Teor de ligante  |
|                            | e) Temperatura  |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>Fatores Ambientais</b> | a) Temperatura                         |
|                           | b) Umidade                             |
| <b>Outras Variáveis</b>   | a) Módulo de resiliência ou de rigidez |
|                           | b) Volume de vazios                    |

**Fonte:** Pinto, 1991

### 2.3.1. LIGANTE ASFÁLTICO

As propriedades da mistura asfáltica são bastante sensíveis à quantidade de ligante, e para Iwanaga (2007) o teor e o tipo de ligante asfáltico são os fatores mais relevantes no comportamento de fadiga dessas misturas.

As propriedades das misturas asfálticas são muito afetadas pela quantidade de ligante presente. Segundo Pinto (1991) o aumento no teor desse material, até determinado limite, pode proporcionar uma melhora no desempenho à fadiga. Para Capitão (2004) o aumento na quantidade de ligante asfáltico um pouco acima do teor ótimo determinado em projeto provocará uma resposta melhor à fadiga. Ainda segundo o autor, esse aumento é limitado pela diminuição do Módulo de Resiliência das misturas. No entanto, é preciso destacar que esse acréscimo no teor de ligante pode facilitar o aparecimento acentuado de trilhas de roda nos primeiros anos do pavimento.

Com as pesquisas atuais diversos produtos, entre eles polímeros e até mesmo materiais reciclados como borracha de pneu, estão sendo testados com o objetivo de modificar o ligante asfáltico para produzir um material pouco suscetível as variações climáticas, com boa flexibilidade em baixas temperaturas e que seja estável a altas temperaturas.

Os materiais poliméricos, segundo Morilha Junior (2004), podem ser de origem orgânica, vegetal ou sintética, e suas estruturas moleculares consiste na ligação por reação química de pequenas unidades. Existe uma grande diversidade de polímeros, cada um com suas propriedades próprias, mas, nem todos possuem características funcionais para a modificação de ligantes asfálticos. Ao final, pretende-se alcançar um ligante modificado, em maior ou menor grau de acordo com o tipo de polímero, com características de recuperação elástica, alto ponto de amolecimento, melhora na suscetibilidade térmica, maior adesão e sobretudo coesão das misturas asfálticas e aumento da resistência ao envelhecimento. Os polímeros mais usados como modificador de ligantes asfálticos é o EVA (polietileno-Vinil-Acetato), SBR (estireno-butadieno-rubber), SBS (estireno-butadieno-estireno) entre outros.

O procedimento de adicionar polímeros ao ligante asfáltico proporciona várias vantagens a esse material. O DNIT (1998) e a Asphalt Academy (2001) definiram as seguintes propriedades como sendo as mais importantes:

- Adesão: estes materiais também acrescentam a resistência da película de ligante, aumentando a adesividade deste ao agregado.
- Coesão: os ligantes modificados têm uma melhor capacidade de manter os agregados da mistura asfáltica unidos;
- Envelhecimento: com o acréscimo do polímero no ligante asfáltico há o aumento da viscosidade, incrementando a espessura da película sobre o agregado. Esta propriedade auxilia na proteção do revestimento contra o envelhecimento.
- Recuperação elástica: ao contrário do que acontece com os ligantes convencionais que não possuem comportamento dúctil, os ligantes incorporados com polímero asseguram a integridade do revestimento, mesmo quando submetido a altos níveis de deformação;
- Suscetibilidade térmica: a consistência do ligante modificado possui uma tendência de continuar inalterada diante uma grande variação de temperatura. Em climas quentes, o aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade tende a aumentar a resistência à deformação permanente. Em climas frios, o ligante mantém-se mais flexível e com isso há um aumento na resistência ao trincamento por fadiga.

Apesar das vantagens a modificação do ligante asfáltico com polímeros ainda não é uma prática universal, pois essa técnica aumenta significativamente o custo final do produto. Com isso, novos estudos são realizados a cada ano com materiais alternativos para viabilizar a modificação do ligante asfáltico, além do ponto de vista técnico, do ponto de vista econômico e ambiental. É o caso de estudos de ligantes modificados com borracha de pneus (BERTOLLO et al., 2003; SPECHT, 2004), lignina (LUZ, 2019), resíduo oleoso de petróleo.

A identificação de qual modificador gera um melhor comportamento nos pavimentos e de quais causas proporcionam determinados modificadores a mostrar os melhores resultados tem sido uma tarefa complicada de acordo com Bonetti *et al.* (2012). Alguns estudos realizados por Bahia *et al.* (2009) mostraram que o desempenho à fadiga muda de acordo com o tipo de ligante asfáltico, deixando em evidência que a composição

química tem um grande impacto no comportamento à fadiga. Os autores ainda identificaram uma diferença no desempenho ao trincamento por fadiga com a incorporação de diferentes modificadores a um ligante asfáltico convencional de PG 58. Neste estudo, os resultados dos ensaios de varredura de tempo feitos a deformação controlada mostraram que a modificação do ligante com SBS-linear, SBS-radial, SB-diblock, EVA, Polietileno e EMA aumentou a resistência ao dano por fadiga.

Hintz (2012) também estudou a tolerância ao dano de um ligante de base PG 64-22 modificado com diferentes agentes (SBS e Polietileno). Ele utilizou o ensaio de varredura de amplitude linear modificado (LAS) e verificou que houve um aumento na vida de fadiga devido a adição desses polímeros.

Bonetti *et al.* (2012) usaram o ensaio de varredura de tempo em dois níveis de frequência (10rad/s e 10 Hz) a deformação e tensão controlada para mostrar as vantagens de modificar o ligante asfáltico na avaliação do comportamento à fadiga. Eles usaram como agentes modificadores o SB, SBS radial, SB diblock, borracha moída e EVA; os resultados indicaram que houve uma melhora do ligante ao trincamento por fadiga, mas também, ficou evidente que o comportamento muda dependendo do tipo de modificador e também, das condições de ensaio.

Anderson *et al.* (2011) verificou o aumento da vida de fadiga em ligantes modificados com 4% de SBS e 4% de EVA com ensaios de varredura de tempo a deformação controlada. Já Youtcheff *et al.* (2014) realizaram ensaios de flexão em viga de quatro pontos em misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados por Elvaloy (2,2%), SBS (3,75%), EVA (5,5%) e borracha moída (5,0%), e verificaram o aumento da vida de fadiga com destaque para o ligante modificado com Elvaloy que mostrou os melhores resultados.

Os ligantes modificados com polímeros naturais também apresentam bons desempenhos em relação ao trincamento por fadiga. Isso pode ser verificado no estudo de Luz (2019) que adicionou diferentes tipos e teores de lignina (*Pinus* e *Eucalyptus*) no ligante asfáltico convencional de base PG 64-22. A autora utilizou o ensaio de varredura de amplitude linear modificado (LAS) e verificou que houve um aumento da resistência à fadiga com os ligantes modificados, independentemente do tipo e teor de lignina usada.

### 2.3.2. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A distribuição dos agregados é uma das grandes responsáveis pelo bom desempenho dos pavimentos. Quando este arranjo é bem executado e aplicado de maneira apropriada, deve produzir estruturas duradouras em sua vida de serviço (SPECHT, 2004). Para que isso ocorra é necessária uma análise de cada condição de uso.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010) a distribuição dos grãos é uma das propriedades mais principais e efetivas que influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Ainda segundo os autores, a granulometria dos materiais interfere em quase todas as características importantes, abrangendo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc.

Cada agregado possui propriedades específicas que contribui para a boa performance ou não dos pavimentos. O material escolhido para ter sua utilização justificada na pavimentação de estradas deve mostrar características de maneira que suportem tensões postas na superfície do pavimento e também em seu interior. Porém, a performance dos agregados é dependente da sua composição, de como são confeccionados, mantidos unidos e das condições sob as quais irão atuar (ROSSATO, 2015).

Para Kim & Khosla (2002) os agregados mais rugosos irão produzir misturas asfálticas com maior resistência à fadiga, devido à maior adesividade ao ligante asfáltico. Além disso, os autores verificaram que materiais angulares mostram melhores desempenhos que os arredondados, nos quais as falhas geralmente acontecem na ligação do ligante asfáltico.

Soares *et al.* (2010) estudaram a influência provocada pelos agregados nas misturas asfálticas usando diferentes faixas granulométricas: A, B e C do DNIT, concluindo que misturas mais finas como é o caso da faixa C, mostram melhor performance frente ao trincamento por fadiga. Preussler & Pinto (2010) também analisaram diferentes faixas granulométricas nas misturas asfálticas e os resultados mostraram que a granulometria fina possui uma taxa de propagação de trincas menor do que àquelas com os agregados mais graúdos.

As propriedades de forma dos agregados influem de maneira direta no comportamento mecânico e na estabilidade dos pavimentos asfálticos. Essa influência acontece devido o travamento dos agregados dentro da mistura asfáltica. Assim, na

maioria dos casos, é esperado que os agregados satisfaçam às exigências mínimas dos ensaios de Abrasão Los Angeles, Sanidade, Equivalente Areia, sejam mais angulares e que tenham uma forma menos lamelar, além de serem rugosos (ROSSATO, 2015).

### 2.3.3. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

A temperatura é um parâmetro essencial pois ela age de maneira direta no comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, já que estas herdam as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico que contêm, formando materiais termossusceptíveis, isto é, as suas propriedades sofrem influência da temperatura. Quando as temperaturas são demasiadamente baixas, as misturas tendem a apresentar uma rigidez elevada e um comportamento elástico sob solicitação normal do tráfego. Essa situação pode provocar uma fragilidade ao material devido à rigidez excessiva do ligante asfáltico

Como esse parâmetro influencia diretamente nas propriedades do ligante asfáltico, é possível falar que o aumento da temperatura pode tornar o ligante menos rígido e essa rigidez está relacionada com o comportamento da mistura asfáltica com o trincamento por fadiga. Esta hipótese pode ser entendida de acordo com uma limitação de valor máximo do parâmetro  $G^*\sin\delta$  da metodologia Superpave.

Anderson *et al.* (2011) indicaram que a vida de fadiga é aumentada com o aumento da temperatura se os ensaios são realizados no mesmo nível de deformação. Para essa análise foram realizados ensaios de fadiga em ligantes asfálticos modificados no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e os resultados mostraram um aumento da vida de fadiga a medida que ocorria incremento da temperatura até um valor máximo, após este valor a fadiga diminuía consideravelmente.

Bonnetti *et al.* (2012) realizaram ensaios de fadiga no ligante asfáltico e constataram que há uma influência significativa da temperatura no processo de fadiga do material, no entanto, esse efeito é dependente do tipo de agente modificador e também dos níveis de tensão usados.

Em outro estudo realizado por Bodin *et al.* (2014) foi analisado as variações na temperatura em ligantes asfálticos no decorrer do ensaio de fadiga. Estas alterações na temperatura podem estar ligadas ao processo de dissipação de energia durante o ensaio. Os autores verificaram que os resultados dos ensaios de varredura de deformação realizados na frequência de 25Hz indicaram que a temperatura do material começou a aumentar a partir de 0,004 de deformação nas condições do ensaio. Já para o ensaio realizado na frequência de 1Hz não foi verificado efeitos da temperatura, mesmo dentro

da região não-linear. Com isso, foi concluído que a variação da temperatura só interfere quando combinada com altas frequências e altas deformações.

Em laboratório, também tem sido mostrada a influência da temperatura sobre o comportamento das misturas asfálticas no processo de trincamento por fadiga. Porém, vale destacar que para qualquer geometria usada referente ao corpo de prova de um determinado ensaio, o efeito da temperatura será diferente de acordo com a maneira de solicitação considerada, ou seja, com deformação ou tensão controlada (De La ROCHE, 1996).

Tayebali *et al.* (1994) executaram ensaios de fadiga com vigas a quatro pontos com o controle do deslocamento e variações na temperatura (5°C e 25°C). Os resultados mostraram que para um determinado nível de deformação, a resistência ao trincamento por fadiga das misturas asfálticas cresce juntamente com o aumento da temperatura e, a inclinação da curva da vida de fadiga aumenta quando ocorre um decréscimo da temperatura. Além disso, verificaram que a redução da vida de fadiga com o acréscimo do nível de deformação é menos importante, quando em comparação ao efeito do aumento da temperatura.

