



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE  
DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO<sub>2</sub>)**

CHRYSTTYAN THALLES RIBEIRO FÉLIX

Orientadora: Dr<sup>a</sup> Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Co-orientadora: MSc. Amanda Mendes Arruda

Campina Grande – PB

2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**CHRYSTTYAN THALLES RIBEIRO FÉLIX**

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE**  
**DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO<sub>2</sub>)**

Trabalho de conclusão de curso - TCC -  
apresentado à Universidade Federal de  
Campina Grande como requisito para  
obtenção do grau de bacharel em  
Engenharia Civil.

Área de habilitação: Geotecnia.

Orientadora: Dr<sup>a</sup> Ana Maria Gonçalves Duarte

Co-orientadora: MSc. Amanda Mendes Arruda

Campina Grande – PB

2025

CHRYSTTYAN THALLES RIBEIRO FÉLIX

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE DIÓXIDO DE  
TITÂNIO (TiO<sub>2</sub>)

Trabalho de conclusão de curso - TCC -  
apresentado à Universidade Federal de  
Campina Grande como requisito para  
obtenção do grau de bacharel em Engenharia  
Civil.

Aprovado em 26 de Setembro de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profª Drª Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça – UFCG - Orientadora

---

MSc Amanda Mendes Arruda – UFCG - Co – Orientadora

---

MSc Leonardo Rodrigues Guedes – UFCG - Examinador Interno

---

B. Arthur Nóbrega de Souza – UFCG - Examinador Interno

---

MSc Lara Pereira - Examinadora Externa

---

DSc Maria Ingridy Lacerda Diniz – UFCG/CCTA -Examinadora Externa

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG  
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

F316a

Félix, Chrysttyn Thalles Ribeiro.

Avaliação mecânica de misturas asfálticas com adição de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) / Chrysttyn Thalles Ribeiro Félix. – 2026.

56 f. : il. color.

Monografia (bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.

“Orientação: Profa. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, Profa. Me. Amanda Mendes Arruda”.

Referências.

1. Pavimentação. 2. Óxido. 3. Mistura Betuminosa. 4. Geotecnia. 5. Material Alternativo. 6. Desempenho Mecânico. I. Mendonça, Ana Maria Gonçalves Duarte. II. Arruda, Amanda Mendes. III. Título.

UFCG/BC

CDU 625.8(04)

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente, dou início agradecendo aquele que é base da minha vida, dos meus sonhos, das minhas conquistas, aquele que é alicerce da vida: Deus. A ele todo meu agradecimento, por me permitir persistir em meio a inúmeros medos, anseios, momentos de angústias e momentos de felicidades. A ele que sempre em minhas orações, acalentava meu coração em momentos difíceis ao longo da graduação. Graças a ele, a minha jornada na graduação foi da melhor forma possível.

Agradeço a minha mãe (Nita Ribeiro) que incansavelmente se empenhou a me fornecer conforto para estudar. A senhora é minha maior inspiração de vida, de pessoa, de profissional, de tudo aqui na terra. Agradeço por ter me ensinado a ser a pessoa que sou, o profissional que me torno, a senhora é meu maior alicerce para tudo em minha vida. Agradeço por cada vez que ficou acordada até tarde para que eu não ficasse sozinho estudando, agradeço por sempre ser meu conforto, me oferecer colo, me dar amor, carinho e mais que isso, cumplicidade em todos os seus atos.

Agradeço a minha irmã Ilka Ribeiro por sempre fazer parte dos meus sonhos, por me incentivar e sempre acreditar em mim, até mesmo quando eu mesmo não acreditava. Agradeço a minha avó Julita Mendes, meus primos Jhonatan, Rayanna e Sophia, meus tios por sempre me incentivarem a correr atrás dos meus sonhos com garra e determinação.

Agradeço também aos meus amigos Karyne, Daniel, Marcos, Gabriel, Adriely, Daniele, Poliana e Brenda, que se tornaram parte da minha família, com vocês meus dias na universidade se tornaram leves com as conversas e vivência compartilhada. Com pouco tempo, cada um foi se tornando pessoa importante em minha vida, com vocês aprendi inúmeras coisas que jamais imaginaria aprender.

