



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**CAMPUS DE CRATEÚS**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**FRANCISCO EMERSON FERREIRA DE MACEDO**

**ESTUDO DO VALOR DE SERVENTIA ATUAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL E DO  
ENVELHECIMENTO DO LIGANTE ASFÁLTICO REMOVIDO: TRECHO ENTRE  
OS MUNICÍPIOS DE CRATEÚS E INDEPENDÊNCIA  
(BR-226/CE)**

**CRATEÚS, CE.**

**2022**

FRANCISCO EMERSON FERREIRA DE MACEDO

**ESTUDO DO VALOR DE SERVENTIA ATUAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL E DO  
ENVELHECIMENTO DO LIGANTE ASFÁLTICO REMOVIDO: TRECHO ENTRE  
OS MUNICÍPIOS DE CRATEÚS E INDEPENDÊNCIA  
(BR-226/CE)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Janaina Lopes Leitinho.

CRATEÚS, CE.

2022

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

---

- M121e Macedo, Francisco Emerson Ferreira de.  
Estudo do valor de serventia atual de pavimento flexível e do envelhecimento do ligante asfáltico removido : trecho entre os municípios de Crateús E Independência (BR-226/CE) / Francisco Emerson Ferreira de Macedo. – 2022.  
44 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.  
Orientação: Profa. Dra. Janaina Lopes Leitinho.
1. Avaliação Subjetiva. 2. Cimento Asfáltico. 3. Reologia. 4. Pavimento Asfáltico. I. Título.  
CDD 620
-

FRANCISCO EMERSON FERREIRA DE MACEDO

ESTUDO DO VALOR DE SERVENTIA ATUAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL E DO  
ENVELHECIMENTO DO LIGANTE ASFÁLTICO REMOVIDO: TRECHO ENTRE OS  
MUNICÍPIOS DE CRATEÚS E INDEPENDÊNCIA (BR-226/CE)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Janaina Lopes Leitinho (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Msc. Jorge Luis Santos Ferreira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luisa Gardênia Alves Tomé Farias  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, por iluminar minha mente e me dar coragem para superar as dificuldades.

Aos meus pais, pelo suporte e encorajamento dado por todos esses anos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Jeová Deus, por me abençoar com saúde e sabedoria que me permitiram correr atrás dos meus objetivos.

A minha família, José Ednaldo, Maria Aparecida e Antonio Jefferson, que fizeram o seu melhor, dando-me sempre o seu apoio e amor.

A minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Janaina Lopes Leitinho, por sua compreensão, paciência e por estar meu lado em muitas batalhas que enfrentamos durante a minha graduação.

Aos membros da banca, Prof.<sup>a</sup> Luisa Gardênia Alves Tomé e Prof. Dr. Jorge Luis Santos Ferreira, pela disponibilidade de avaliar o meu trabalho.

A todos os meus colegas que contribuíram de alguma forma para a minha evolução como pessoa e profissional, como Bruno Moreira, Maria das Graças, João Victor Vale, Waldymar Araújo, Vanessa Soares, Thamires Ximenes, entre outros.

Aos grupos estudantis os quais fiz parte e somaram no meu conhecimento e me permitiram conhecer importantes colegas de trabalho: NIPI, PACCE e ProHabita.

A Universidade Federal do Ceará Campus Crateús e todo o suporte fornecido pelo seu corpo docente, direção e demais servidores, por seu empenho e dedicação de fazer desse lugar minha segunda casa durante estes anos.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”

Aldo Novak

## RESUMO

O Nordeste do Brasil é muito dependente das grandes rodovias, o que pode influenciar no desenvolvimento econômico. No Ceará, em 2021, apenas 3,8% das estradas pavimentadas estudadas pela CNT foram classificadas como ótimas, 3,5% como péssimas, 14,2% como ruins, 50,8% como regulares e 27,7% como boas. No interior do estado do Ceará entre os municípios de Crateús e Independência, no interior do Ceará encontra-se um trecho da BR-226 com problemas sistemáticos como fadiga, panelas e afundamentos que se agravam principalmente nos períodos chuvosos. Tal problema afeta diretamente a vida útil e a qualidade do pavimento. Assim, este trabalho busca analisar os problemas desta rodovia no trecho entre os municípios de Independência e Crateús, utilizando os métodos de Avaliação Subjetiva e Estudo Viscoelástico do Ligante Removido. Os dados obtidos apontam para a necessidade de manutenção corretiva, com base na sua classificação de ruim a péssimo, apresentando defeitos como fissuras, buracos, deformação e remendos. A partir dos estudos reológicos realizados neste trabalho é possível inferir um aumento da rigidez referente ao seu envelhecimento. Em todos os estudos reológicos, o ligante asfáltico removido apresentou um alto envelhecimento, indicando ser um dos motivos pelos quais o trecho entre as cidades apresenta inúmeros danos.

**Palavras-chave:** Avaliação Subjetiva; Cimento Asfáltico; Reologia; Pavimento Asfáltico.



## ABSTRACT

The Northeast of Brazil is very dependent on major highways, which can influence economic development. In Ceará, in 2021, only 3.8% of the paved roads studied by CNT were classified as excellent, 3.5% as poor, 14.2% as bad, 50.8% as regular, and 27.7% as good. In the interior of the state of Ceará between the towns of Crateús and Independência, there is a part of BR-226 with systematic problems such as fatigue cracking, potholes and rutting which worsen especially during rainy periods. This problem directly affects the service life and quality of the pavement. Thus, this work seeks to analyze the problems of this highway in the segment between the cities of Independência and Crateús, using the methods of Subjective Evaluation and Viscoelastic Study of the Recovered Binder. The data obtained point to the need for corrective maintenance, based on its poor to very poor classification, presenting defects such as cracks, potholes, deformation and seams. From the rheological studies it is possible to infer an increase in stiffness referring to its aging. In all rheological studies, the extracted asphalt binder showed a high aging, indicating that this is one of the reasons why the segment between the cities presents numerous damages

**Keywords:** Subjective Evaluation; Asphalt Binder; Rheology; Asphalt Pavement.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Mapa de rodovias do município de Crateús .....	15
2	Aplicação de carga no pavimento flexível .....	17
3	Camadas do pavimento flexível .....	18
4	Viscosímetro Brookfield DVII+ .....	19
5	Controlador de temperatura THERMOSEL .....	20
6	Relação entre o módulo de armazenamento, módulo complexo e módulo de perda .....	21
7	Trecho da rodovia BR-226 entre Crateús e Independência – CE .....	22
8	Proposta metodológica da avaliação do trecho estudado da BR-226 .....	23
9	Variação da Serventia com tráfego e tempo .....	24
10	Extrator do tipo Soxhlet .....	26
11	Aparelho RTFO .....	27
12	Pressure Aging Vessel (PAV) .....	27
13	Dynamic Shear Rheometer (DSR) .....	28
14	Fissuras perceptíveis no revestimento asfáltico .....	29
15	Desgaste severo do revestimento asfáltico .....	30
16	Panela encontrada no trecho .....	30
17	Deformação permanente .....	31
18	Remendo profundo em parte do trecho .....	31
19	Curvas Semi-logarítmicas da Viscosidade versus Temperatura .....	33
20	Curva mestra $G^*$ para as amostras LA, LA-RTFOT, LA-PAV e LA .....	35
21	Curva mestra $\delta$ para as amostras LA, LA-RTFOT, LA-PAV e LAR .....	36
22	Diagrama Black para as amostras LA, LA-RTFOT, LA-PAV e LAR .....	37

## LISTA DE TABELAS

<b>1</b>	<b>Limites de viscosidade para diferentes ligantes asfálticos .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Padrão de conforto de rolamento .....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>Valores de Serventia Atual / Avaliação Subjetiva .....</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>Parâmetros de temperatura de usinagem e compactação .....</b>	<b>33</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	Dynamic Shear Rheometer
ICPF	Índice de Condições do Pavimento Flexível
km	Quilômetro
LA	Ligante Asfáltico
LAR	Ligante Asfáltico Removido
RTFOT	Rolling Thin-Film Oven Test
PAV	Pressure Aging Vessel
SMA	Stone Matrix Asphalt
TCU	Tribunal de Contas da União
TUC	Temperatura de Usinagem e Compactação
UFC	Universidade Federal do Ceará
UV	Ultravioleta
VSA	Valor de Serventia Atual

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>16</b>
<b>1.4</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Pavimento</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Viscosidade Brookfield</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Curva Mestre</b> .....	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Avaliação subjetiva da superfície de pavimento flexível</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Condições da avaliação do pavimento</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Materiais betuminosos usados</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4</b>	<b>Envelhecimento RTFOT</b> .....	<b>26</b>
<b>3.5</b>	<b>Envelhecimento Oxidativo em Sistema de Vaso de Pressão (PAV)</b> .....	<b>27</b>
<b>3.6</b>	<b>Ensaio reológico em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)</b> .....	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Avaliação subjetiva do revestimento asfáltico</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2</b>	<b>Temperaturas de Usinagem e Compactação</b> .....	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Estudo reológico em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)</b> .....	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>39</b>
	<b>APÊNDICE A – FICHA DE AVALIAÇÃO</b> .....	<b>44</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Foi no século XIX que o Brasil deu início ao seu avanço na construção de estradas de rodagem. Mas, foi somente com a criação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (BRASIL, 2006) em 1937, que o país alavancou na expansão desse tipo de construção. A expansão ganhou força com a aprovação das leis Joppert. Em dezembro de 1945 a lei 8.463 reorganiza o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, cria o Fundo Rodoviário Nacional e dá outras providências que favoreceram a expansão das rodovias pavimentadas no Brasil (DNIT, 2022).