Outro estudo realizado por Domec (2005) verificou o comportamento à fadiga de misturas asfálticas com variação da temperatura (0°C, 10°C, 20°C e 30°C) por meio de ensaios com vigas a dois pontos. Foi visto uma redução progressiva da resistência ao trincamento por fadiga até uma temperatura considerada crítica de 10°C, levando em consideração não apenas o efeito do nível de deformação correspondente ao deslocamento aplicado, como também sobre as variações de rigidez do material.

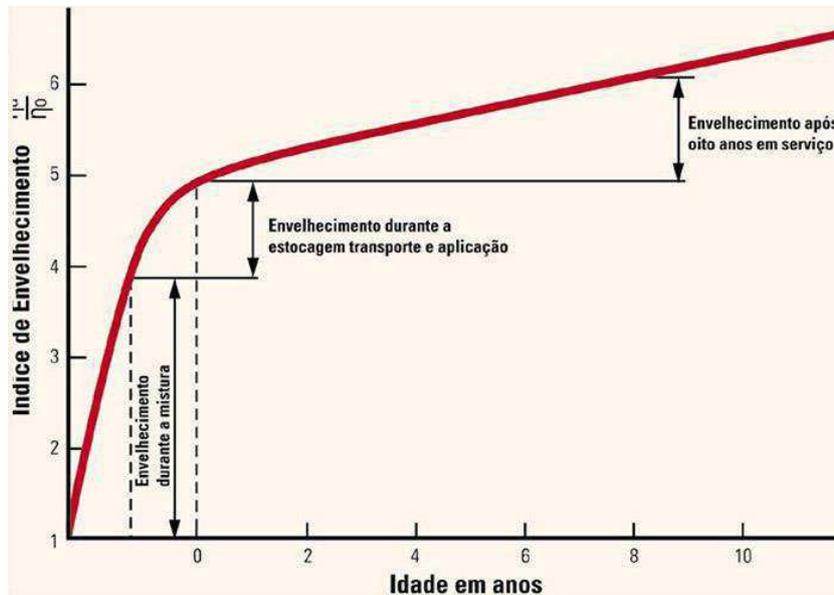
#### **2.3.4. ENVELHECIMENTO DO LIGANTE ASFÁLTICO**

Outro fator muito importante é o envelhecimento do ligante asfáltico, sobretudo em relação à performance desse material frente ao processo de trincamento por fadiga. A exposição solar, a presença de oxigênio e a ação de agentes químicos atuam de maneira direta na estrutura molecular da mistura asfáltica. A camada do revestimento asfáltico, com o passar do tempo, deteriora-se e perde os componentes elásticos, chamados maltenos, e aumenta a rigidez da camada (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Gigante (2007) o fenômeno de envelhecimento da camada asfáltica é dividido em duas etapas bem definidas: a curto e a longo prazo. A primeira está ligada ao processo de transporte e usinagem do ligante asfáltico, onde acontece a maior parte do envelhecimento devido às altas temperaturas que o material é submetido em um breve

espaço de tempo. Já a segunda etapa de fenômeno que é a de longo prazo está relacionada à exposição do revestimento asfáltico como um todo aos agentes químicos e intempéries, no decorrer de toda a sua vida de serviço (Figura 4).

**Figura 4** – Envelhecimento do ligante durante as fases de utilização



Fonte: Morilha Junior, 2004.

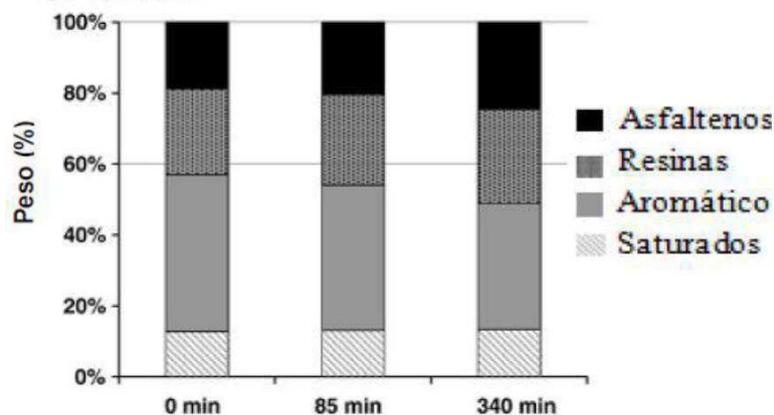
Ainda segundo Gigante (2007) o processo de envelhecimento do ligante asfáltico é baseado em 8 mecanismos:

- Oxidação: reação do oxigênio com o ligante. A taxa de reação depende do tipo de ligante utilizado e sua temperatura;
- Volatilização: é o processo de evaporação dos componentes leves do ligante asfáltico que depende da temperatura do sistema;
- Polimerização: é a associação de moléculas semelhantes que formam moléculas maiores, provocando o enrijecimento progressivo;
- Tixotropia: é o envelhecimento que ocorre por conta da produção de estruturas no ligante, usualmente acontece em revestimentos com pequena ou nenhuma solicitação;
- Sinerese: reação de exsudação, onde os líquidos oleosos do ligante asfáltico emergem para a superfície do filme asfáltico, deixando a fração mais densa;
- Separação: retirada dos constituintes oleosos, resinas ou asfaltenos do ligante relacionada à absorção seletiva dos poros presentes nos agregados.

De acordo com Cravo (2016) na etapa a curto prazo ocorre tanto o processo de oxidação como o de volatilização e na etapa a longo prazo o aumento da rigidez ocorre sobretudo o processo oxidativo. Durante o processo de oxidação dos ligantes asfálticos, a concentração de grupos com funções químicas polares aumenta, ou seja, as frações mais leves sofrem evaporação, e por oxidação parte dessas frações se transformam em resinas, e logo em seguida em asfaltenos. Por isso, as moléculas ou aglomerados moleculares perdem a mobilidade necessária para fluir um após o outro sob tensão mecânica ou alta temperatura. Isso faz com o ligante fique fragilizado tornando-o mais susceptível a trincas e fraturas (TAREFEDER & ARISA, 2011).

Na Figura 5 é apresentado o peso das frações, em percentagem, de um determinado ligante pelo tempo de envelhecimento em minutos, onde é possível notar que a composição química sofre alteração devido ao envelhecimento.

**Figura 5** – Composição química do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento



Fonte: Morilha, 2004.

Em se tratando do fenômeno de fadiga, Raad *et al.* (2001) afirma que não depende apenas do enrijecimento e das propriedades das misturas, mas também, dos módulos de resiliência das camadas que foram o pavimento como um todo. Camadas mais espessas formam pavimentos muito resilientes, provocando grandes deflexões e conseqüentemente acelera o fenômeno de fadiga.

O estudo de Tonial *et al.* (2001) é um ótimo exemplo de como o envelhecimento de ligantes asfálticos influencia no processo de fadiga. Os autores, com base em dados de campo de trechos experimentais, estudaram a performance à fadiga para pavimentos de variadas espessuras de revestimento asfáltico após vários anos de envelhecimento. Foi verificado que após 5 anos da liberação do tráfego dos veículos, ocorreu uma redução

significativa na resistência ao trincamento. Segundo a pesquisa essa queda foi devida principalmente ao envelhecimento da mistura asfáltica. Também concluíram que as principais causas desse envelhecimento são: temperatura e exposição ao ar, pois elas provocam a oxidação do ligante e, por consequência, o aumento da viscosidade que provoca uma queda do desempenho à fadiga da mistura. O estudo ainda observou que o envelhecimento é mais acelerado para altas temperaturas, no entanto, foram encontradas condições de campo que indicam temperaturas mais baixas e grande exposição ao ar, provocando um envelhecimento mais lento.

O envelhecimento do ligante asfáltico vai depender do tipo e qualidade do material, das condições climáticas e da mistura. A grande proporção de ligante e um reduzido volume de vazios também pode retardar o processo de oxidação, aumentando a durabilidade do material (FONTES, 2009).

Ensaio de fadiga feitos por Bahia et al. (1999) em um ligante asfáltico convencional mostraram variações no desempenho à fadiga depois de simulado um envelhecimento do material a longo prazo. Os resultados dos ensaios de varredura de tempo mostraram que o envelhecimento no PAV (*Pressure Aging Vessel*) fez com que aumentasse o dano por fadiga no ligante, sobretudo em níveis reduzidos de deformação.

Para Soenen e Eckman (2000) após o envelhecimento, os coeficientes angulares da reta dos modelos de fadiga são maiores quando comparados antes do procedimento. Com isso, amostras envelhecidas tender a ter maior resistência à fadiga em baixos níveis de deformação, mas para níveis elevados de deformação as amostras envelhecidas são mais susceptíveis ao trincamento.

### **2.3.5. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

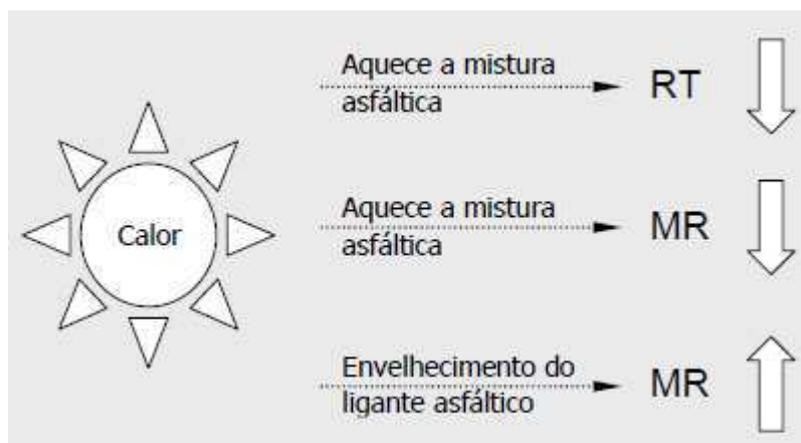
A performance dos pavimentos asfálticos é resultado do comportamento conjunto das cargas do tráfego, da idade, das propriedades das camadas, da manutenção realizada e, em especial do clima. Medina e Motta (2015) sinalizam que as ações do clima e do tráfego, quando concordadas, formam as causas determinantes da vida útil dos pavimentos.

Existem alguns conceitos que, reunidos de várias maneiras, são usados na definição de clima como: temperatura do ar e a quantidade de chuva. A temperatura é um dos parâmetros que merece destaque no dimensionamento de pavimentos pois, ela possui um comportamento específicos nas misturas asfálticas e por consequência na deformação da estrutura, assim como no seu desempenho final (MEDINA & MOTA, 2015).

Segundo Balbo (2010) os materiais asfálticos são termossusceptíveis, ou seja, são materiais que alteram seu comportamento elástico devido a mudanças de temperatura. Para isso, o autor exemplifica o caso da cidade de São Paulo onde os pavimentos asfálticos são submetidos a grandes mudanças térmicas, pois ao longo de um ano foi verificado uma variação entre 10°C e 60°C. No caso de cidades localizadas em regiões de clima temperado essa mudança diminui, ficando entre 25°C a 55°C. Outro problema verificado são as diferenças de temperatura encontradas em campo e laboratório nos testes de fadiga, pois estes são conduzidos a temperaturas que não condizem com a realidade em campo por conta, muitas vezes, de dificuldades tecnológicas do ensaio.

Para Medina & Motta (2015) o acréscimo da temperatura do ar pode interferir de várias maneiras no comportamento da mistura asfáltica, como é observado na Figura 6. A maior interferência está ligada com a diminuição do Módulo de Resiliência (MR), que por sua vez, eleva as deformações de tração provocadas na base do revestimento asfáltico. Também, está ligada à diminuição da Resistência à Tração. O efeito do envelhecimento do ligante asfáltico pela exposição solar ainda pode provocar efeitos como o enrijecimento da mistura asfáltica como já visto anteriormente.

**Figura 6** – Influência da temperatura nas propriedades do revestimento asfáltico



**Fonte:** Franco, 2007.

### 2.3.6. CARREGAMENTO

A intensidade do carregamento cíclico impulsiona o aparecimento de trincas e pode chegar a proporcionar o colapso da estrutura do pavimento devido a sobreposição de defeitos. O pavimento é exposto a uma variação muito grande de carregamentos devido ao tráfego dos veículos, e dessa maneira as tensões e frequências de carregamento também são muito variáveis (MEDINA & MOTA, 2015).