A minha orientadora Ana Maria, agradeço por todo o conhecimento repassado, por toda a orientação, por todo empenho, e por outras oportunidades durante o curso, a senhora é exemplo de pessoa e de profissional. Agradeço também, à minha co-orientadora Amanda Mendes por todo seu empenho, paciência e conhecimento repassado.

Ao professor Adriano Elísio e a doutora Maria Ingridy pela oportunidade de ser aluno de iniciação científica, foram dois ciclos de grande aprendizagem, de amizade, e de grande crescimento profissional e pessoal.

Ao professor e coordenador Ademir Montes, por todo conhecimento repassado, por todas as horas de descontração, como também por todo o seu empenho ao longo do curso para melhor nos atender. A secretária Ana Carolina, que tem muito carinho e cuidado conosco, os alunos do curso, dando conselhos e puxões de orelhas quando necessário, seu empenho é fundamental.

Ao CNPq pelo incentivo à Iniciação Científica, que agregou de forma positiva e significativa para a minha formação acadêmica, tornando minha formação acadêmica mais ampla e com mais oportunidades.

Agradeço também a Camila Famá que foi minha professora, se tornou amiga e família por cada conselho dado ao longo desses anos que foram fundamentais, e por ser esse exemplo de profissional. Agradeço também a Ana Angélica que é tão importante para mim e minha família, que me mostrou que sonhar grande e sonhar pequeno dá o mesmo trabalho, então que venhamos a sonhar sempre alto.

Agradeço também a construtora Wanderley Construções pela oportunidade de realizar meu estágio na empresa, e poder adquirir conhecimentos práticos da construção civil que complementaram minha formação técnica em engenharia civil.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Campina Grande, Campus sede, por ter sido minha segunda casa durante os cinco anos da graduação em engenharia civil, sem dúvidas foi uma das etapas mais importantes da minha vida.

A vocês meu muito obrigado!

À Deus que é o responsável por tudo. À minha mãe que sempre me impulsionou ir em busca dos meus sonhos e sempre esteve ao meu lado. A minha família (irmã, avó e primos).

Dedico!

“Nada te perturbe, nada te assuste; Tudo passa, só Deus não muda. A paciência tudo alcança. Quem tem Deus, nada lhe falta. Só Deus basta.”

(Santa Terezinha D’Ávila)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Camadas constituintes de um pavimento flexível. ....	7
Figura 2: Mapa com as localizações das principais produtoras de dióxido de titânio. .....	16
Figura 3: Bita 19 mm. ....	21
Figura 4: Brita 12,5 mm. ....	21
Figura 5: Pó de pedra. ....	21
Figura 6: Ligante asfáltico (CAP 50/70). ....	21
Figura 7: Cal hidratada. ....	20
Figura 8: Dióxido de Titânio. ....	20
Figura 9: Fluxograma da pesquisa. ....	20
Figura 10: Fluxograma da caracterização dos materiais. ....	21
Figura 11: Penetrômetro para ensaio de Penetração. ....	28
Figura 12: Viscosímetro do tipo Brookfield. ....	29
Figura 13: Aparelhagem do ponto de amolecimento. ....	30
Figura 14: Reômetro para o ensaio de PG. ....	31
Figura 15: Equipamentos para ensaio de MSCR. ....	32
Figura 16: Granulometria por difração a laser do $TiO_2$ . ....	34
Figura 17: DTA e TG do $TiO_2$ . ....	35
Figura 18: Difração de raio-x do $TiO_2$ . ....	36
Figura 19: FTIR do $TiO_2$ . ....	36
Figura 20: Compactador Superpave. ....	37
Figura 21: Curva inferior, intermediária e superior. ....	38
Figura 22: Fluxograma da avaliação mecânica. ....	41
Figura 23: Equipamento para ensaio de RT. ....	42
Figura 24: UTM para o ensaio de Módulo de Resiliência. ....	44
Figura 25: AMPT para ensaio de Flow Number. ....	45
Figura 26: Resistência à Tração por Compressão Diametral. ....	47
Figura 27: Dano por Umidade Induzida. ....	48
Figura 28: Modulo de Resiliência. ....	49
Figura 29: Resultados do ensaio de Flow Number. ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados da caracterização dos agregados.....	26
Tabela 2: Resultados da caracterização do ligante asfáltico.....	33
Tabela 3: Curvas da metodologia da dosagem.....	38
Tabela 4: Tentativa inicial para teor de ligante.....	39
Tabela 5: Diferentes teores de ligante.....	39
Tabela 6: Teor ótimo de ligante.....	40
Tabela 7: Dosagem da mistura asfáltica. ....	40

## LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DRX	- Difração de Raio-x
DTA	- Análise Termodiferencial
FN	- <i>Flow Number</i>
FTIR	- Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
LEP	- Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MR	- Módulo de Resiliência
MSCR	- Multiple Stress Creep and Recovery
PG	- Grau de Desempenho
RT	- Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTFOT	- Rolling Thin Filme Oven Test
SUPERPAVE	- Performing Asphalt Pavements
TG	- Análise Termogravimétrica
TiO <sub>2</sub>	- Dióxido de Titânio

## RESUMO

Com o passar dos anos a engenharia tem procurado por avanços nos seus mais diversos setores. Neste sentido, o setor da pavimentação tem procurado pelo aprimoramento da camada de rolamento por meio da adição de materiais alternativos no intuito de potencializar suas propriedades, trafegabilidade e durabilidade. Desta forma, o Dióxido de Titânio é um material que possui grande potencial em sua aplicação nas misturas betuminosas, devido sua capacidade fotocatalítica, ou seja, sua capacidade de depuração de impurezas no ar, como também seu alto teor de pureza. Logo, essa pesquisa tem como objetivo fazer a avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas a partir da adição de  $TiO_2$  em diferentes percentuais (2% e 3%), substituindo parcialmente ou totalmente a cal hidratada. Para que essa análise fosse realizada, se fez necessário a realização de alguns ensaios mecânicos, sendo eles: Resistência à Compressão Diametral, Dano por Umidade Induzida (Lottman), Módulo de Resiliência e Deformação Permanente (*Flow Number*). Com isso, após analisar os resultados, foi possível concluir que a incorporação do dióxido de titânio auxiliou na melhoria da resistência à tração e na resistência ao dano por umidade induzida, enquanto ocorreu uma redução na deformação permanente. Além disso, pode-se destacar que a mistura de 2% de  $TiO_2$  obteve um aumento no módulo de resiliência, enquanto a mistura com 3% obteve uma redução em seu valor ao ser comparado com a mistura de referência. Por fim, foi possível observar que o uso de dióxido de titânio em misturas asfálticas possui uma considerável melhoria para algumas propriedades mecânicas.

**Palavras chaves:** Pavimentação; óxido; Mistura betuminosa; Material alternativo; Desempenho mecânico.

## ABSTRACT

Over the years, engineering has sought advancements across its various sectors. In this context, the pavement sector has focused on improving the wearing course through the addition of alternative materials, aiming to enhance its properties, trafficability, and durability. In this regard, Titanium Dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) is a material with great potential for application in bituminous mixtures due to its photocatalytic capacity—that is, its ability to purify air pollutants. Thus, this research aims to evaluate the mechanical properties of asphalt mixtures incorporating  $\text{TiO}_2$  at different contents (2% and 3%), partially or fully replacing hydrated lime. To carry out this analysis, several mechanical tests were conducted, namely: Indirect Tensile Strength (ITS), Moisture-Induced Damage (Lottman test), Resilient Modulus, and Permanent Deformation (Flow Number). Based on the results, it was possible to conclude that the incorporation of titanium dioxide contributed to improved tensile strength and resistance to moisture-induced damage, while a reduction in permanent deformation was observed. Additionally, it was noted that the mixture containing 2%  $\text{TiO}_2$  showed an increase in the resilient modulus, whereas the mixture with 3%  $\text{TiO}_2$  showed a decrease in this value when compared to the reference mixture. Finally, the use of titanium dioxide in asphalt mixtures demonstrated a considerable improvement in certain mechanical properties.