Em meados dos anos 90 foi instituído o Programa de Descentralização e Restauração de Malha, no qual tinha como objetivo restaurar e manter em bom estado as malhas rodoviárias por períodos de 5 anos. Este programa teve apoio do Banco Mundial o qual lançava mão de um modelo baseado na concessão de empresas regimentado regidas pelas leis n. 8.987 e 8.666 (DIETERICH, 2022).

Hoje em dia, as empresas seguem normas como DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço e o Manual de Restauração de pavimentos asfálticos, que norteiam tanto a construção de novas rodovias como também a restauração de rodovias com problemas, tendo em mente que se exige maior cautela em termos de proteção ambiental incluídas nos contratos fechados (COSTA e SÁNCHEZ, 2010).

Segundo Santos (2011), as características químicas, físicas e mecânicas dos materiais que compõem o pavimento vão se modificando com o tempo, características do tráfego e condições climáticas. A combinação destes efeitos sobre o pavimento e sua resistência a eles fornece a vida útil do mesmo. Pensando na manutenção destas vias e com objetivo de manter o nível de serviço adequado, torna-se necessário intervenções de restauração.

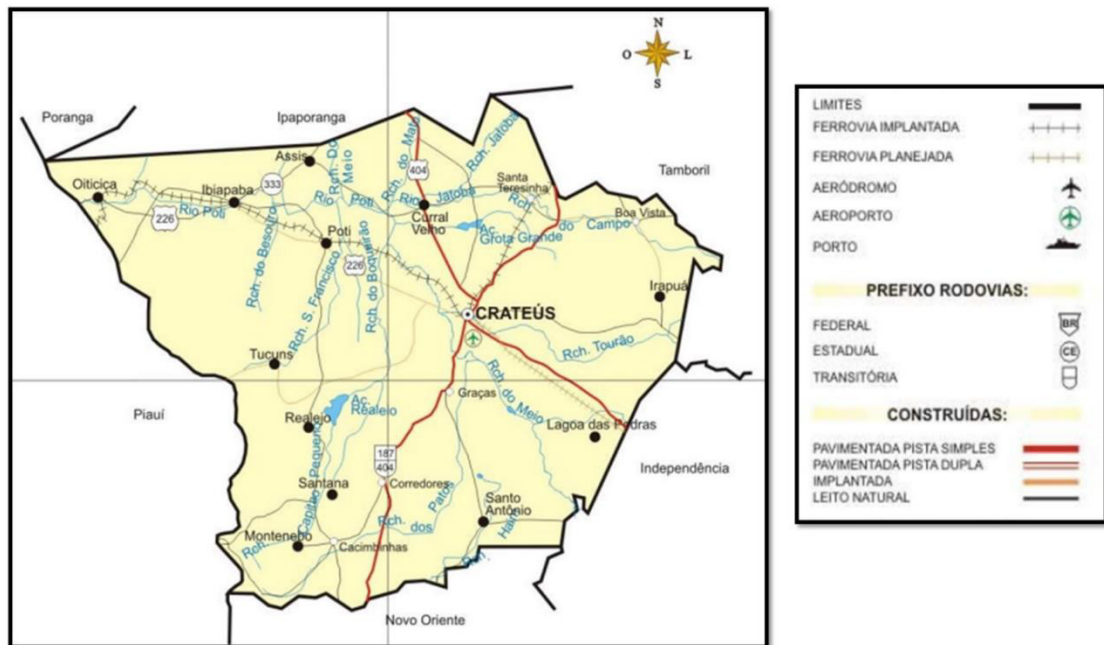
Outro grande empecilho na durabilidade dos pavimentos asfálticos no Brasil é a drenagem pluvial. Em regiões como o Norte (SOUZA *et al.*, 2012) e no Nordeste (MATEUS *et al.*, 2015), o período de chuva se concentra nos primeiros meses do ano, com elas há também o surgimento de panelas e/ou fissuras.

Em 2021, estudos da malha rodoviária do estado do Ceará, realizados pela CNT, mostraram que 68,5% estão classificadas entre péssimo, ruim e regular. Esta classificação acende um alerta quanto ao desenvolvimento econômico da região, principalmente no que se diz a respeito ao fluxo de mercadoria entre o Ceará e os demais estados do Brasil. O Ceará faz

fronteira com os estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba e Piauí e, portanto, possui um importante vínculo de estradas com estes estados do Nordeste.

As estradas que cortam ou conectam-se com a cidade de Crateús pertencem às esferas Federal e Estadual. Entre as que pertencem ao governo Federal estão as rodovias BR-226, BR-403 e BR-404 e as que pertencem ao governo do Estado, a saber, CE-187 e CE-333 que se completam e abrangem toda a microrregião dos Sertões de Crateús (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de estradas do município de Crateús.



Fonte: IPECE (2022, adaptado).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O ligante asfáltico (LA), também conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), são hidrocarbonetos compostos por 90 a 95% de carbono e 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais — vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes (BERNUCCI *et al.*, 2022). As cadeias orgânicas são compostas por 20 a 120 átomos de carbono. O CAP pode ser afetado pela presença de oxigênio, pela radiação ultravioleta e por variações de temperatura ocasionando um aumento de rigidez conhecido como envelhecimento. Segundo Morilha Jr., em 2004, o processo de envelhecimento pode ocorrer durante a estocagem, usinagem, aplicação e em serviço, tal fenômeno é responsável pela alteração das características físicas, químicas e reológicas do ligante, em especial, do aumento de sua consistência.

Em 1961, Traxler descobriu que a luz poderia acelerar o envelhecimento dos materiais do pavimento asfáltico. Este foi nomeado como envelhecimento foto-oxidativo. O envelhecimento por oxidação térmica ocorre durante a pavimentação asfáltica, incluindo a fase de mistura asfáltica, assentamento e compactação. Isso ocorre principalmente devido à perda de componentes leves de ligantes asfálticos em temperaturas elevadas.

Os danos causados pela água ao ligante asfáltico existem principalmente em duas formas. Uma primeira maneira seria a difusão da água em meio ao ligante asfalto, reagindo com componentes hidrofílicos e grupos polares levando à deterioração gradual do asfalto. O outro modo de deterioração do asfalto seria a aderência da água entre o ligante e os agregados.

A longo prazo, no entanto, os diferentes fatores como luz, oxigênio, umidade e calor agem de forma conjunta para o envelhecimento dos materiais do pavimento asfáltico e a degradação do desempenho do pavimento. Tais intempéries atuam de forma recorrente nos pavimentos localizados nos Sertões de Crateús o que nos leva a estudar o trecho da rodovia BR-226 entre Crateús e Independência. Segundo Oliveira (2020), a região apresenta uma média pluviométrica menor que 800 mm por ano e, temperatura média de superfície, em torno de 43 °C, o que somado às condições de radiação solar descrita por Lima (2015), para a região dos Sertões de Crateús, variando de 5,0 a 6,5 kWh/m<sup>2</sup> durante todo o ano, corroboram para o envelhecimento do pavimento do referido trecho em estudo.

### **1.3 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho busca avaliar o pavimento flexível e o envelhecimento do ligante asfáltico removido do trecho da BR-226 entre os municípios de Crateús e Independência, no estado do Ceará.

### **1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste estudo estão descritos a seguir:

- ✓ Detalhar os defeitos existentes em diferentes partes do trecho estudado;
- ✓ Caracterizar a condição atual do trecho a partir do Valor de Serventia Atual;
- ✓ Realizar um estudo reológico do ligante removido do pavimento;
- ✓ Caracterizar quimicamente a composição do CAP removido.