Tentar prever e modular o tráfego a que um pavimento será submetido é uma tarefa complexa e sinuosa pois, vários fatores influenciam nessa estimativa da evolução do tráfego de uma rodovia, Soares (2007) lista diversos motivos que dificultam a execução de um bom dimensionamento referente ao carregamento da estrutura:

- A previsão do aumento do tráfego e do volume de carga transportada ao decorrer do tempo;
- As infrações recorrentes da carga máxima permitida para cada tipo de veículo;
- Heterogeneidade das configurações dos eixos dos veículos que formam a frota, com diversa variação de formas de eixo, com variação da quantidade de rodas, diversos tipos de pneus e com diferentes pressões de calibração; e
- Mudanças na velocidade de translação das cargas de eixo, condicionadas pela geometria da via.

A solicitação do pavimento tem grandezas e pressões diferentes, mudando com a carga, configuração dos eixos e dos pneus. No entanto, ainda é visto episódios de deslocamentos laterais em função da largura da faixa de rolamento e da bitola do eixo dos veículos que influenciam no aparecimento de trincas no revestimento asfáltico (ROSSATO, 2015).

Yu & Zou (2013) mostram que o dano acumulado gerado pela ação dos carregamentos dos veículos provoca alterações graduais nas propriedades de resistência e rigidez da mistura asfáltica. A vida de fadiga necessita considerar a maneira com que a carga e os níveis de tensão mudam no decorrer da aplicação da carga, isto é, do modo de carga.

Existem alguns parâmetros laboratoriais que, segundo Preussler & Pinto (2010) são os motivos principais da redução gradual da performance à fadiga dos revestimentos asfálticos devido a carga aplicada: magnitude e tipo de carregamento, frequência, duração e intervalo entre as aplicações sucessivas do carregamento, histórico de tensões (carregamento simples ou composto) e a maneira de carregamento (triangular, quadrada etc.).

Ao se analisar o efeito dos diferentes carregamentos no fenômeno de fadiga em laboratório é possível levantar duas hipóteses: tensão constante ou deformação constante. No entanto, o tráfego de veículos é principal causador do processo de ruptura por fadiga

nos pavimentos asfálticos, já que têm início e desenvolvimento na camada de maior rigidez da estrutura, a qual recebe de maneira direta suas solicitações.

#### 2.3.6.1. FREQUÊNCIA DE CARREGAMENTO

As respostas dos materiais, sobretudo os viscoelásticos, é relativa à taxa de carregamento ou frequência. Esta, em conjunto com a temperatura, são os parâmetros que mais influenciam na rigidez das misturas asfálticas. Para Pinto (1991) existe uma diferença gritante do desempenho à fadiga das misturas asfálticos em campo e laboratório. Em campo as condições são muito diferentes daquelas em que as misturas são submetidas em laboratório, como as mudanças de temperatura, presença de cargas estáticas e o fenômeno de recuperação das trincas devido à falta de cargas sob o pavimento por alguns períodos da sua vida útil.

Balbo (2010) exemplifica essas diferenças entre campo e laboratório de maneira muito precisa. No exemplo o autor leva em consideração um eixo simples de rodas duplas do cavalo e o eixo tandem triplo de um semirreboque. Ele supôs que o veículo tinha uma velocidade média de 80 km/h, com isso os tempos decorridos entre as passagens sucessivas de 4 eixos isolados foram de 0,4545s entre o primeiro e o segundo eixo e de 0,0591s entre os demais eixos, logo a média foi em torno de 0,1909s entre cada eixo, sinalizando uma frequência de 5Hz. No entanto, o autor simulou ainda uma via com 17280 caminhões desse tipo trafegando diariamente, isso indicou 5s entre os caminhões. Outras simulações foram para os casos de 2880 e 720 caminhões por dia, onde entre os veículos foi verificada uma diferença de 30 e 120s de afastamento. Todo esse estudo deixa em evidência que em termos de frequência existe uma variação enorme entre laboratório e campo.

A frequência está ligada com a velocidade do tráfego, e esta pode alterar significativamente no campo. Frequências altas estão relacionadas a velocidades de tráfego altas e frequências baixas a velocidades de tráfego baixas. Para 60 mph (96,5 km/h) a frequência equivalente do ensaio seria de 10 Hz. Para tráfego lento (15 mph ou 24,1 km/h) a frequência é de 2,5 Hz (DELGADILLO & BAHIA, 2005).

Resultados dos ensaios de fadiga a deformação controlada feitos por Bahia et al. (1999) em ligantes asfálticos modificados, alterando a frequência entre 0,1, 1 e 10 Hz com 20% de deformação, indicaram uma grande expressividade no efeito da frequência. Para os autores, o ligante modificado com polietileno quando ensaiado a uma frequência de 10Hz, mostrou uma redução do Módulo Complexo em torno de 10 vezes em relação

ao módulo inicial ( $G^*$ ) após 3000 ciclos. Já para a frequência de 1Hz esse mesmo ligante mostrou uma variação do módulo menor com o mesmo nível de deformação. Assim, concluíram que a variação do módulo com o número de ciclos é mais relevante para frequências altas.

Embora existam menos estudos sobre a influência da taxa de carregamento sobre a resistência à fadiga das misturas asfálticas do que, por exemplo, sobre a temperatura, Doan (1977) deixa evidente uma tendência: o efeito é simétrico à variação da temperatura, isto é, com o aumento da frequência existe um aumento da resistência à ruptura para os ensaios com controle de tensão, enquanto reduz para os ensaios realizados com o controle de deformação.

Domec (2005) em seu estudo sobre o dano por fadiga das misturas asfálticas sob condições de tráfego simulado e de temperatura, ao executar ensaios de fadiga a dois pontos com o controle do deslocamento, para prever a taxa de deterioração com as correlações das variáveis de temperatura ( $10^{\circ}\text{C}$  e  $19,2^{\circ}\text{C}$ ) e frequência (25 Hz e 40Hz). Os resultados mostraram que para uma mesma temperatura existe um acréscimo da deformação admissível calculadas para  $10^6$  ciclos, à medida que reduz a frequência de solicitação. No entanto, o efeito da variação da resistência à ruptura não pode ser considerado proporcional à variação do módulo em função da frequência para os ensaios de fadiga a dois pontos com o controle de deformação.

Esses dois estudos deixam em evidência que apenas o valor do módulo de rigidez inicial de uma mistura asfáltica não pode prever a evolução do seu comportamento à fadiga, deixando claro que esse fenômeno é influenciado por diversos fatores simultaneamente.

Como a taxa do carregamento possui um papel fundamental na deterioração do revestimento asfáltico e as cargas são aplicadas no pavimento em uma frequência variada, conseqüentemente existe, também, um tempo variado onde o pavimento não sofre nenhuma aplicação de carga. Em laboratório esse período de relaxação não é considerado no processo de fadiga (BALBO, 2010).

## **2.4. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE FADIGA EM PAVIMENTOS**

Para a definição do desempenho à fadiga os ensaios laboratoriais são o melhor recurso para prever essa patologia. Segundo Schuster (2018) por conta das solicitações

provocadas pelo tráfego, simulações com carregamentos de tração e compressão são realizadas alterando várias características e parâmetros dos materiais. A função principal destes ensaios é a aplicação de cargas cíclicas com o objetivo de estudar melhor a propagação do dano dos materiais, até sua posterior ruptura.

No entanto, existem diversos obstáculos para reproduzir as condições de campo no laboratório. Os estudos hoje ainda estão muito limitados no que diz respeito a simulações das condições de tráfego, carregamento, temperatura, *healing*, entre outros fatores, e por isso fazem uso de correlações campo-laboratório. No entanto, estas correlações nem sempre são fidedignas, por isso a necessidade de aumentar as simulações com variação de parâmetros para poder representar de maneira fiel em laboratório as situações encontradas em campo.

Existem, atualmente, diversos ensaios para a avaliação de fadiga, tanto em misturas asfálticas como nos ligantes, com diferentes aplicações e maneiras de carregamento.

## **2.4.1. ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA FADIGA**

### **2.4.1.1. TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

O ensaio de tração indireta para determinação da resistência à fadiga de misturas asfálticas é feito por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. A simplicidade do processo de preparação das amostras e dos equipamentos, juntamente com o fácil entendimento do ensaio, fez com que fosse adotado como o mais realizado no Brasil (BERNUCCI et al., 2008).

Este teste é regido pela norma DNIT – ME 183/2018, foi utilizada a prensa UTM-25 para realização do ensaio, que consiste em aplicar cargas cíclicas repetidas na amostra cilíndrica, alterando os carregamentos e mantendo a frequência de aplicação de 1 Hz à uma temperatura de 25°C. Para isso, são usados níveis de tensão correspondente a cargas alterando de 5% a 40% da resistência à tração da mistura asfáltica em análise.

Outro ponto favorável a esse ensaio é a possibilidade de ser feito no mesmo equipamento que determina o Módulo de Resiliência de misturas asfálticas (Figura 7), permitindo para alguns equipamentos, a possibilidade de determinar o desempenho à fadiga pelos dois padrões de carregamento: Tensão controlada e Deformação controlada (LOUREIRO, 2003).

**Figura 7** - Ensaio de fadiga por tração indireta por compressão diametral



**Fonte:** Acervo do autor (2021)

Apesar da facilidade de execução do ensaio, ele recebe muitas críticas. Durante a aplicação das cargas, ocorre o aparecimento de deformação permanente nos frisos de carregamento, podendo comprometer a interpretação do potencial de trincamento do material. Além disso, para aplicação de cargas superiores a 30% da resistência à tração, a parte viscosa do material predomina, inviabilizando a avaliação correta quanto à resistência à fadiga da mistura asfáltica (TAYEBALLI et al., 2014).

Apesar das críticas, Rossato (2015) destaca que este é o ensaio que mais se aproxima das condições de solicitação de campo produzidas na fibra inferior do revestimento. Por se tratar de um dos métodos laboratoriais mais usuais na análise do desempenho à fadiga de misturas asfálticas adotou-se esse modelo, a tensão controlada, para a realização da pesquisa.

#### 2.4.1.2. FLEXÃO EM VIGAS 4 PONTOS

Este ensaio consiste em submeter uma vigota da mistura asfáltica a uma carga vertical no terço médio da viga, semelhante a metodologia utilizada no ensaio de flexão em viga 4 pontos usado em concreto de cimento Portland. O ensaio é realizado seguindo as normas AASHTO T 321-17, ASTM D 7460-10 e a EM 12697:24-10. É induzido um estado de tração uniforme na parte central da amostra, acima da linha neutra, zona onde o momento fletor é constante e não existem tensões de cisalhamento sendo por isso mais propenso a ter propagação de micro e microfissuras (MELO, 2014).

Dessa maneira, é possível medir a força máxima aplicada e a deformação no centro da viga e com base nestes parâmetros, a medição da rigidez à flexão da viga. O

ensaio é feito com frequências de 5 e 10 Hz e a temperatura de 20°C em vigotas com medidas de comprimento de 380 mm, largura de 63 mm e altura de 50 mm. Além disso, pode ser feito tanto a tensão controlada como a deformação controlada a partir do uso de LVDT's, aplicando-se cargas senoidais de frequência variável. Devido a sua forte correlação laboratório-campo e a sua facilidade de execução, este é o ensaio mais difundido mundialmente na atualidade.

#### 2.4.1.3. ENSAIO DE TRAÇÃO – COMPRESSÃO DIRETA

O ensaio cíclico de tração-compressão direta foi idealizado e desenvolvido pelo professor Richard Kim da universidade da Carolina do Norte, nos Estados Unidos. Segundo Mocelin (2018) um ponto diferencial neste procedimento é a questão de ser um ensaio constitutivo, que define propriedades fundamentais das misturas asfálticas quando ensaiadas.