**Keywords:** Pavement; Oxide; Bituminous mixture; Alternative material; Mechanical performance.

## SUMÁRIO

<b>1.0 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>5</b>
<b>2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Pavimentação asfáltica.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Ligantes asfálticos .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3 Modificação dos ligantes asfálticos .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Misturas Asfálticas com adição de materiais alternativos .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5 Dióxido de Titânio (TiO<sub>2</sub>) .....</b>	<b>15</b>
<b>2.6 Aplicações do Dióxido de Titânio .....</b>	<b>17</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Métodos .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.1 Caracterização dos materiais.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.1 Caracterização dos agregados .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.1.1 Massa específica e Absorção .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.1.2 Abrasão “Los Angeles” .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.1.3 Índice de forma.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.1.4 Adesividade ao ligante .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.1.5 Equivalente de Areia .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.1.6 Partículas fraturadas.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.1.7 Angularidade .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.1.8 Resultados de caracterização dos agregados .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2 Caracterização do ligante asfáltico .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.2.1 Penetração.....</b>	<b>27</b>

3.2.2.2 Viscosidade rotacional .....	28
3.2.2.3 Ponto de amolecimento .....	29
3.2.2.4 Grau de Desempenho (PG).....	30
3.2.2.5 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) .....	31
3.2.2.6 Resultados de caracterização do ligante .....	32
3.2.3 Caracterização do TiO <sub>2</sub> .....	33
3.3 Dosagem Superpave.....	37
3.4 Avaliação mecânica .....	40
3.4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	41
3.4.2 Dano por Umidade Induzida.....	42
3.4.3 Módulo de Resiliência.....	43
3.4.4 Flow Number .....	44
3.5 PROTOCOLO DE ENVENLHECIMENTO .....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1 Avaliação mecânica .....	46
4.1.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT).....	46
4.1.2 Dano por Umidade Induzida.....	48
4.1.3 Modulo de Resiliência (MR).....	49
4.1.4 <i>Flow Number (FN)</i> .....	50
5.0 Considerações finais .....	51
6.0 Sugestões para pesquisas futuras .....	52
Referencias.....	52

## 1.0 INTRODUÇÃO

Com o avanço da sociedade, sabe-se que os pavimentos estão cada vez mais presentes no cotidiano, seja para fins de turismo, comercialização ou de trabalho, por exemplo. Desta forma, Silva *et al.* (2018) afirma que pavimentos asfálticos são estruturas compostas por quatro camadas, sendo elas: revestimento asfáltico, base, sub-base e o reforço do subleito.

Concomitante a isso, é sabido que pavimentos têm a função fornecer qualidade, segurança e boa trafegabilidade aos usuários. No Brasil existem diferentes tipologias de pavimentos, sendo as principais os pavimentos rígidos, semi-rígidos e flexíveis. Os pavimentos flexíveis são compostos por uma camada asfáltica apoiada em outras camadas (base, sub-base e subleito), nas quais, ao serem submetidas a carregamentos, todas sofrem deformações elásticas.

Neste sentido, a engenharia está sempre à procura da melhoria dos pavimentos rodoviários para os usuários. Uma alternativa para esta melhoria é a adição de novos materiais em diferentes proporções nas misturas betuminosas. Dentre os diversos materiais disponíveis no mercado, um dos que tem perspectiva para essa incorporação na área da pavimentação é o Dióxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ), que apresenta potencial fotocatalítico, ampla aplicabilidade na indústria e um material puro. Aguiar (2018) incorporou o  $\text{TiO}_2$  na produção de argamassas, devido à sua eficiência na degradação de impurezas presentes no ar externo e interno às edificações.

Soares (2018) fez análise mecânica de misturas asfálticas com  $\text{TiO}_2$ , modificando o ligante e pôde observar que as misturas com  $\text{TiO}_2$  obtiveram uma estabilidade Marshall e resistência à tração superiores em comparação com a mistura de referência, além de apresentar um aumento no *flow number* e na Resistência à Fadiga, comprovando o potencial uso do dióxido de titânio no aprimoramento das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Observa-se, no entanto, que a literatura carece de estudos da incorporação do dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) como fíler de misturas asfálticas, bem como o seu impacto nas propriedades mecânicas.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas a partir da incorporação do dióxido de titânio como fíler.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar o efeito das misturas asfálticas com a incorporação do  $\text{TiO}_2$  em diferentes proporções, quanto ao desempenho mecânico;
- Avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas a diferentes tempos de envelhecimento;
- Comparar os resultados da mistura com diferentes porcentagens de  $\text{TiO}_2$  com as misturas convencionais.