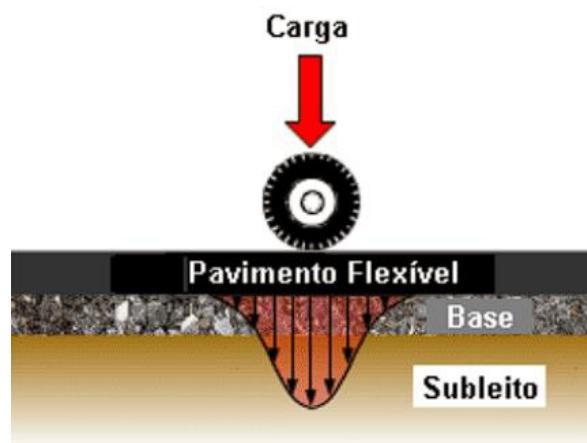
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Pavimento

No Brasil, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (BRASIL, 2006), o pavimento é uma obra de engenharia civil que é considerada uma superestrutura de espessura finita que está sobre uma fundação nomeada de subleito.

Para Marques (2006), o subleito deve receber uma aplicação ‘diluída’ de esforços transversais e longitudinais. Isso acontece porque o pavimento, ao longo de suas camadas, deve proporcionar uma dissipação de cargas, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Aplicação de carga no pavimento flexível.



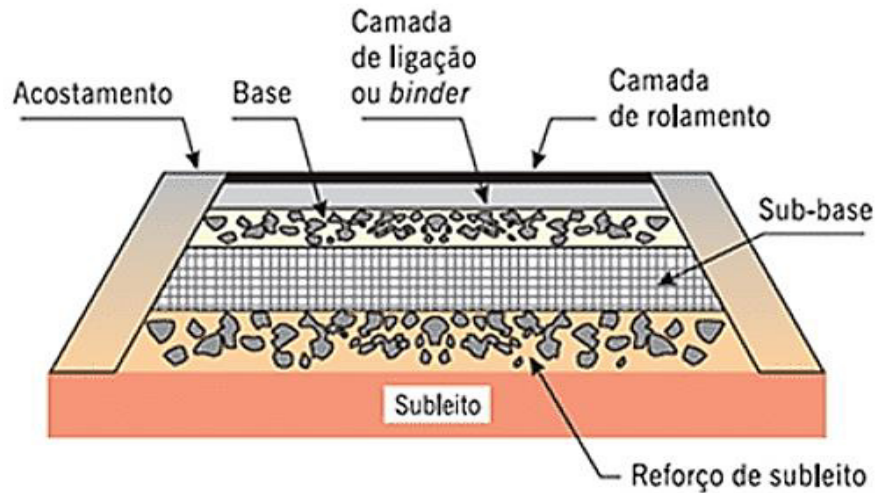
Fonte: ARAÚJO *et al.* (2016).

Também, o pavimento tem como função intrínseca fazer com que o rolamento seja confortável e seguro (BRASIL, 2011). Existem dois principais tipos de pavimento, o rígido e o flexível, que conforme Bernucci *et al.* (2022) são as duas grandes áreas de estudo de pavimentos com base na rigidez da sua constituição.

O pavimento flexível tem a função de absorver diversos impactos advindos do tráfego, distribuindo por suas camadas as cargas geradas na deformação de suas camadas superficiais. Seu revestimento é formado prioritariamente de materiais betuminosos. Sua base compõe-se de subleito, sub-base, base e na parte mais superficial, o revestimento asfáltico. (BRASIL, 2006a).

A Figura 3 ilustra de forma geral essas camadas constituintes do pavimento flexível.

Figura 3 – Camadas do pavimento flexível.



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2022).

Ao longo do tempo, os problemas em rodovias acarretam grandes prejuízos ao Estado, tanto pelas obras de restauração como em casos que essas não acontecem com a devida rapidez. Os prejuízos ainda podem ser maiores se considerarmos que, buracos na via, podem ocasionar perda de aderência dos pneus no pavimento aumentando os índices de colisões, seja por perda de controle do veículo ou simplesmente pelo tráfego na contramão/acostamento (BRASIL, 2011).

O uso de aditivos como polímeros ajudam a mistura asfáltica a lidar melhor com as intempéries do ambiente regional como, por exemplo, o regime de chuvas intenso das quadras chuvosas. Normalmente, a umidade no pavimento gera o deslocamento de ligante do agregado, o que juntamente com a variação de temperatura acelera a deterioração do pavimento. (ANITELLI, 2013).

Ao passo que o pavimento se desgasta cada vez mais, gerando a visibilidade da camada de solo que está na sub-base/base do concreto asfáltico, defeitos maiores do que apenas trincas e fissuras podem surgir, como, afundamentos, buracos, escorregamentos e maiores desgastes. Tal dificuldade em obter estradas de qualidade se deve principalmente ao fato de que, no Brasil, as exigências técnicas de suporte e de materiais não são atendidas, em especial, por falta de fiscalização (TCU, 2022).

## 2.2 Viscosidade Brookfield

A viscosidade Brookfield é determinada conforme a norma ASTM D4402 (1987) nas temperaturas e taxas de cisalhamento apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de viscosidade para diferentes ligantes asfálticos.

Características	Limites (cP)			
	CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	374	274	214	155
a 150°C, mín.	203	112	97	81
a 177°C, SP 21	76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114

Fonte: BERNUCCI *et al.* (adaptado, 2022).

O viscosímetro Brookfield de modelo DVII+ (Figura 4) acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL (Figura 5) são utilizados para analisar o comportamento viscoso do CAP e ligante asfáltico removido nas condições de serviço usando spindle de 21 a 20 rpm. A viscosidade é obtida através da rotação de cilindros que ficam imersos na amostra em teste. A ABNT NBR 15184 normatiza este método no Brasil. (FEITOSA, 2015)

Figura 4 – Viscosímetro Brookfield DVII+.



Fonte: GEMINIBV (2022).

Figura 5 – Controlador de temperatura THERMOSEL.



Fonte: INSTRUMENTACIÓN ANALÍTICA (2022).

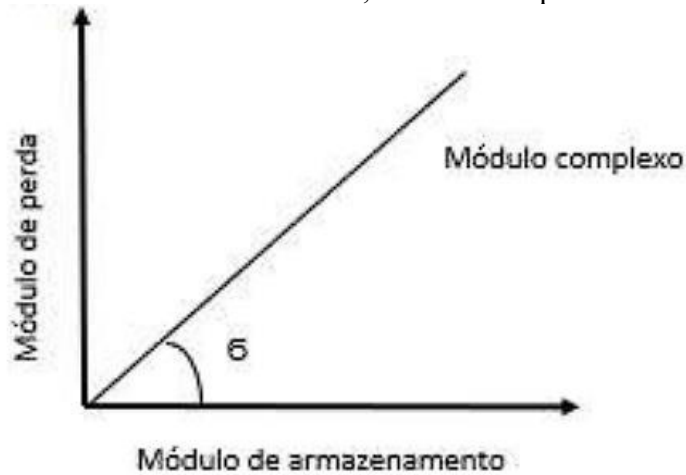
Para a análise de viscosidade utilizando o viscosímetro Brookfield há uma série de passos a serem seguidos, que vão desde a variação de velocidade de rotação do sensor, atingindo um certo gradiente de rotação até a determinação da viscosidade do ligante.

O gráfico da temperatura versus viscosidade rotacional possibilita o estudo de manuseio do ligante ainda no processo de usinagem, ou seja, indica a temperatura ideal no emprego da mistura (BERNUCCI *et al.*, 2022). É importante lembrar que para a usinagem, as temperaturas do ligante não devem ser inferiores a 107 °C e nem superior a 177 °C. Já para a compactação, a temperatura varia entre 135 e 180, contanto que a viscosidade se mantenha na faixa de  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s.

### 2.3 Curva Mestra

A partir do teste de varredura de tensão se determina a amplitude máxima das tensões, de acordo com as propriedades viscoelásticas constantes, em função da tensão de cisalhamento ou da deformação. Este valor não deve ultrapassar outros testes como a varredura por frequência, sendo que o valor que é resultado destes testes também é função da frequência (NASCIMENTO, 2007). Na Figura 6 é demonstrado na visão de um gráfico simples, que a variação do ângulo de fase  $\delta$  se dá para parâmetro mais ou menos viscoso de acordo com o Módulo complexo  $|G^*|$ , o módulo de armazenamento ( $G'$ ) e o módulo de perda ( $G''$ ).

Figura 6 – Relação entre o módulo de armazenamento, módulo complexo e módulo de perda.