A norma que rege este ensaio é a AASTHO TP-107/2014, sua realização consiste na aplicação de carregamentos cíclicos de tração e compressão em corpos de prova com uma frequência de 10 Hz, temperatura definida por meio do PG e deformação controlada. Para que seja possível a aplicação de esforços de tração e compressão, o corpo de prova é colado em pratos fixadores. A norma sugere que sejam ensaiados 3 corpos de prova com deformações controladas distintas e que o critério de parada do ensaio, seja a queda do ângulo de fase ou o completo rompimento do corpo de prova

Por meio dos dados medidos do ângulo de fase e módulo dinâmico e utilizando a teoria do dano contínuo em meio viscoelástico simplificada (S-VECD) desenvolvida pelo professor Richard Kim, são plotados gráficos de dano (S) versus integridade (I), que são propriedades intrínsecas do material. Este protocolo tem se desenvolvido bastante durante a última década e tem se tornado uma ferramenta valiosa para o dimensionamento dos pavimentos asfálticos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAIS

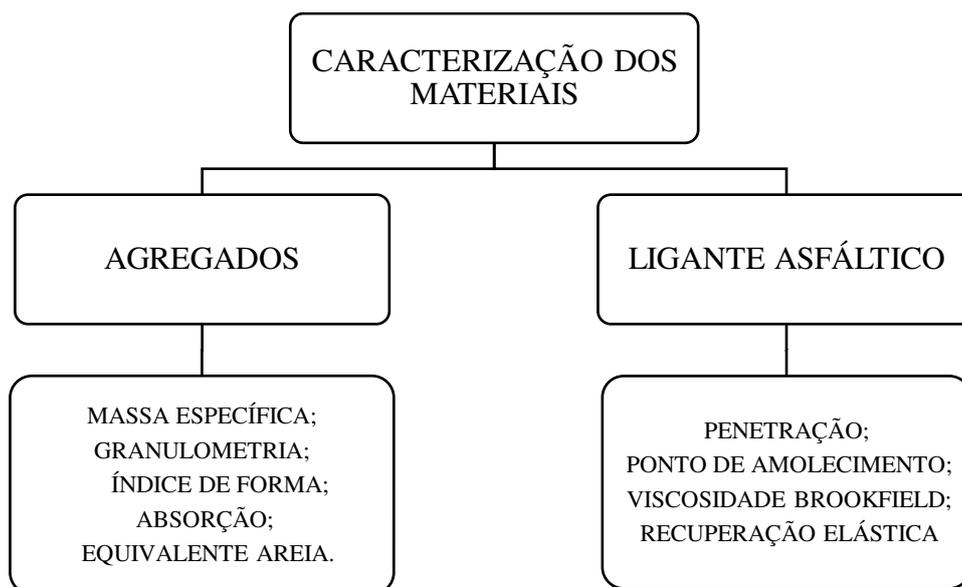
- Ligante Asfáltico: foi utilizado o AMP 55/75-E;
- Agregados: foram utilizados agregados graúdos e miúdos (brita 19, brita 12,5, areia, pó de pedra e filler – cal hidratada) para a composição da mistura asfáltica;

#### 3.2. MÉTODOS

Todos os ensaios realizados durante esta pesquisa foram desenvolvidos no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Todos os procedimentos foram feitos seguindo especificações da Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT), do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) e da American Society of Testing and Materials (ASTM). As fases experimentais serão apresentadas a seguir.

Inicialmente, foi feita a determinação das propriedades físicas dos materiais, conforme ilustrado na Figura 8.

**Figura 8** - Fluxograma da determinação das propriedades físicas dos materiais.

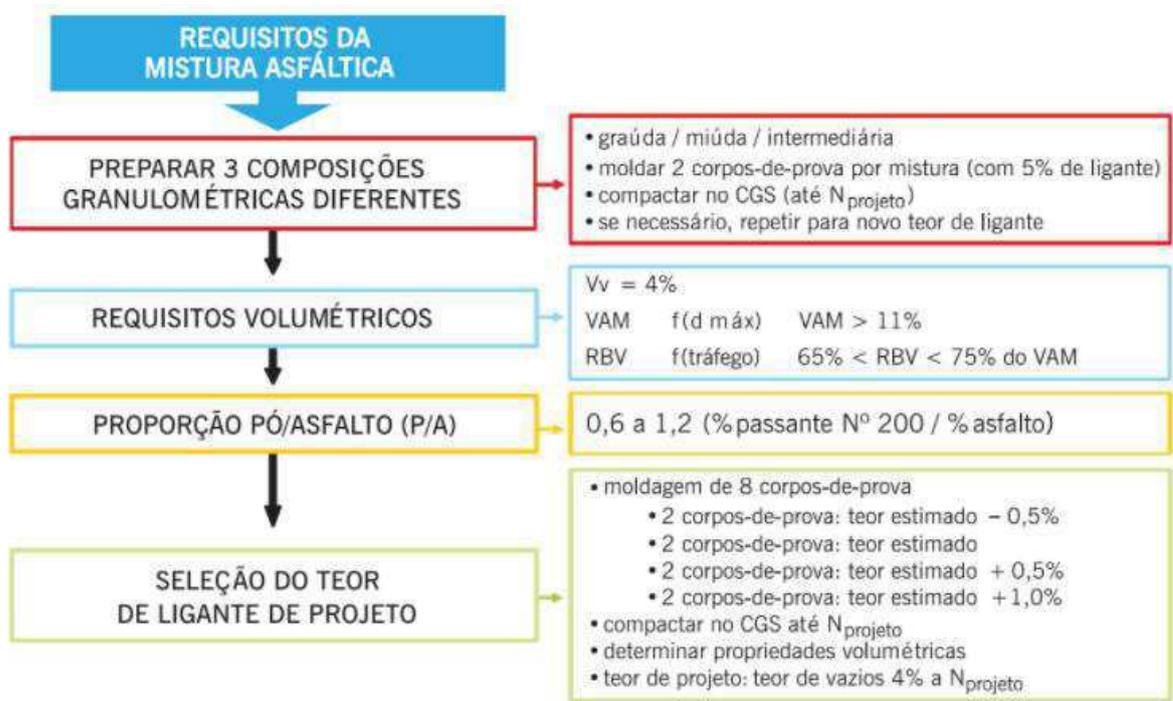


**Fonte:** Acervo do autor (2021)

Considerando que o pavimento possui tráfego médio a alto, o volume de tráfego adotado para o pavimento influencia na quantidade de giros a que o corpo de prova será

submetido durante a compactação. Deste modo, adotou-se a dosagem SUPERPAVE (Figura 9).

**Figura 9** - Fluxograma da dosagem Superpave.



**Fonte:** BERNUCCI *et al.* (2008)

A partir da determinação da dosagem, foi realizada a caracterização mecânica da mistura asfáltica completa (MAC), conforme ilustrado na Figura 10.

**Figura 10** - Fluxograma da caracterização mecânica da mistura.



**Fonte:** Dados da Pesquisa (2020)

Após a caracterização mecânica foi realizada a análise do fenômeno de fadiga a partir do ensaio de vida de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Foi utilizada a norma DNIT 183/2018 – ME como base para a realização do ensaio, porém, a frequência determinada não condiz com o objetivo deste estudo. Deste modo, realizando alterações no software da UTM – 25 (*Universal Testing Machine*), foi possível considerar variações de frequência (1, 10 e 30 Hz) e de variações de temperatura (10, 25 e 35°C), sendo os ensaios com variação de temperatura realizados a 1 Hz.

A **Tabela 2** relaciona os ensaios realizados e as respectivas normas que os regem.

**Tabela 2** - Relação dos ensaios realizados e as normas utilizadas.

| <b>ENSAIO</b>                          | <b>NORMA</b>        |
|--|---------------------|
| Granulometria                          | DNIT 412/2019 ME    |
| Massa específica dos agregados graúdos | DNIT 413/2019 -ME   |
| Massa específica dos agregados miúdos  | DNIT 411/2019 - ME  |
| Índice de forma dos agregados          | DNER – ME 086/94    |
| Equivalente areia                      | DNER – ME 054/97    |
| Penetração                             | DNIT 155/2010 – ME  |
| Ponto de amolecimento                  | DNIT 131/2010 – ME  |
| Viscosidade Rotacional                 | ABNT NBR 15184:2004 |
| Recuperação elástica                   | DNIT 130/2010 – ME  |
| Módulo de resiliência                  | ASTM D7369: 2011    |
| Lottman                                | DNIT 180/2018 – ME  |
| Resistência a tração                   | DNIT 136/2018 – ME  |
| Fadiga por compressão diametral        | DNIT 183/2018 – ME  |

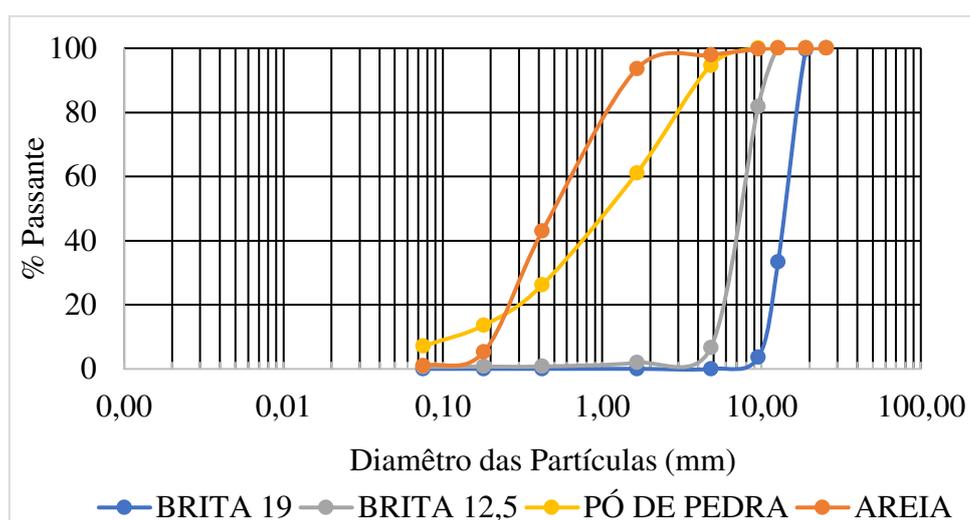
Todos os ensaios necessários para a conclusão deste estudo foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP/UFCG.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

A distribuição granulométrica assegura a estabilidade da camada de revestimento asfáltico, por estar relacionada ao entrosamento entre as partículas e o atrito entre elas. De acordo com a análise do Gráfico 1, pode-se observar que os agregados graúdos possuem graduação uniforme, enquanto a areia é de graduação aberta e o pó de pedra, bem graduado.

Gráfico 1 : Distribuição Granulométrica dos Agregados



A tabela 3 representa a massa específica real dos agregados, de acordo com sua faixa granulométrica e os resultados de absorção dos agregados.

Tabela 3 - Massa específica dos agregados.

| <b>MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS</b> |                 |                   |              |                    |
|--|-----------------|-------------------|--------------|--------------------|
|  | <b>BRITA 19</b> | <b>BRITA 12,5</b> | <b>AREIA</b> | <b>PÓ DE PEDRA</b> |
| <b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>    | 2,636           | 2,616             | 2,386        | 2,475              |
| <b>Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)</b>        | 2,668           | 2,665             | 2,528        | 2,513              |
| <b>Absorção (%)</b>                                    | 0,460           | 0,706             | 0,380        | 0,600              |

De acordo com Bernucci (2008), agregados com alta absorção não devem ser utilizados nas misturas asfálticas. Agregados porosos irão absorver parte do ligante necessário para garantir a coesão da mistura asfáltica, fazendo com que o consumo de

ligante seja elevado. De acordo com a análise dos dados de absorção dos agregados graúdos e miúdos utilizados, é possível afirmar que os valores são adequados, segundo os parâmetros recomendados pela DNIT 411 – ME e DNIT 413 – ME, considerando-se que o agregado com maior absorção é a brita 12,5 – da ordem de 0,706%.

A tabela 4, apresentada a seguir, mostra os valores de índice de forma para brita 19 e brita 12,5.

**Tabela 4** - Índice de forma dos agregados.

| <b>ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS</b> |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| <b>MATERIAL</b>                      | <b>ÍNDICE DE FORMA</b> |
| <b>Brita 19</b>                      | 0,89                   |
| <b>Brita 12,5</b>                    | 0,70                   |

O índice de forma influencia na resistência ao cisalhamento da MAC, além de sua trabalhabilidade. De acordo com a DNER – ME 086/94, o índice de forma varia de 0,00 (agregado lamelar) a 1,00 (agregado de ótima cubicidade). O limite mínimo de aceitação dos agregados no tocante ao índice de forma é de 0,5. De acordo com os valores apresentados na tabela 4, ambos os agregados graúdos utilizados possuem índice de forma acima do valor mínimo, sendo considerados aceitáveis para a utilização na mistura asfáltica.

Em relação ao equivalente areia, a norma DNER – ME 054/97 especifica que este deve ser superior a 55%, o que indica que os agregados miúdos estão em conformidade com as especificações, conforme apresentado na tabela 5 a seguir.