Fonte: REBELO E ARAUJO (2021).

### 3 METODOLOGIA

A proposta metodológica deste trabalho é focada na avaliação da superfície do pavimento flexível existente na BR-226 entre os municípios de Independência e Crateús, no Ceará, utilizando a Avaliação Subjetiva por meio do Valor de Serventia Atual (VSA) e uma análise viscoelástica do ligante asfáltico removido e envelhecimento.

Os trechos selecionados para a realização do estudo correspondem a dois segmentos homogêneos e de extensão semelhante (2 km de extensão cada) da mesma rodovia, a BR-226, onde existem diferentes tipos de patologia definidos pelo DNIT (2003). Estes têm seu início localizado nos km 319 (Ponto 1) e km 311 (Ponto 2) sentido Crateús-Independência. A Figura 7 mostra a localização do trecho completo entre as cidades de Crateús e Independência.

Figura 7 - Trecho da rodovia BR-226 entre Crateús e Independência – CE.



Fonte: Google Maps (2022, adaptado).

### 3.1 Avaliação subjetiva da superfície de pavimento flexível

A avaliação foi realizada com base no Valor de Serventia Atual (VSA), que indica o grau de conforto e suavidade ao rolamento do determinado pavimento. O método de avaliação foi realizado de acordo com o procedimento da norma “Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semiflexíveis” (DNIT, 2003a).

Inicialmente, foram selecionados os trechos a serem avaliados como também um grupo de 5 pessoas conhecedoras da norma DNIT 009/2003 e dos critérios de avaliação subjetivo do pavimento asfáltico. A pesquisa é realizada de forma que cada membro do grupo atribui um Valor de Serventia Atual para determinado trecho após o seu tráfego. O fluxo de trabalho é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Proposta metodológica da avaliação do trecho estudado da BR-226.



Fonte: Autoria própria (2022).

A ficha de avaliação padronizada está contida no Apêndice A – Ficha de Avaliação. A partir da obtenção dos valores individuais de Serventia Atual do experimento de cada avaliador foram comparados e relacionados.

### 3.2 Condições da avaliação do pavimento

As condições restritivas impostas pela norma DNIT 009/2003 – PRO são descritas a seguir:

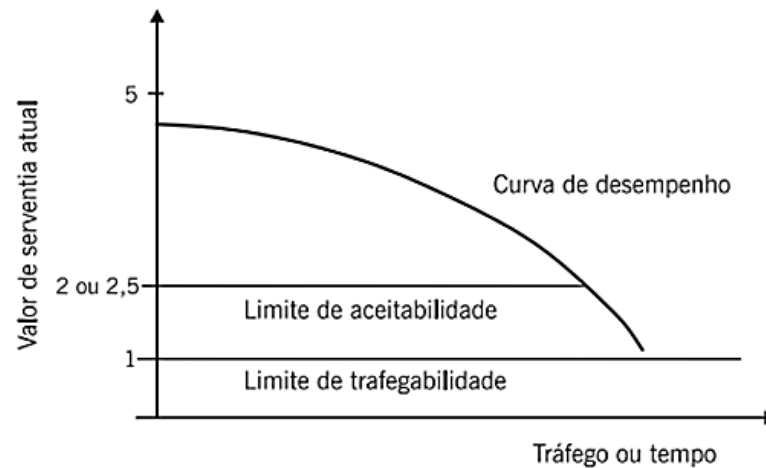
- Os trechos são comparados com uma rodovia de tráfego intenso, ou seja, com um alto fluxo de veículos comerciais e de passageiros;
- No momento da avaliação, leva-se em conta apenas o estado atual da rodovia, e não o que poderia acontecer a ela em um futuro próximo;
- Deve haver uma condição climática que permita a análise limpa do trecho, evitando chuva ou nevoeiro, que poderiam atrapalhar a visão dos avaliadores;
- As panelas, saliências, irregularidades transversais e longitudinais da superfície são os defeitos mais relevantes nessa avaliação, pois são os que influenciam de forma mais evidente o desconforto ao rolamento da via.

Após a avaliação dos trechos os resultados obtidos devem ser investigados de acordo com os limites de aceitabilidade e de trafegabilidade também definidos e descritos pela supracitada norma.



Para Bernucci *et al.* (2022), um limite de aceitabilidade baixo denota um rolamento desconfortável para o usuário naquela estrada. Tal limite está atrelado ao tráfego da rodovia conforme observado na Figura 9.

Figura 9 – Variação da Serventia com tráfego e tempo.



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2022).

De acordo com o guia de dimensionamento de pavimentos norte-americano da AASHTO, o método de avaliação subjetiva tem um valor limite de aceitabilidade uma nota 2,5 para estradas com alto tráfego de veículos e nota 2,0 para demais tipos de estradas. Valores menores são indicativos que a rodovia necessita de uma reabilitação.

Os resultados obtidos em cada trecho foram calculados pela seguinte equação 1:

$$VSA = \frac{\sum X}{n}$$

(1)

Onde:

VSA – Valor de Serventia Atual;

X – Valores de Serventia Atual individuais atribuídos por cada avaliador;

N – Número de avaliadores.

A escala utilizada pela norma é de 0,0 a 5,0 representando respectivamente pavimentos “péssimo” a “ótimo”, conforme representado na Figura 6. Cada avaliador preenche sua ficha individualmente e indica um valor no ábaco contido na ficha de avaliação. Conforme



a média realizada a partir da equação 1, os valores são espelhados de acordo com a Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Padrão de conforto de rolamento.

<b>Padrão de conforto ao rolamento</b>	<b>Avaliação (notas)</b>
Ótimo	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

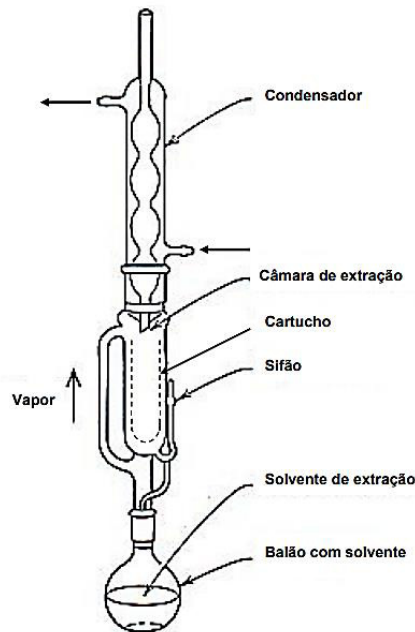
Fonte: BERNUCCI *et al.* (adaptado, 2022).

### 3.3 Materiais betuminosos usados

Foi usado para o estudo de envelhecimento os seguintes ligantes: CAP 50/70 cedido pela Petrobras aqui denominado de LA, o CAP 50/70 envelhecido no RTFOT é referenciado no texto como LA-RTFOT, o CAP 50/70 envelhecido no PAV é descrito no texto como LA-PAV e o ligante asfáltico removido é aqui chamado de LAR.

O ligante asfáltico removido foi extraído com ajuda de um extrator do tipo Soxhlet (Figura 10). Foram pesados 500g ligante asfáltico removido os quais foram envoltos com papel filtro formando um cartucho fechados na base e no topo. O cartucho, com a amostra, foi colocado na câmara de extração do Soxhlet e, em seguida, foi iniciado o processo de extração do ligante com o refluxo do solvente (tricloroetileno).

Figura 10 – Extrator do tipo Soxhlet.



Fonte: DNIT (2011).

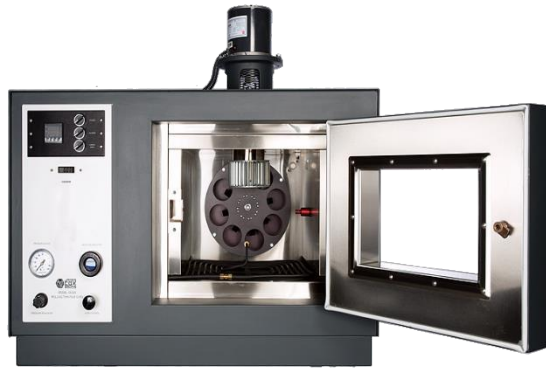
O ligante removido pelo processo de extração é então levado para a centrifugação em rotação de 1.930 rpm, durante 30 minutos, para garantir a completa extração de possíveis partículas sólidas e posteriormente destiladas usando o processo Abson. Nesse procedimento, são utilizados aquecimento e fluxo de gás  $\text{CO}_2$  de forma controlada, para prevenir o craqueamento do ligante e garantir o arraste do solvente (ASTM D1856, 2009). Após a extração a amostra foi estudada pelo DSR para estudo do envelhecimento.

### 3.4 Envelhecimento RTFOT

O envelhecimento a curto prazo do LA foi realizado pelo RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test). O envelhecimento realizado pelo RTFOT simula o envelhecimento do ligante durante a usinagem e compactação da mistura.

Para a preparação da amostra de teste e do equipamento, o forno RTFO é pré-aquecido à temperatura de teste  $163\text{ }^\circ\text{C}$  até 16 horas antes do teste. A rotação é fixa em 15 rpm e o jato de ar é fixo em 4000 ml/min. O equipamento usado foi modelo DESPATCH. O aparelho pode ser observado na Figura 11 abaixo.

Figura 11 – Aparelho RTFO.



Fonte: PAVEMENT INTERACTIVE (2022).

Os filmes para envelhecimento foram preparados com 35g de CAP 50/70, vertidos em vidros específicos do equipamento RTFO, para garantir a formação de filme fino. A amostra foi então levada para o equipamento e o teste é iniciado. As amostras permanecem no forno durante 85 minutos, após este intervalo são retiradas pesadas e preparadas para estudos reológicos

### 3.5 Envelhecimento Oxidativo em Sistema de Vaso de Pressão (PAV)

Para simular o envelhecimento do ligante asfáltico em serviço, aproximadamente 10 anos, 50g da amostra de CAP 50/70, previamente submetida ao RTFOT, foi submetida a uma pressão de ar de 2,1 MPa, por um período de 20 horas, a 100 °C no Vaso de Pressão (Pressure Aging Vessel – PAV) ASTM D6521–13 (2013). O equipamento utilizado foi a estufa de modelo 9300, da Prentex (Figura 12).

Figura 12 – Pressure Aging Vessel (PAV).



Fonte: PAVEMENT INTERACTIVE (2022a).

Após este período as amostras foram estudadas por reômetro para estudos dos efeitos do envelhecimento oxidativo no ligante e posterior análise dos efeitos do envelhecimento comparados ao comportamento reológico do ligante asfáltico removido.

### 3.6 Ensaios reológicos em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)

As propriedades reológicas do LA, LA-RTFOT, LA-PAV e do LAR foram estudadas através de ensaios em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) da TA, modelo AR 2000 (Figura 13).

Figura 13 – Dynamic Shear Rheometer (DSR).



Fonte: TA INSTRUMENTS (2022).

A metodologia consiste em aplicar uma tensão cisalhante sob uma amostra de ligante no formato circular e, logo em seguida, aplica-se uma tensão cisalhante no sentido contrário, formando uma oscilação, em dadas condições de frequência e temperatura.

O estudo reológico de ligantes é realizado a altas temperaturas e em temperatura intermediárias e para tanto usa-se moldes de amostras adequados para cada um deles. Para o estudo em temperaturas elevadas usa-se molde de 25 mm de diâmetro por 1 mm de espessura enquanto que para estudos com temperaturas intermediárias usa-se amostras de ligantes moldadas na forma circular com 8 mm de diâmetro por 2 mm de espessura. Os parâmetros

medidos por esses ensaios são o módulo complexo ( $G^*$ ), o módulo de armazenamento ( $G'$ ), o módulo de perda ( $G''$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Avaliação subjetiva da superfície de pavimento flexível

As Figuras 14 a 18 mostram algumas patologias citadas na norma DNIT 005/2003 – TER encontradas no decorrer do trecho estudado. O tamanho dos danos foi comparado usando como referência uma caneta esferográfica de 15 cm de comprimento.

A Figura 13 apresenta fissuras com largura capilar, perceptível a pelo menos uma distância de 1,5 m. Na Figura 14 também é possível verificar a presença de buracos com diâmetro em torno de 30 a 40 cm.

Figura 14 – Fissuras perceptíveis no revestimento asfáltico.



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 15 apresenta um desgaste e um arrancamento progressivo do agregado do pavimento, identificado pela aspereza superficial do revestimento. O dano estudado tem dimensões em torno de 3 m<sup>2</sup>.



Figura 15 – Desgaste severo do revestimento asfáltico.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 16 verifica-se a formação de buraco (ou panela) na qual é possível visualizar camadas inferiores do pavimento. A extensão aproximada do dano é de 6 m<sup>2</sup>.

Figura 16 – Panela encontrada no trecho.



Fonte: Autoria própria (2022).

Observa-se na Figura 17 uma deformação permanente em forma de depressão na superfície do pavimento evidenciada pela diferença de nível na via. A extensão do dano é de aproximadamente 5 m<sup>2</sup>.

Figura 17 – Deformação permanente.



Fonte: Aatoria própria (2022).

No trecho estudado ainda é possível verificar pontos com remendos os quais correspondem a buraco preenchido com uma ou mais camadas de pavimento na operação “tapa-buraco” (Figura 18).

Figura 18 – Remendo profundo em parte do trecho.



Fonte: Aatoria própria (2022).

A Tabela 3 apresenta os valores de serventia e os conceitos dos avaliadores a respeito dos trechos 1 e 2 estudados.



Tabela 3 – Valores de Serventia Atual / Avaliação Subjetiva

<b>Avaliadores/Notas</b>	<b>Valor do Trecho 1</b>	<b>Conceito do Trecho 1</b>	<b>Valor do Trecho 2</b>	<b>Conceito do Trecho 2</b>
Avaliador 1	1,5	Ruim	2,5	Regular
Avaliador 2	1,0	Ruim	2,0	Regular
Avaliador 3	0,5	Péssimo	1,5	Ruim
Avaliador 4	1,0	Ruim	2,5	Regular
Avaliador 5	1,0	Ruim	2,0	Regular
<b>VSA</b>	<b>1,0</b>	<b>Ruim</b>	<b>2,1</b>	<b>Regular</b>

Fonte: Autoria própria (2022).

Observa-se na Tabela 2 que o trecho 1 foi avaliado com nota média igual a 1 indicando ser um trecho de péssimo a ruim. O trecho 2 teve nota média 2,1 se enquadrando no conceito regular. Assim pode-se inferir que ambos os trechos necessitam de manutenção corretiva, pois o valor de serventia é menor que o limite de aceitabilidade exigido na norma DNIT 009/2003 – PRO. É importante evidenciar que os avaliadores foram bastante congruentes em suas avaliações, não havendo grande dispersão entres as notas atribuídas, o que torna a classificação mais confiável.

A cidade de Independência é de pequeno porte e possui grande dependência mútua em comércio e empregos em relação à cidade de Crateús. O aumento gradativo de circulação de veículos agrava a deterioração do pavimento asfáltico, levando a recorrentes correções no trecho.

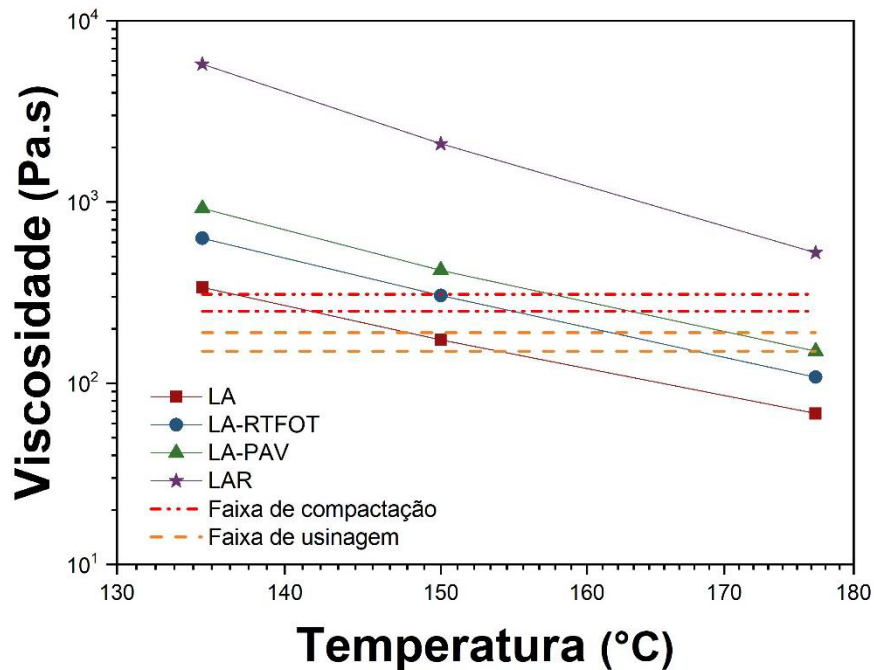
Assim, é aconselhável a elaboração de um plano de ação que indique uma série de manutenções e fiscalizações, com medidas de manutenção que atendam aos critérios de qualidade, tempo e custo a fim de garantir uma restauração eficiente das condições de superfície desse pavimento asfáltico. Com intuito de estudar a relação dos danos com o envelhecimento do pavimento foram realizados estudos com o ligante asfáltico removido da rodovia estudada.