**Tabela 5** - Equivalente areia dos agregados.

| <b>EQUIVALENTE AREIA DOS AGREGADOS</b> |                              |
|--|------------------------------|
| <b>MATERIAL</b>                        | <b>EQUIVALENTE AREIA (%)</b> |
| <b>Areia</b>                           | 80,34                        |
| <b>Pó De Pedra</b>                     | 65,04                        |

#### **4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LIGANTE ASFÁLTICO**

Foi utilizada a norma do DNIT 129/2011 – EM, que trata da especificação do material: cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico, neste caso, 55/75-E.

A tabela 6 mostra a análise da variação de massa das amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFOT).

**Tabela 6** - Variação de massa do ligante após RTFO.

| <b>VARIAÇÃO DE MASSA</b>       |                |               |               |                |
|--------------------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>Amostra</b>                 | <b>1</b>       | <b>2</b>      | <b>3</b>      | <b>4</b>       |
| <b>Massa antes do RTFO (g)</b> | 221,14         | 210,94        | 223,81        | 223,45         |
| <b>Massa após do RTFO (g)</b>  | 221,07         | 210,89        | 223,77        | 223,47         |
| <b>Variação de massa (%)</b>   | <b>0,03165</b> | <b>0,0237</b> | <b>0,0179</b> | <b>-0,0090</b> |

De acordo com os resultados obtidos, a variação de massa mais expressiva foi da ordem de 0,032%, atendendo ao limite máximo da norma, que é de 1,00%. Para a amostra 4 houve aumento no valor de massa. Isto se atribuiu ao fato de que parte de uma estopa utilizada durante o ensaio aderiu ao ligante durante a pesagem. Assim, esta amostra não é representativa.

A tabela 7 aborda os valores obtidos nos ensaios de caracterização física do ligante utilizado antes e após o RTFOT (Envelhecimento a curto prazo).

**Tabela 7** - Caracterização física do ligante asfáltico.

| <b>ANTES DO RTFO</b>                    |                 |                 |                 |                 |                 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>PENETRAÇÃO</b>                       |                 |                 |                 |                 |                 |
| <b>Penetração média (dmm)</b>           | 57,0            |                 |                 |                 |                 |
| <b>PONTO DE AMOLECIMENTO</b>            |                 |                 |                 |                 |                 |
| <b>Ponto de amolecimento médio (°C)</b> | 57,75           |                 |                 |                 |                 |
| <b>VISCOSIDADE ROTACIONAL (cP)</b>      |                 |                 |                 |                 |                 |
| <b>Temperatura</b>                      | <b>135,00°C</b> | <b>142,00°C</b> | <b>150,00°C</b> | <b>165,00°C</b> | <b>177,00°C</b> |
| <b>Amostra 1</b>                        | 1557,50         | 1058,57         | 720,00          | 377,33          | 241,00          |
| <b>Amostra 2</b>                        | 1597,50         | 1078,57         | 732,00          | 386,00          | -               |

| <b>RECUPERAÇÃO ELÁSTICA</b>             |                  |                 |                 |                 |                 |
|---|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Percentagem recuperada</b>           |                  | 76,00           |                 |                 |                 |
| <b>APÓS O RTFO</b>                      |                  |                 |                 |                 |                 |
| <b>PENETRAÇÃO</b>                       |                  |                 |                 |                 |                 |
| <b>Penetração média (dmm)</b>           |                  | 47,17           |                 |                 |                 |
| <b>PONTO DE AMOLECIMENTO</b>            |                  |                 |                 |                 |                 |
| <b>Ponto de amolecimento médio (°C)</b> |                  | 65,75           |                 |                 |                 |
| <b>VISCOSIDADE ROTACIONAL (cP)</b>      |                  |                 |                 |                 |                 |
| <b>Temperatura</b>                      | <b>135,00 °C</b> | <b>142,00°C</b> | <b>150,00°C</b> | <b>165,00°C</b> | <b>177,00°C</b> |
| <b>Amostra 3</b>                        | 2435,00          | 1555,00         | 1060,00         | 528,00          | 321,00          |
| <b>Amostra 4</b>                        | 2467,50          | 1616,00         | 1058,00         | 533,33          | 325,00          |

O valor para penetração antes do envelhecimento a curto prazo encontra-se dentro das especificações da norma previamente citada para este ligante asfáltico, cujo valor deve estar inserido entre 45 e 70 dmm. Após o RTFOT, o percentual mínimo em relação à penetração original deve ser de 60%. Neste caso, obteve-se um percentual de 82,75%, indicando que o ligante está de acordo com as especificações da norma DNIT 129/2011 – EM.

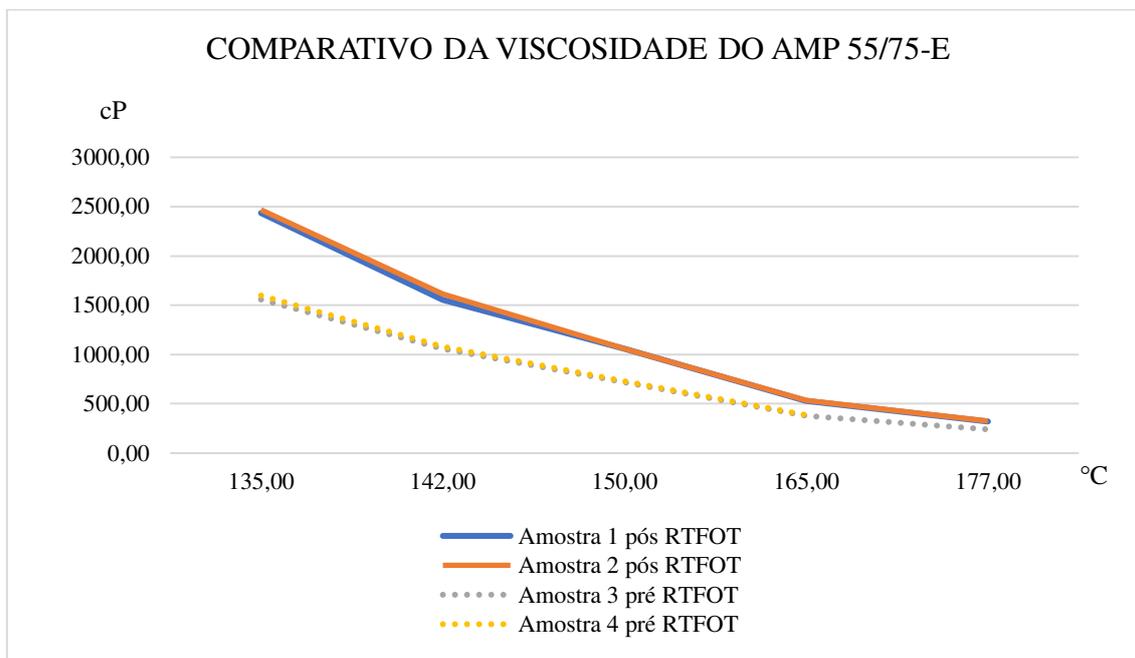
Em relação ao ponto de amolecimento, as temperaturas para o ligante não envelhecido estão de acordo com os padrões para o ensaio. As condições de envelhecimentos são simuladas através do ensaio de RTFOT, que representa o envelhecimento a curto prazo, logo, os resultados obtidos pós RTFOT representam as condições de desempenho pós usinagem do pavimento. O ligante envelhecido não satisfaz as condições da norma DNIT 129/2011 – EM. Em virtude das complicações em refazer o RTFOT, não foi possível obter quantitativos de ligante envelhecido suficiente para repetir o ensaio.

O ligante satisfaz o critério de recuperação elástica. De acordo com a norma DNIT 129/2011 – EM o percentual mínimo para este ensaio deve ser de 75%.

As especificações de material não trazem valores de referência para a viscosidade rotacional (Brookfield) do ligante envelhecido. Contudo, a comparação é válida em termos de análise do comportamento do ligante envelhecido frente às mesmas

temperaturas. O Gráfico 2 abaixo demonstra as curvas de viscosidade das amostras do ligante asfáltico.

**Gráfico 2:** Comparativo da viscosidade rotacional



A partir da análise dos valores acima demonstrados, é possível afirmar que o ligante atende às especificações da norma DNIT 129/2011 – EM. O ligante envelhecido apresentou maior resistência ao spíndle do viscosímetro Brookfield, o que indica a necessidade de maiores temperaturas para atingir a fluidez do ligante não-envelhecido.

### 4.3. DOSAGEM SUPERPAVE

A dosagem foi realizada seguindo a metodologia SUPERPAVE. O nível de tráfego utilizado foi médio a alto e o tamanho nominal máximo (TMN) foi de 19,0mm. Na primeira etapa da dosagem, foram determinadas três composições granulométricas, determinadas a partir da ponderação entre as faixas granulométricas dos agregados, de forma a enquadrá-las aos limites estabelecidos para faixa B do DNIT 031/2006 – ES.

Foram determinadas curvas granulométricas denominadas “curva superior”, “curva intermediária” e “curva inferior”, para cada composição, foram confeccionados corpos de prova (Figura 11), a fim de conhecer as propriedades de cada uma.

Figura 11: Corpos de Prova produzidos pelo autor



Fonte: Autor, 2020.

As proporções finais dos agregados escolhidos para dosagem estão apresentados na Tabela 8. A escolha foi realizada em função do volume de vazios apresentado para cada amostra. De acordo com o que é instruído pela metodologia SUPERPAVE, deve-se optar pela amostra que contenha volume de vazios ( $V_v$ ) mais próximo de 4%.

**Tabela 8** - Dosagem Superpave.

| <b>PROPORÇÃO FINAL DOS MATERIAIS</b> |                 |                   |              |                    |               |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------------|---------------|
| <b>Teor do ligante</b>               | <b>Brita 19</b> | <b>Brita 12,5</b> | <b>Areia</b> | <b>Pó de Pedra</b> | <b>Filler</b> |
| 4,89%                                | 11,41%          | 23,78%            | 19,97%       | 38,05%             | 1,90%         |

Após escolha da composição granulométrica adequada, foi realizada a compactação dos corpos de prova, através do Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), aplicando 100 giros para cada CP (corpo de prova). A determinação do número de giros ( $N$ ) foi realizada juntamente ao processo de escolha da composição granulométrica onde, para cada composição, foram feitas compactações para três esforços diferentes:  $N_{inicial}$ ,  $N_{projeto}$  e  $N_{máximo}$ . Para o nível de tráfego utilizado, estes esforços são, respectivamente, 8, 100 e 160 giros, e a escolha foi feita com base nos parâmetros necessários de  $V_v$ .

A partir dos corpos de prova moldados, foram determinados os parâmetros físicos das amostras (Tabela 9). A densidade máxima medida ( $G_{mm}$ ) foi obtida pelo método Rice, através da metodologia estabelecida pela norma ASTM D2041/11. A proporção Pó/Asfalto, que corresponde à razão entre o teor de material passante na peneira n°200 e

o teor de ligante, foi encontrado o valor de 0,84, se adequando a especificação de que este parâmetro deve estar entre 0,6 e 1,2 (BERNUCCI et al., 2008).

**Tabela 9** - Resumo das informações da mistura.

|   |                        |
|---|------------------------|
| <b>Densidade máxima medida (Gmm)</b>        | 2,46 g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Massa específica aparente da mistura</b> | 2,35 g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Volume de Vazios</b>                     | 4,05 %                 |
| <b>Vazios do agregado mineral</b>           | 11,19%                 |
| <b>Relação betume/vazios</b>                | 99,59%                 |
| <b>Relação Pó/Asfalto</b>                   | 0,84                   |

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

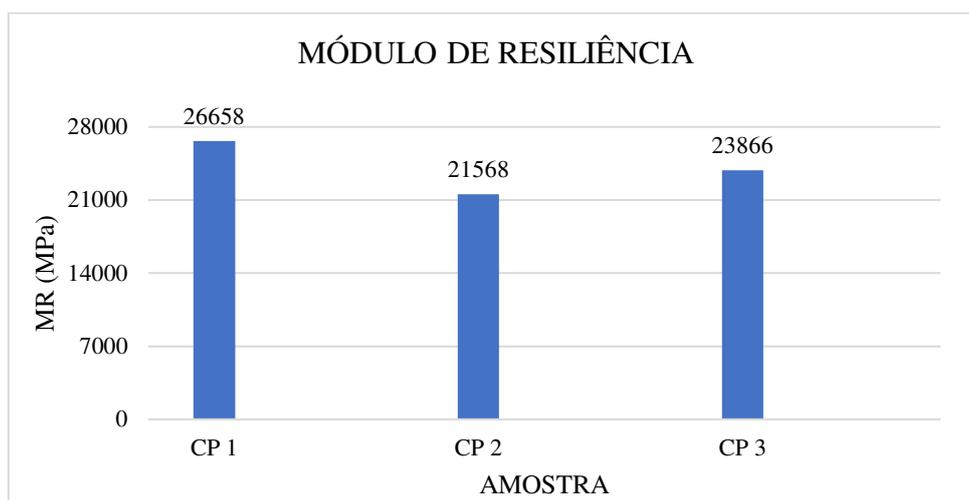
Foi feita a compactação de novos corpos de prova (Denominados de CP) a partir da dosagem SUPERPAVE para a análise das propriedades mecânicas da mistura.