#### **4.2 Temperaturas de Usinagem e Compactação**

As Curvas Semi-logarítmicas da Viscosidade versus Temperatura (CLVT) para a obtenção das Temperaturas de Compactação e Usinagem foram construídas através dos dados obtido pelo viscosímetro Brookfield e montadas conforme a norma ASTM D2493 (2009) e são apresentadas na Figura 19. Para o estudo, o ligante removido foi estudado juntamente com o CAP 50/70, cedido pela Petrobras, com objetivo de verificar semelhanças e diferenças entre os ligantes.



Figura 19 – Curvas Semi-logarítmicas da Viscosidade versus Temperatura.



Fonte: Autoria própria (2022).

Os limites de viscosidade da faixa de compactação são 250 cP e 310 cP. Por sua vez, os limites de viscosidade da faixa de usinagem são 150 cP e 190 cP. A temperatura de usinagem (TU) e de compactação (TC) extraídas de curvas semi-logarítmicas da Viscosidade versus Temperatura (Figura 19) são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de temperatura de usinagem e compactação.

Amostra	TU (°C)	TC (°C)
LA	147 a 153	136 a 141
LA-RTFOT	161 a 168	149 a 154
LA-PAV	170 a 176	157 a 163
LAR	Fora da faixa	Fora da faixa

Fonte: Autoria própria (2022).

Analisando os valores de TC e TU na Tabela 3 percebe-se que o processo de envelhecimento do ligante asfáltico tem reflexo direto na viscosidade do ligante. Assim, à medida que o envelhecimento é induzido, no CAP 50/70, há um aumento na viscosidade. Para Silva e Araújo (2016), o fenômeno do “envelhecimento” é responsável por modificar as características do CAP, gerando uma redução no ciclo de vida da camada.

É possível avaliar, ainda, que o processo de envelhecimento causou uma elevação nas temperaturas de compactação e usinagem das amostras estudadas, principalmente para LAR, que apresentou valores de TUC fora da faixa prevista pelo DNIT, fato este que determina negativamente a trabalhabilidade do ligante em serviço, além de atribuir característica do grau de envelhecimento dos materiais betuminosos. Para Silva (2005), o processo de envelhecimento do LA leva ao consumo das suas frações mais leves e que, por oxidação, converte parte destas frações em resinas de maior massa molar, que em seguida são transformadas em moléculas pesadas, chamadas de asfaltenos. O envelhecimento do ligante asfáltico removido tem ainda influência da ação da radiação UV, temperatura, oxigênio e intemperismos as quais promovem uma maior rigidez (SILVA E FARIAS, 2020; ARAÚJO, 2012).

Os valores obtidos na Tabela 3 indicam ainda que, o LAR necessita de ter suas propriedades recuperadas, caso a intenção seja de reuso do mesmo. O uso de aditivos químicos ao material envelhecido, os chamados agentes rejuvenescedores, são necessários para reduzir a viscosidade, recompor as resinas e os compostos aromáticos os quais diminuem a rigidez do material betuminoso (SILVA, 2011).

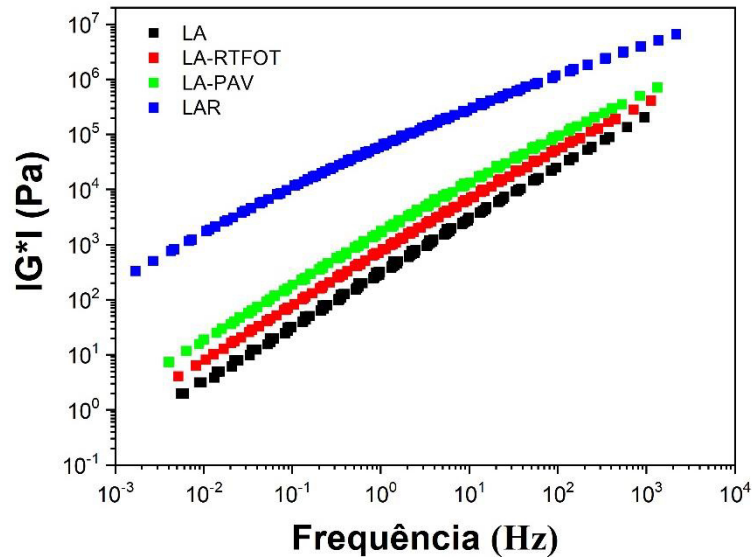
#### **4.3 Estudo reológico em reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)**

As curvas mestras foram construídas a partir do princípio da superposição frequência-temperatura, utilizando como referência a temperatura de 60 °C. A Figura 20 apresenta as curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico para os ligantes estudados. Verifica-se que o LAR apresenta comportamento bem diferente do LA e LA-RTFOT e LA-PAV. A comparação com o LAR com o CAP 50/70 dá-se pelo mesmo ser o mais usado no Brasil e no Ceará. A comparação entre ligantes 50/70 e o LAR de origem ignorada é ainda fundamentada na literatura (MAZZONI, 2020).

Mazzoni (2020) pesquisou três ligantes asfálticos, oriundos de diferentes fontes e com diferentes classificações, e constatou que as propriedades viscoelásticas e o processo de envelhecimento dos três ligantes apresentaram um valor limite de deformação da região viscoelástica linear nos diferentes níveis de envelhecimento e temperatura. No estudo o autor verificou que os ligantes investigados apresentaram a mesma tendência de comportamento no processo de envelhecimento, apesar de serem de diferentes fontes e classificação por grau de desempenho. O estudo supracitado é um indicativo da possibilidade de avaliação dos efeitos químicos e reológicos relacionados ao processo de envelhecimento que são comuns a ligantes

de diferentes fontes, suportando assim, a discussões decorrentes do processo de envelhecimento de ligantes asfálticos de diferentes fontes proposto nesse trabalho.

Figura 20 – Curva mestra  $G^*$  para as amostras LA, LA-RTFOT, LA-PAV e LAR.



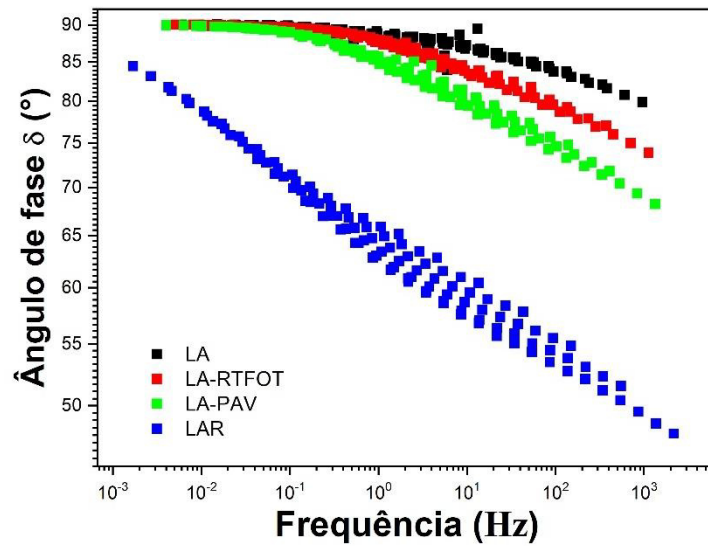
Fonte: Autoria própria (2022).

A grande diferença entre os ligantes é observada nos elevados valores de  $|G^*|$  para o LAR, o que pode indicar um desempenho à deformação permanente, comparativamente, superior, em todas as faixas de temperaturas, uma vez que ligantes com elevada rigidez tendem também a resistir melhor à deformação, enquanto que o LA apresenta a rigidez menor que os envelhecidos em até dez ordens de grandeza (LA-PAV). Este comportamento é justificado pelo fato de que no LAR há uma maior quantidade de frações pesadas, uma vez que este material é, comparativamente, o mais envelhecido.

Há de se considerar também o fato de que o  $|G^*|$  é definido como a razão da taxa de cisalhamento máximo com a deformação máxima e fornece à medida da resistência total a deformação quando o ligante asfáltico é sujeito a um carregamento, ou seja, um alto módulo de cisalhamento complexo ( $G^*$ ) representará maior rigidez do material, característica compatíveis com um material envelhecido e, proporcionalmente, com mais frações pesadas, no caso os asfaltenos (CRAVO, 2016; SILVA, 2005).