Os ensaios de caracterização mecânica das amostras foram realizados a fim de entender o desempenho desta mistura asfáltica em diferentes condições, tendo em vista que a relação MR/RT possui influência direta na vida de fadiga - valores menores desta relação indicam maior vida de fadiga, de acordo com Queiroz (2016).

O Gráfico 3 representa os valores obtidos no ensaio de módulo de resiliência para três corpos de prova moldados a partir da mesma mistura, conforme a dosagem anteriormente estabelecida. Pode-se observar que as amostras apresentam alta capacidade resiliente. Os resultados apresentados estão em conformidade com os que foram encontrados por Taira (2001) para misturas asfálticas preparadas com 5% de ligante modificado por SBS, para uma temperatura de 25°C.

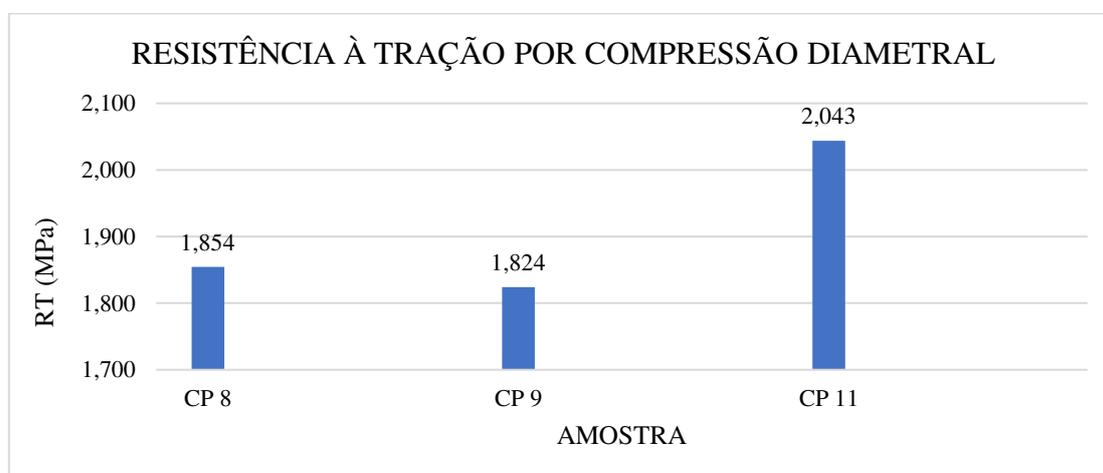
Vide Tabela 11 – Anexo, o valor médio de módulo de resiliência seguindo a metodologia estabelecida pela DNIT 135/2018 – ME foi de 7555 MPa, valor semelhante ao que foi encontrado por Silva (2018) em sua pesquisa utilizando ligantes modificados com SBS para misturas asfálticas.

**Gráfico 3: Módulo de Resiliência**



Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados no gráfico 4. Pode-se observar que as misturas asfálticas submetidas ao ensaio de RT atendem (Tabela 11 – Anexo) ao critério mínimo de RT determinado pela especificação de serviço DNIT 031/2006, de 0,65 MPa. Os valores de resistência encontrados estão de acordo com o que é visto na bibliografia para misturas asfálticas confeccionadas com ligante modificado por SBS, para uma temperatura de 25°C. Morilha Junior (2004) encontrou valores semelhantes em sua pesquisa utilizando de 4% a 5,5% de teor de ligante modificado por SBS nas misturas à 25°C.

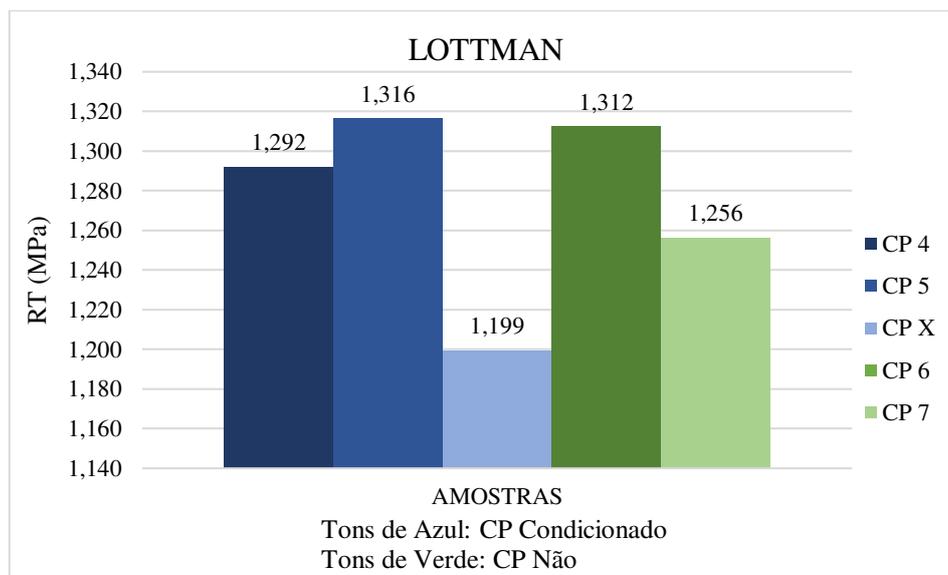
**Gráfico 4: Resistência à tração por compressão diametral**



O ensaio de resistência ao dano por umidade induzida (Lottman) obteve os resultados apresentados no gráfico 5 abaixo. A ASTM D7064/08 recomenda que o valor

mínimo de resistência retida a tração (RRT) deve ser de 80%, logo, pode-se observar que as amostras se adequam a esta recomendação. Os resultados obtidos apresentam valores de desempenho satisfatórios, até mais altos e demonstrando melhor capacidade de resistência ao dano por umidade nos estudos realizados por Marcon (2016) e Carlesso et al. (2019) para misturas asfálticas modificadas com SBS. Isto nos mostra que o uso do AMP 55-75E apresenta melhores resultados quanto à resistência ao dano por umidade induzida. Uma provável causa para esta melhora nos resultados, está no fato de que o ligante modificado industrialmente e comercializado está mais padronizado, sendo assim, menos suscetível a erros de dosagem.

**Gráfico 5:** Dano por umidade induzida da mistura asfáltica

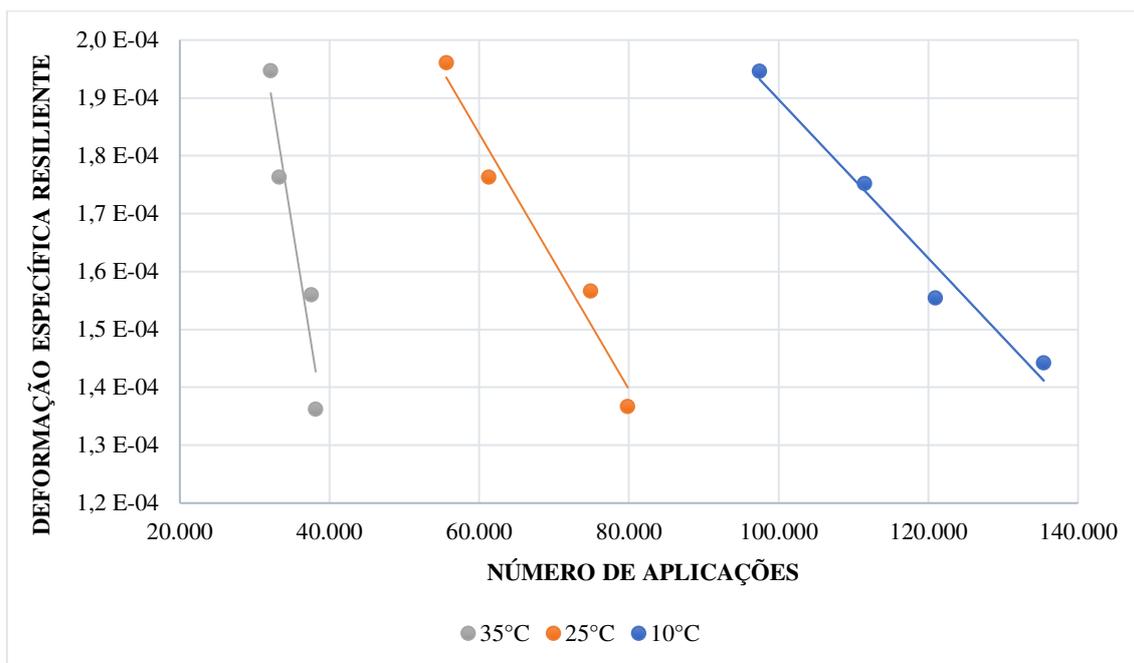


#### 4.5. ENSAIO DE VIDA DE FADIGA

##### 4.5.1. PRIMEIRA CONSIDERAÇÃO: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA.

O Gráfico 6 representa os resultados da análise do fenômeno de fadiga com a aplicação da frequência recomendada (1 Hz) pela norma utilizada para realização do ensaio em três temperaturas, 10, 25 e 35°C.

**Gráfico 6:** Análise do fenômeno de fadiga com a variação da temperatura

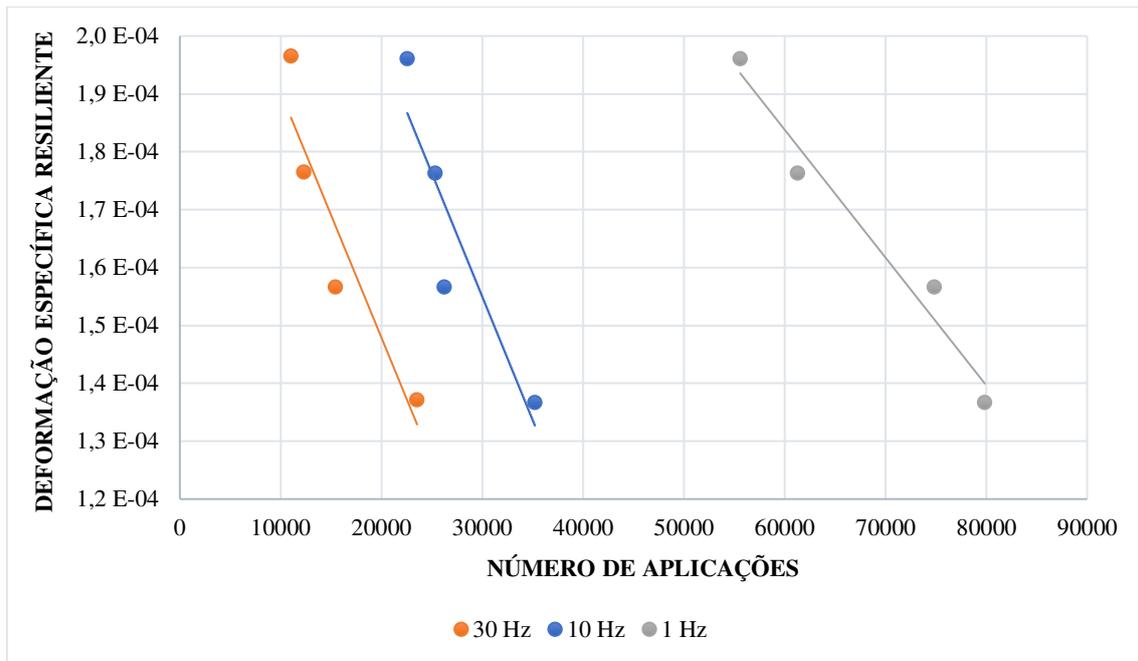


Para a análise da fadiga no âmbito da variação de temperatura é possível observar que, mantida a frequência de 1Hz, a MAC se comporta de forma diferente nas três temperaturas estudadas. A 10°C, a rigidez do pavimento é maior e, por isso, são necessárias mais aplicações de carga para que ocorra a fadiga. Misturas submetidas a maiores temperaturas tendem a apresentar comportamento mais elástico do que a menores temperaturas. Assim, a deformação no pavimento se torna maior e são necessárias menores repetições na aplicação de cargas para que o pavimento possa apresentar trincas por fadiga. Contudo, Rossato (2015) aborda que o trincamento por fadiga a baixas temperaturas é mais brusco e a ruptura é frágil, enquanto a temperaturas elevadas a tendência é que a ruptura possua comportamento dúctil. Este comportamento foi observado nos corpos de prova utilizados neste estudo, ressaltando que a 10° C o corpo de prova rompeu por completo. No entanto, os demais corpos de prova utilizados nesta etapa apresentaram trincas que comprovaram o comportamento dúctil da ruptura.

#### 4.5.2. SEGUNDA CONSIDERAÇÃO: VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

O Gráfico 7 ilustra os resultados obtidos para o ensaio de vida de fadiga obtidos a temperatura constante (25°C) e variando apenas a frequência (10 e 30 Hz).

**Gráfico 7:** Análise do fenômeno de fadiga com a variação da frequência



Os dados apresentados no gráfico acima e nas tabelas 14, 16 e 17 em anexo mostram que, apesar de os valores de diferença de tensões e deformação específica resiliente serem muito próximos entre si, o número de aplicações necessárias para romper os corpos de prova se mostra muito distante. Observa-se que a mistura submetida a 30Hz de frequência necessita de menos aplicações de carga para se romper do que as frequências inferiores, que seguiram o mesmo padrão.

Estes resultados, em conjunto com estudos previamente citados indicam que, apesar de a norma para execução deste ensaio se baseie na frequência de 1 Hz, esta não é representativa – tendo em vista que maiores velocidades nas vias implicam em maiores valores de frequência. Assim, para melhor representar as condições a que o pavimento será submetido, recomenda-se a realização do ensaio de vida de fadiga sob diferentes frequências, tendo em vista o decréscimo no número de aplicações provenientes desta análise.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos através dos ensaios realizados neste estudo nos permitem considerar que a mistura asfáltica utilizando ligante modificado AMP 55-75E apresentou desempenho satisfatório em relação às propriedades mecânicas.

Os resultados obtidos para a análise do fenômeno de fadiga permitem algumas conclusões: No que se refere a temperatura, é possível analisar com clareza a influência do ligante na fadiga. Por ser o elemento na composição de um pavimento que possui a capacidade de apresentar comportamento diferente quando submetido a determinadas temperaturas, é o ligante que traz à MAC a característica de apresentar maior rigidez em baixas temperaturas e maior plasticidade ao elevar a temperatura. Observa-se que, ao fixar a temperatura e variar a frequência, a deformação específica resiliente não sofre grandes mudanças, a diferença se mostrando inferior a 0,40%. Na variação da temperatura, no entanto, foi possível obter valores de deformação específica de até 5,87%, comparando as temperaturas de 10 e 35°C. O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi realizado a 25°C e, portanto, a comparação entre a variação de frequência considerando a temperatura em que o MR foi realizado se torna mais adequada, tendo em vista que este influencia diretamente na deformação específica.

No tocante a frequência, a MAC se mostrou mais resistente à ocorrência do fenômeno a baixas frequências do que a altas. No entanto, deve-se levar em consideração que baixas frequências muitas vezes não condizem com a realidade das rodovias.

Apesar de não ter sido analisada a variação da frequência e da temperatura simultaneamente, através dos resultados obtidos é possível concluir que os pavimentos estão mais susceptíveis ao trincamento por fadiga nas condições de alto carregamento e altas temperaturas.

## **6. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS**

Considerando a importância desta pesquisa e que há regiões no Brasil cujas temperaturas são mais amenas, enquanto outras são mais elevadas, têm-se como sugestão de pesquisa a realização do ensaio de vida de fadiga com altas frequências e baixas temperaturas. É viável também a análise da influência do ligante modificado na fadiga dos pavimentos, tendo em vista que o AMP 55/75-E tem como uma de suas características melhorar o desempenho dos pavimentos flexíveis no âmbito deste estudo.

## 7. REFERÊNCIAS

AASHTO. **Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending.** AASHTO T 321. Estados Unidos, 2017.

Agência CNT Transporte Atual. **Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada.** 2018. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>.

AL-KHATEEB, G. G.; GHUZLAN, K. A. The combined effect of loading frequency, temperature, and stress level on the fatigue life of asphalt paving mixtures using the IDT test configuration. **International Journal Of Fatigue.** P 254-261. Fev. 2014.

ANDERSON, David A.; CHRISTENSEN, Donald W.; BAHIA, Hussain U. (1991) **Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications.** Journal Of The Association Of Asphalt Paving Technologists, v. 60.

ARAO, M. **Análise da vida de fadiga de pavimentos flexíveis em diferentes misturas.** 2014. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM – D 7064: **Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design.** USA. 2008.

ASTM. **Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending.** ASTM D 7460-10, 2010.

BAHIA, H. U., HANSON, D. I., ZENG, M., ZHAI, H., KHATRI, M. A., AND ANDERSON, R. M. (2001). **Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design,** NCHRP Report 459, National Academy Press.

BALBO, J. T. **Fatos, Mitos e Falácias Sobre os Modelos experimentais de fadiga.** Artigo publicado na 32º Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, 2010.

BARROS, Ablenya Grangeiro de. **O Efeito Do Uso De Agentes Rejuvenescedores Encapsulados Sobre A Autorregeneração De Misturas Asfálticas**. 2020. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/12676/1/ABLENYA%20GRANGEIRO%20DE%20BARROS%20-%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20%28PPGECA%29%202020.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2021.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, 1ª Edição PETROBRAS/ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

BODIN, D.; TERRIER, J. P.; PERROTEAU, C.; HORNYCH, P.. **Effect Of Temperature On Fatigue Performances Of Asphalt Mixes**. In: 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS, 11., 2010, Nagoya - Japan. Artigo. Nagya - Japan: Lcpc, 2010. v. 1, p. 1-9. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/262297819\\_Effect\\_of\\_temperature\\_on\\_fatigue\\_performances\\_of\\_asphalt\\_mixes](https://www.researchgate.net/publication/262297819_Effect_of_temperature_on_fatigue_performances_of_asphalt_mixes). Acesso em: 10 mar. 2021.

BOEIRA, F. D. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. 2018. 286 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

CARLESSO, Gabriela Ceccon *et al.* Avaliação da resistência à ação da água em misturas asfálticas modificadas por nanoargila e polímero SBS. In: **CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE**, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Artigo**. Florianópolis: ANPET, 2019.

COSTA, Daniel Beserra. **ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS A PARTIR DOS CRITÉRIOS DE MOHR COULOM**. 2018. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia,

Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/250088987.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2021.

CRAVO, Margareth Carvalho Coutinho. **Efeitos Do Envelhecimento Térmico E Fotoquímico Em Ligantes Asfálticos, Mástique E Matriz De Agregados Finos**. 2016. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/doutorado/2016-1/2737-carvo-mcc-td-16-pdf>. Acesso em: 16 mar. 2021.

De La ROCHE, C. **Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux**. Thèse de Docteur. École Central de Paris, 1996.

DELGADILLO, R., BAHIA, H. **Rational Fatigue Limits For Asphalt Binders Derived From Pavement Analysis.**, Asphalt paving thechnology: Journal of the association of asphalt paving technologists, Vol 74, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - PRO 159/85**: Projeto de Restauração de pavimentos Flexíveis e Semi - Rígidos. Rio de Janeiro: Ipr, 1985. 31 p. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/normas/DNER-PRO159-85.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-PRO159-85.pdf). Acesso em: 04 mar. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia**. Rio de Janeiro, 2003. 12 p. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit\\_005\\_2003\\_ter-1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf). Acesso em: 03 mar. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. 031: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Brasília: 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
DNIT 183/2018 - ME: Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão  
diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Ipr, 2018. 15 p.

DOAN T.H. **Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC. Bulletin de  
liaison des laboratoires des ponts et chaussées.** p 215-228. 1977.

DOMEC, V. (2005), **Endommagement Par Fatigue Des Enrobés Bitumineux Em  
Condition De Trafic Simulé Et De Temperature.** Thèse de Docteur. Université de  
Bordeaux I. EM 12697-24 (2010). **Bituminous mixtures - Test methods for hot mix  
asphalt – Part 24: Resistance to fatigue.** CEN, Brussels

ELSEIFI, M., AL-QADI, I., YOO, P. Viscoelastic Modeling and Field Validation of  
Flexible Pavements. **Journal of Engineering Mechanics**, vol. 132, p. 172-178, 2006.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com  
Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** 2009. 581f.  
Dissertação (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa  
Catarina, Santa Catarina, 2009.

GAMA, D. A. **Efeito da Adição de Polímeros Reativo, Não-Reativo e Ácido  
Polifosfórico e Suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos.** Tese de  
Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina  
Grande. Campina Grande. F. 167. 2016.

GAO, Lei; LING, Cheng. **Construction and Building Materials.** China: Elsevier, 2016.  
402 p. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/284133175\\_Evaluation\\_of\\_fatigue\\_behavior\\_in\\_cold\\_recycled\\_mixture\\_using\\_digital\\_image\\_correlation\\_method](https://www.researchgate.net/publication/284133175_Evaluation_of_fatigue_behavior_in_cold_recycled_mixture_using_digital_image_correlation_method). Acesso em: 07  
mar. 2021.

GIGANTE, Antonio Carlos. **Avaliação Da Susceptibilidade Térmica E Efeito Das  
Condições De Enrijecimento De Misturas Asfálticas Densas À Luz De Seus  
Comportamentos Resilientes.** 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.  
Disponível em:  
<https://pdfs.semanticscholar.org/0f66/d2875de4b4e3e03dd1f2ee83945f88b7611b.pdf>.  
Acesso em: 12 mar. 2021.

GODOI, Luiza Carbunck. **Aplicação Do Ensaio De Flexão Em Amostra Semicircular Para Avaliação De Trincamento De Misturas Asfálticas**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em:  
<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/157860/001020143.pdf?sequence=1>.  
Acesso em: 04 mar. 2021.

HINTZ, C. **Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue**. 2012. 144 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Civil & Environmental Engineering, University Of Wisconsin - Madison, Madison, 2012.

IWANAGA, Fabio Issao. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE AGREGAADO, DO TIPO DE LIGANTE, DO TIPO DE MOLDAGEM E DO TIPO DE FÍLER NA VIDA FADIGA DE DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**. 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em:  
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-21112007-111323/publico/Ywanaga.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2021.

KIM, Y.R.; KIM, N.; KHOSLA, N.P. (1992) **Effects Of Aggregate Type And Gradation On Fatigue And Permanent Deformation Of Asphalt Concrete**. In: Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. American Society for Testing and Materials.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2003.

LUZ, Priscila Maria Sousa Gonçalves. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina pinus e eucalipto**. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.

MARCON, Matheus Felipe. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais**. 2016. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARINHO FILHO, Paulo Germano Tavares. **Avaliação Reológica De Ligantes Asfálticos Modificados Com Nanopartículas De Dióxido De Titânio**. 2017. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/250086632.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2021.

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

MELLO, L. G. R. **A teoria do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas**. 2008. 287 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e Estudo do Comportamento Reológico e Desempenho Mecânico de Concretos Asfálticos Modificados com Nanocompósitos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, Brasil. 2014.

MINHOTO, Manuel Joaquim da Costa. **Consideração Da Temperatura No Comportamento À Flexão De Fendas Dos Reforços De Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. 2005. 368 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga - Portugal, 2005. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6751/1/Tese\\_Doutoramento.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6751/1/Tese_Doutoramento.pdf). Acesso em: 03 mar. 2021.

MOCELIN, Douglas Martins. **Avaliação Do Comportamento À Fadiga De Misturas Asfálticas Quentes E Mornas Através Do Modelo De Dano Contínuo Viscoelástico**. 2018. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/181261/001066666.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 mar. 2021.