A Figura 21 apresenta a avaliação da resposta viscoelástica dos materiais estudados, conforme o grau de envelhecimento.

Figura 21 – Curva mestra  $\delta$  para as amostras LA, LA-RTFOT, LA-PAV e LAR.



Fonte: Autoria própria (2022).

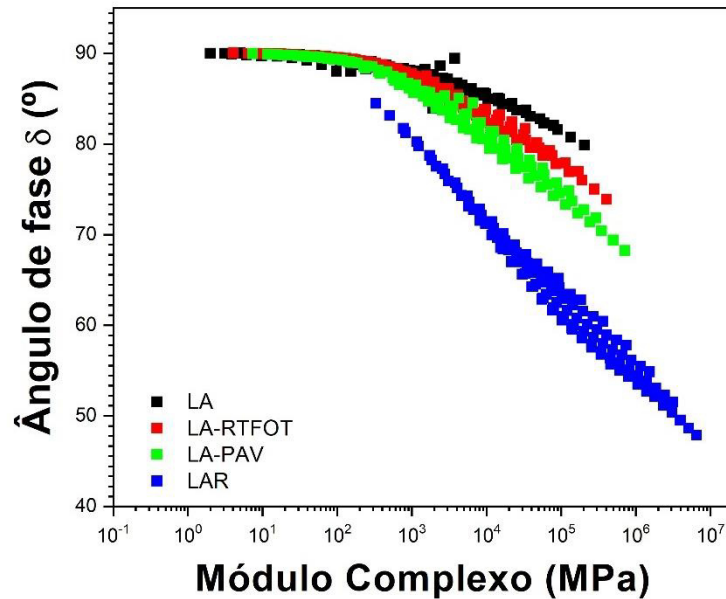
O ângulo de fase do LA, LA-RTFOT e LA-PAV, apresentaram um comportamento mais viscoso nas frequências baixas e com tendência a um comportamento mais elástico com o aumento da frequência de carregamento. Há de se considerar uma particularidade nos ligantes envelhecidos em RTFOT e PAV, em frequências altas os ligantes estão mais elásticos, e tornam-se mais viscosos à medida que a frequência diminui, com uma ordem de grandeza de quase 10 graus entre os valores de  $\delta$ , o que pode ser decorrente do processo de envelhecimento.

Vale informar ainda que em altas frequências, os ligantes envelhecidos (LA-RTFOT e LA-PAV) tiveram o ângulo de fase um pouco menor que o CAP 50/70, indicando o comportamento mais elástico após o envelhecimento. Nas frequências baixas, equivalente a altas temperaturas, o aumento do nível de envelhecimento não alterou o comportamento do ligante, com exceção do LAR que para as mesmas frequências, as condições apresentaram o ângulo de fase muito próximo a 90°.

É válido registrar que, conforme a temperatura aumenta, ou a frequência diminui, o LAR torna-se mais viscoso e, a partir daí as espécies mais pesadas presentes no material são as responsáveis pelas respostas do material (DOMINGOS e FAXINA, 2013; AIREY, 2003).

O efeito do processo de envelhecimento na modificação no módulo complexo  $G^*$  e ângulo de fase ( $\delta$ ) são mostrados nos diagramas Black, um gráfico de ângulo de fase ( $\delta$ ) versus módulo complexo ( $G^*$ ) não contendo nenhuma temperatura ou frequência de referência (Figura 22).

Figura 22 – Diagrama Black para as amostras LA, LA-RTFOT, LA-PAV e LAR.



Fonte: Autoria própria (2022).

Os diagramas Black foram produzidos para comparar o desempenho reológico do CAP, dos CAPs envelhecidos (LA-RTFOT e LA-PAV) e do (LAR). Efeitos causados pelo processo de envelhecimento são destacados por estes diagramas. O comportamento das curvas (LA, LA-RTFOT e LA-PAV) apresentaram o mesmo padrão nas curvas Black diferindo apenas na magnitude dos parâmetros.

Segundo Fernandes (2011), ligantes modificados que possuem uma maior resistência à deformação permanente, utilizados em locais de climas quentes, apresentam ângulos de fase menores se comparados ao CAP 50/70. Por estar mais à direita, a curva do LAR indica a maior intensidade do envelhecimento desse ligante asfáltico, e sua maior inclinação representa sua menor susceptibilidade a altas temperaturas (FLENGER, 2018; BRINGEL *et al.*, 2009).

## 5 CONCLUSÃO

Os trechos 1 e 2 foram avaliados quanto ao grau de serventia atual e obtiveram resultados com classificação de ruim a péssimo. A avaliação subjetiva para o trecho 1 e 2 são respectivamente 1 e 2,1, pelos quais é possível inferir que, devido ao fluxo constante de veículos, associada aos altos índices de radiação solar da região, há uma quantidade elevada de

remendos advindos de operações tapa-buraco regulares, sem eliminar todos os defeitos existentes.

A partir das temperaturas, notou-se que os ligantes envelhecidos têm aumento em sua consistência refletindo em uma redução no ciclo de vida da camada. O ligante asfáltico removido pode, portanto, ser reutilizado desde que sejam adicionados aditivos rejuvenescedores reduzindo sua viscosidade, adequando sua temperatura de compactação e usinagem e melhorando sua trabalhabilidade (TOMÉ, 2014).

Através da curva mestre  $|G^*|$  é possível indicar que, quanto mais envelhecidos os ligantes sofrem menos com o efeito da variação da temperatura e da frequência de carregamento, indicando aumento da rigidez à medida que o ligante envelhece.

O efeito do processo de envelhecimento para os ligantes foi observado no diagrama Black conforme a diferença na magnitude relacionada com o aumento da rigidez.

Em todos os estudos reológicos o LAR apresentou um alto envelhecimento indicando ser um dos motivos pelos quais o trecho apresenta inúmeros danos. O envelhecimento é, portanto, um norteador na escolha do ligante asfáltico removido para um possível reuso, uma vez que, a rigidez deve ser controlada com aditivos rejuvenescedores.

Para trabalhos futuros é almejada a realização de um estudo mais aprofundado das condições e defeitos encontrados na BR-226 a partir de uma avaliação objetiva utilizando o ICPF, com base na norma DNIT 006/2003-PRO, e o Índice de Gravidade Global (IGG). Também, é almejado avaliar processos de envelhecimento e o efeito da radiação UV de forma mais profunda em diferentes CAPs, assim como também estudar quimicamente mais a fundo as diferentes composições de ligantes asfálticos e sua influência na vida útil dos revestimentos utilizados na região.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15184: **Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro – RJ, 2021.
- AIREY, G. D. **Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens**. Fuel, v. 82, n.14, p. 1709-1719, 2003.
- ANITELLI, A. **Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos – SP, 2013.
- ARAÚJO, M. de. F. A. de. S. **Efeito da radiação solar no envelhecimento de ligantes asfálticos modificados**. Tese de Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG, 2012.
- ARAÚJO, M. A., *et. al.* **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, ano 01, ed. 11, vol. 10, p. 187-196, 2016.
- ASTM D4402 – **Standard Practice Test Method For Viscosity Determinations Of Unfilled Asphalts Using The Brookfield Thermosel Apparatus**. American Society for Testing Materials, 1987.
- ASTM D2493 – **Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders**. American Society for Testing Materials, 2009.
- ASTM D6521 – **Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. American Society for Testing Materials, 2013.
- ASTM D6560 – **Standard Test Method for Determination of Asphaltenes (Heptane Insolubles) in Crude Petroleum and Petroleum Products**, American Society for Testing Materials, 2017.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros, 2ª. Edição**. Petrobrás, ABEDA, Rio de Janeiro – RJ, 2022.
- BRASIL, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de Pavimentação, 2 ed.** Rio de Janeiro – RJ, 2006.
- BRASIL, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos, 2 ed.** Rio de Janeiro – RJ, 2006a.

BRASIL, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Rio de Janeiro – RJ, 2011.

BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. Dissertação de Mestrado em Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza – CE, 2007.

COSTA, R. M.; SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação do desempenho ambiental de obras de recuperação de rodovias**. Revista Esc. Minas, ed. 63, n. 2, p. 247-254, Ouro Preto, 2010.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2016.

DIETERICH, F. B. **Concessão de CREMA**. Disponível em <http://www.pppbrasil.com.br/portal/content/artigo-concess%C3%A3o-de-crema>. Acesso em 30 de julho de 2022.

DNIT. **Breve Histórico**. Disponível em <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/historia>. Acesso em 30 de julho de 2022.

DNIT. **Norma 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia**. 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), 2003.