MORILHA JUNIOR, Armando. **Estudo Sobre A Ação De Modificadores No Envelhecimento Dos Ligantes Asfálticos E Nas Propriedades Mecânicas E De Fadigas Das Misturas Asfálticas**. 2004. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87049/207429.pdf?sequence>. Acesso em: 15 mar. 2021.

NUÑES, Javier Yesid Machecha. **Caracterização À Fadiga De Ligantes Asfálticos Modificados Envelhecidos A Curto E Longo Prazo**. 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Transportes, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-19112013-171029/publico/JYMN2013.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2021.

OFFICIALS. **AASHTO TP 107: Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2014.

PINTO, S.; PREUSLLER, E.S. (2010) **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Synergia Editora, IBP.

PINTO, Salomão. **Estudo Do Comportamento À Fadiga De Misturas Betuminosas E Aplicação Na Avaliação Estrutural De Pavimentos**. 1991. 489 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/135-1991/756-salomaopinto>. Acesso em: 06 mar. 2021.

QUEIROZ, B. O. de. **Avaliação Do Desempenho De Misturas Asfálticas Porosas Modificadas Com Politereftalato De Etileno (PET)**. 2016. 127 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

RAAD L., SABOUNDJIAN S., MINASSIAN G., 2001, “**Field aging Effects on Fatigue of Asphalt Concret and Asphalt Rubber Concrete**”. In: Transportation Research Record, 2001.

ROSSATO, F. P. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. 2015. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SANTOS, Mauricio Silveira dos. **Desenvolvimento De Modelos De Previsão De Desempenho A Partir Da Implantação De Trechos Monitorados Na Região De Santa Maria - RS**. 2015. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2015.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Aplicadas em Campo por Meio da Teoria Viscoelástico de Dano Contínuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SILVA, Allan Monteiro. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas projetadas com CAP HiMA e CAP 60/85-E aplicadas na restauração de um trecho da rodovia SC-114**. 2018. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/192793>. Acesso em: 03 out. 2021.

SOARES, J.B., 2007, **Notas de aula do curso de graduação**. Disponível em: <<http://www.det.ufc.br/jsoares>>. Acesso em abril de 2021

SOENEN, H et al. (2004). **Predict Mix Fatigue Test From Binder Fatigue Proprieties, Measured with a DSR**. Nynas. Eurasphalt & Eurobitume Congres, book 1.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação De Misturas Asfálticas Com Incorporação De Borracha Recicladas De Pneus**. 2004. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5192/000422319.pdf?sequence>. Acesso em: 06 mar. 2021.

TAIRA, Cláudio. **Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS (B 65/60)**. 2001. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos - Sp, 2001.

TAREFEDER, R. A., & ARISA, I. (2011). "**Molecular Dynamic Simulations or Determining Change in Thermodynamic Properties of Asphaltene and Resin Because of Aging**". Energy and Fuels, 25, 2211-2222.

TONIAL, Ilonir Antonio. **Influência Do Envelhecimento Do Revestimento Asfáltico Na Vida De Fadiga De Pavimentos**. 2001. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: [http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc\\_download&gid=2543&Itemid](http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc_download&gid=2543&Itemid) =. Acesso em: 17 mar. 2021.

YU, J; ZOU, G. **Asphalt Pavement Fatigue Cracking Prediction Model with Mode Factor**. ISSN 1997-1400. Int. J. Pavement Res. Techno l. Technical paper, 2013.

## 8. ANEXOS

### 8.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

**Tabela 10** - Módulo de resiliência da MAC

| <b>MÓDULO DE RESILIÊNCIA</b> |                        |              |                      |              |
|------------------------------|------------------------|--------------|----------------------|--------------|
| <b>Amostras</b>              | <b>MR – ASTM (MPa)</b> | <b>MÉDIA</b> | <b>MR – BR (MPa)</b> | <b>MÉDIA</b> |
| <b>CP 1</b>                  | 26658                  |              | 8157                 |              |
| <b>CP 2</b>                  | 21568                  | 24031        | 6949                 | 7555         |
| <b>CP 3</b>                  | 23866                  |              | 7560                 |              |

**Tabela 11** - Dano por umidade induzida (Lottman).

| <b>LOTTMAN</b> |               |                  |                     |                         |                 |            |
|----------------|---------------|------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|------------|
| <b>Amostra</b> | <b>D (mm)</b> | <b>Alt. (mm)</b> | <b>Condicionado</b> | <b>Não Condicionado</b> | <b>RT (MPa)</b> | <b>RRT</b> |
| <b>CP 4</b>    | 100           | 64,7             |                     |                         |                 |            |
|                | 100           | 64,8             | 680                 | -                       | 1,292           |            |
|                | 100           | 64,7             |                     |                         |                 |            |
| <b>CP 5</b>    | 99,9          | 64,5             |                     |                         |                 |            |
|                | 99,8          | 64,7             | 690                 | -                       | 1,316           |            |
|                | 100           | 64,4             |                     |                         |                 |            |
| <b>CP X</b>    | 100           | 64,6             |                     |                         |                 |            |
|                | 100           | 64,6             | 630                 |                         | 1,199           | 0,988      |
|                | 99,9          | 64,7             |                     |                         |                 |            |
| <b>CP 6</b>    | 100           | 64,5             |                     |                         |                 |            |
|                | 100           | 64,6             | -                   | 690                     | 1,312           |            |
|                | 100           | 64,9             |                     |                         |                 |            |
| <b>CP 7</b>    | 99,9          | 64,7             |                     |                         |                 |            |
|                | 99,9          | 64,6             | -                   | 660                     | 1,256           |            |
|                | 100           | 64,7             |                     |                         |                 |            |

**Tabela 12** - Resistência a tração por compressão diametral.

| <b>RESISTÊNCIA A TRAÇÃO</b> |                      |                    |                |                |              |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------|
| <b>Amostra</b>              | <b>Diâmetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> | <b>Leitura</b> | <b>RT(MPa)</b> | <b>Média</b> |

|              |        |       |      |       |
|--------------|--------|-------|------|-------|
|              | 100,21 | 63,50 |      |       |
| <b>CP 8</b>  | 100,18 | 63,56 | 960  | 1,854 |
|              | 100,20 | 63,60 |      |       |
|              | 100,24 | 64,04 |      |       |
| <b>CP 9</b>  | 100,26 | 64,62 | 955  | 1,824 |
|              | 100,26 | 64,04 |      |       |
|              | 100,13 | 63,29 |      | 1,91  |
| <b>CP 10</b> | 100,19 | 63,26 | 1180 | -     |
|              | 100,29 | 63,37 |      |       |
|              | 100,30 | 64,36 |      |       |
| <b>CP 11</b> | 100,27 | 64,18 | 1070 | 2,043 |
|              | 100,37 | 64,06 |      |       |

## 8.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA ANÁLISE DO FENÔMENO DE FADIGA

**Tabela 13** - Fadiga por compressão diametral realizada a 10°C.

| <b>FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL</b> |             |        |                           |                    |                                  |                             |                      |
|--|-------------|--------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <b>Frequência: 1 Hz</b>                |             |        | <b>Temperatura: 10° C</b> |                    |                                  | <b>Identificação: CP 12</b> |                      |
| Número                                 | Altura (cm) | D (cm) | Nível de Tensão (%)       | Carga aplicada (N) | Deformação Específica Resiliente | Diferença de Tensões (MPa)  | Número de Aplicações |
| 1                                      | 6,34        | 10,00  | 25,0                      | 4750,0             | 0,0001946                        | 1,87                        | 97456                |
| 2                                      | 6,34        | 10,00  | 22,5                      | 4275,0             | 0,0001751                        | 1,68                        | 111487               |
| 3                                      | 6,35        | 10,00  | 20,0                      | 3800,0             | 0,0001554                        | 1,49                        | 120965               |
| 4                                      | 5,99        | 10,00  | 17,5                      | 3325,0             | 0,0001442                        | 1,39                        | 135421               |

**Tabela 14** - Fadiga por compressão diametral realizada a 25°C.

| <b>FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL</b> |             |        |                           |                    |                                  |                             |                      |
|--|-------------|--------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <b>Frequência: 1 Hz</b>                |             |        | <b>Temperatura: 25° C</b> |                    |                                  | <b>Identificação: CP 13</b> |                      |
| Número                                 | Altura (cm) | D (cm) | Nível de Tensão (%)       | Carga aplicada (N) | Deformação Específica Resiliente | Diferença de Tensões (MPa)  | Número de Aplicações |

|   |      |       |       |        |           |      |       |
|---|------|-------|-------|--------|-----------|------|-------|
| 1 | 6,30 | 9,99  | 25,00 | 4750,0 | 0,0001960 | 1,88 | 55589 |
| 2 | 6,30 | 10,00 | 22,50 | 4275,0 | 0,0001762 | 1,69 | 61287 |
| 3 | 6,31 | 9,99  | 20,00 | 3800,0 | 0,0001566 | 1,50 | 74856 |
| 4 | 6,32 | 10,00 | 17,50 | 3325,0 | 0,0001366 | 1,31 | 79852 |

**Tabela 15** - Fadiga por compressão diametral realizada a 35°C.

| <b>FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL</b> |             |        |                           |                    |                                  |                             |                      |
|--|-------------|--------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <b>Frequência: 1 Hz</b>                |             |        | <b>Temperatura: 35° C</b> |                    |                                  | <b>Identificação: CP 14</b> |                      |
| Número                                 | Altura (cm) | D (cm) | Nível de Tensão (%)       | Carga aplicada (N) | Deformação Específica Resiliente | Diferença de Tensões (MPa)  | Número de Aplicações |
| 1                                      | 6,35        | 9,98   | 25,00                     | 4750,0             | 0,0001947                        | 1,87                        | 32145                |
| 2                                      | 6,30        | 10,00  | 22,50                     | 4275,0             | 0,0001762                        | 1,69                        | 33245                |
| 3                                      | 6,33        | 10,00  | 20,00                     | 3800,0             | 0,0001559                        | 1,50                        | 37548                |
| 4                                      | 6,34        | 10,00  | 17,50                     | 3325,0             | 0,0001362                        | 1,31                        | 38147                |

**Tabela 16** - Fadiga por compressão diametral realizada com frequência de 10Hz.

| <b>FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL</b> |             |        |                           |                    |                                  |                             |                      |
|--|-------------|--------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <b>Frequência: 10 Hz</b>               |             |        | <b>Temperatura: 25° C</b> |                    |                                  | <b>Identificação: CP 15</b> |                      |
| Número                                 | Altura (cm) | D (cm) | Nível de Tensão (%)       | Carga aplicada (N) | Deformação Específica Resiliente | Diferença de Tensões (MPa)  | Número de Aplicações |
| 1                                      | 6,30        | 9,99   | 25,00                     | 4750,0             | 0,0001960                        | 1,88                        | 22569                |
| 2                                      | 6,30        | 10,00  | 22,50                     | 4275,0             | 0,0001762                        | 1,69                        | 25314                |
| 3                                      | 6,31        | 9,99   | 20,00                     | 3800,0             | 0,0001566                        | 1,50                        | 26214                |
| 4                                      | 6,32        | 10,00  | 17,50                     | 3325,0             | 0,0001366                        | 1,31                        | 35214                |

**Tabela 17** - Fadiga por compressão diametral realizada com frequência de 30Hz.

| <b>FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL</b> |             |        |                           |                    |                                  |                             |                      |
|--|-------------|--------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <b>Frequência: 30 Hz</b>               |             |        | <b>Temperatura: 25° C</b> |                    |                                  | <b>Identificação: CP 16</b> |                      |
| Número                                 | Altura (cm) | D (cm) | Nível de Tensão (%)       | Carga aplicada (N) | Deformação Específica Resiliente | Diferença de Tensões (MPa)  | Número de Aplicações |

|   |      |       |       |        |           |      |       |
|---|------|-------|-------|--------|-----------|------|-------|
| 1 | 6,29 | 9,98  | 25,00 | 4750,0 | 0,0001965 | 1,89 | 11023 |
| 2 | 6,30 | 9,99  | 22,50 | 4275,0 | 0,0001764 | 1,70 | 12302 |
| 3 | 6,31 | 9,99  | 20,00 | 3800,0 | 0,0001566 | 1,50 | 15421 |
| 4 | 6,30 | 10,00 | 17,50 | 3325,0 | 0,0001371 | 1,32 | 23541 |