DNIT. **Norma 009/2003 – PRO: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento**. Disponível em [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/dnit\\_009\\_2003\\_PRO](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/dnit_009_2003_PRO), 2003a.

DNIT. **Norma 031/2006 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Disponível em [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031\\_2006\\_es.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031_2006_es.pdf), 2006.

DNIT. **Norma 158/2011 – ME: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio**. Disponível em [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit\\_158\\_2011\\_me.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_158_2011_me.pdf), 2011.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. **Avaliação do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com SBS e ácido polifosfórico**. Revista Transportes, v. 21, n.1, p. 51-58, 2013.



FEITOSA, J. P. M. **Avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivos para misturas mornas.** Tese de Doutorado em Química, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza – CE, 2015.

FERNANDES, P. R. N.; SOARES, S. A. **Avaliação do desempenho de ligante asfáltico modificado por poli (ácido fosfórico) (PPA) e efeitos da adição do líquido da casca da castanha de caju (LCC).** Tese de Doutorado em Química Orgânica, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza – CE, 2011.

FLENGER, R. Z. **Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de Trinidad Lake Asphalt.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2018.

GEMINIBV. **Brookfield model LVT/DV-II Digital viscometer.** Disponível em <https://www.geminibv.com/labware/brookfield-model-lvt-dv-ii-digital/>. Acesso em 15 de agosto de 2022.

GOOGLE MAPS. **BR-226/CE, trecho entre Crateús-Independência (30 de julho de 2022).** Google. Disponível em <https://www.google.com/maps/dir/Crate%C3%BA,+CE/-5.3927728,-40.3169935/@-5.3881892,-40.3211442,12.46z/data=!4m9!4m8!1m5!1m1!1s0x796f04deb335aa7:0x1db43189e3269198!2m2!1d-40.6696229!2d-5.17808!1m0!3e0>. Acesso em 30 de julho de 2022.

INSTRUMENTACIÓN ANÁLITICA. **Thermosel con programador de temperatura- Accesorio para medir a altas temperaturas.** Disponível em <https://www.instru.es/thermosel-con-programador-de-temperatura-accesorio-para-medir-a-altas-temperaturas/>. Acesso em 15 de agosto de 2022.

IPECE, INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal.** Disponível em [https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/01/Crateus\\_Br\\_office.pdf](https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/01/Crateus_Br_office.pdf). Acesso em 30 de julho de 2022.

LIMA, F. J. L. de. **Previsão de irradiação solar no Nordeste do Brasil empregando o modelo WRF ajustado por redes neurais artificiais (RNAs).** Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Pesquisa Científica – INPE, São José dos Campos – SP, 2015.

MARQUES, G. L. de O. **Pavimentação TRN 032.** Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora – MG, 2006.

MATEUS, A. E., *et al.* **Perspectivas em Variáveis Meteorológicas para o Estado do Ceará.** Revista Brasileira de Geografia Física, ed. 8, n. 5, p. 1383-1392, 2015.

MAZZONI, L. N.; TAKAHASHI, M. M.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. **Avaliação da influência do envelhecimento e da temperatura nas características viscoelásticas de ligantes asfálticos.** Revista Transportes, v. 28, n.1, p. 135-146, 2020.

MORILHA JR., A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis – SC, 2004.

NASCIMENTO, C. R. **Ensaio em reômetro rotacional tipo cilindros coaxiais.** IN: **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais.** CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, p. 425-447, 2007.

OLIVEIRA, J. R. F. de. **O clima urbano em cidade de pequeno porte no semiárido cearense: o caso de Crateús.** Tese de Doutorado em Geografia, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza – CE, 2020.

PAVEMENT INTERACTIVE. **Rolling Thin-Film Oven.** Disponível em <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/rolling-thin-film-oven/>. Acesso em 30 de julho de 2022.

PAVEMENT INTERACTIVE. **Pressure Aging Vessel.** Disponível em <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/pressure-aging-vessel/>. Acesso em 30 de julho de 2022a.

REBELO, J. F.; ARAUJO, R. G. **Análise do comportamento reológico de resinas compostas odontológicas com diferentes teores de carga.** UNISOCIESC, Joinville – SC, 2021.

SANTOS, C. R. G. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística.** Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo – SP, 2011.

SILVA, L. S. da. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV.** Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre – RS, 2005.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas.** Tese de doutorado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Universidade de Brasília – UnB, Brasília – DF, 2011.

SILVA, J. P. S.; ARAUJO, R. F. de. **Estudo do Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos a partir do Modelo de Arrhenius.** Revista Desafios, v. 03, n. 01, 2016.

SILVA, L. S., *et al.* **Análise comparativa entre as técnicas construtivas de pavimentação empregadas no sistema Bus Rapid Transit (BRT) - Belém - PA versus Fortaleza – CE.** Revista de Ciência e Tecnologia, ed. 4, n.6, 2018.

SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M. de. **Estudo dos efeitos de produtos rejuvenescedores no comportamento físico, químico e reológico de ligante asfáltico envelhecido.** Revista Transportes, ANPET, v.28, n.3, p. 91-102, 2020.

SOUZA, R. O. R. de M., *et al.* **Equações de chuvas intensas para o Estado do Pará.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, ed. 16, n. 9, p. 999-1005, Campina Grande – PB, 2012.

TA INSTRUMENTS. **The Ta Instruments Rheometer.** Disponível em <http://www.tainstruments.com/pdf/literature/ar2000.pdf>. Acesso em 15 de agosto de 2022.

TAKAHASHI, M. M. **Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo – SP, 2020.

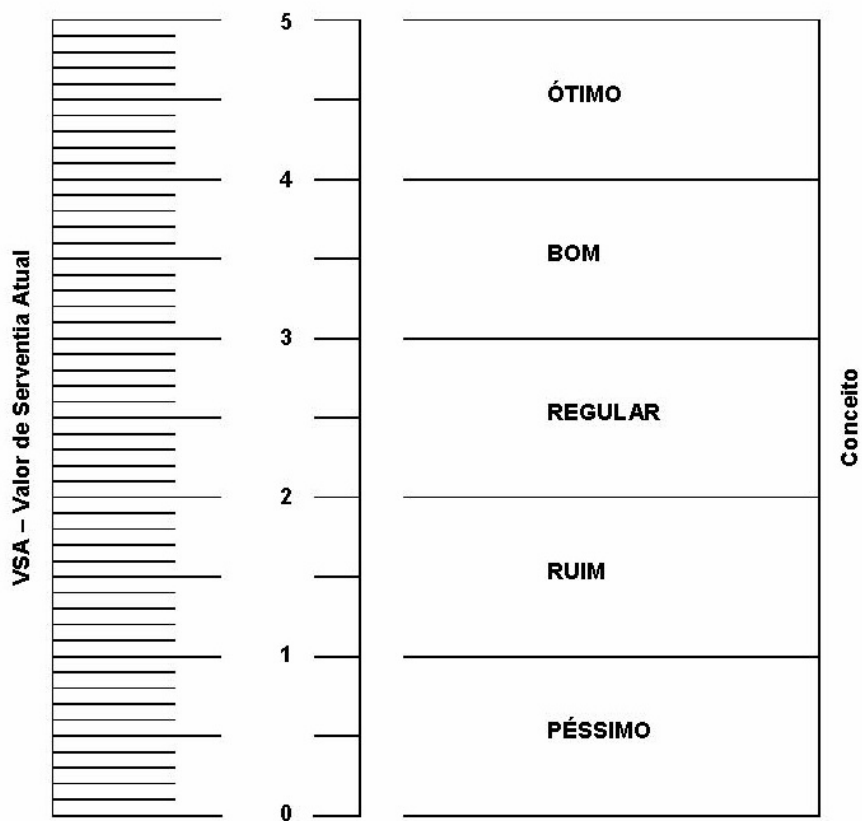
TCU. **Contratos de gerenciamento de obras do DNIT precisam de mais critérios técnicos.** Disponível em <https://portal.tcu.gov.br/imprensa/noticias/contratos-de-gerenciamento-de-obras-do-dnit-precisam-de-mais-criterios-tecnicos.htm>. Acesso em 30 de julho de 2022.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2ª ed.** Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

TOMÉ, L. G. A. **Efeito da adição de nanoargilas e nanocompósitos argila/SBS no desempenho de ligantes asfálticos.** Tese de Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza – CE, 2014.

TRAXLER, R. N. **Relation between asphalt composition and hardening by volatilization and oxidation.** Association of Asphalt Paving Technologist, Proceedings v. 30, p. 359-372, 1961.

## APÊNDICE A – FICHA DE AVALIAÇÃO



Rodovia: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Observações: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nº do Avaliador: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

\_\_\_\_\_ /Índice geral