## 2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Pavimentação asfáltica

Com o passar dos anos a tecnologia tem evoluído no Brasil e no mundo, como também, o turismo e a comercialização por vias terrestres, fazendo com que os pavimentos se tornem mais presentes no cotidiano da sociedade. Dito isto, se faz interessante compreender os tipos de pavimentos existentes no Brasil, sendo eles: rígido, semi-rígido e flexível.

Neste contexto, Oliveira, Fernandes e Pacheco (2024) afirmam que os pavimentos flexíveis são constituídos por algumas camadas, sendo algumas delas: subleito, sub-base, base e o revestimento asfáltico. Além disso, os autores supracitados ainda afirmam que os pavimentos rígidos são aqueles que possuem uma camada de concreto rígido, possuindo algumas variadas técnicas de elaboração. Concomitante a isso, o DNIT (2022) afirma que o pavimento semirrígido é aquele que é caracterizado por uma base cimentada por algum material aglutinante que possua propriedades cimentícias.

De acordo com Balbo (2007),

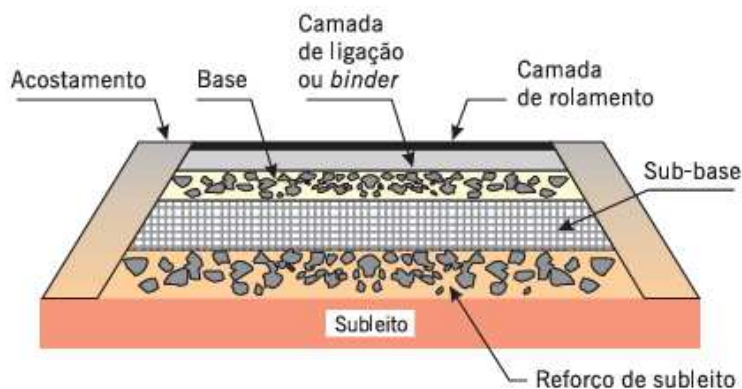
“O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactadas a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente o tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.”

Balbo (2007) enfatiza que o pavimento é dimensionado para que se possa receber e transmitir os esforços aliviados para as próximas camadas do pavimento. Além disso, é importante compreender que para que a estrutura funcione de forma coerente e adequada é imprescindível que todas as camadas sejam dimensionadas adequadamente para que posteriormente não ocorram patologias precocemente.

Dentro desse contexto, é válido ressaltar que, como este trabalho visa avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas, torna-se importante compreender como é disposta a estrutura de um pavimento flexível, também conhecido como

pavimento asfáltico. Assim como abordado anteriormente, as camadas do pavimento flexível podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1: Camadas constituintes de um pavimento flexível.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

O DNIT (2006) afirma que o subleito vem a ser a fundação do pavimento - o próprio terreno - sendo uma camada de solo compactado, que tem sua capacidade avaliada por meio do Índice de Suporte Califórnia (CBR). É importante compreender que a camada do subleito é de extrema importância para a garantia da estabilidade da estrutura do pavimento.

De acordo com Balbo (2007), quando se faz o dimensionamento da camada de base e ela fica um pouco espessa, divide-se em duas camadas, sendo elas denominadas de base e sub-base. Devido às razões econômicas, a camada de sub-base é composta por materiais de custo mais baixo que os da base. Além disso, é importante compreender que a principal função desta camada é de distribuir as cargas previamente aplicadas ao pavimento, com o intuito de aumentar a capacidade de suporte da estrutura do pavimento.

Balbo (2007) ainda afirma que a camada de base é composta por materiais de alta qualidade, podendo ser eles: brita graduada ou solo estabilizado. Neste sentido, a camada de base tem a função de suportar diretamente as cargas aplicadas pelo tráfego e as distribuir de forma adequada para as próximas camadas, ou seja, para as camadas inferiores.

O DNIT (2006) afirma que a camada de revestimento é a camada da superfície do pavimento, a qual está em contato direto com os veículos passantes da via. É importante compreender que essa camada pode ser feita através de misturas

asfálticas e de concreto de cimento portland. Em consonância com DNIT (2006), Balbo (2007) afirma que a camada de revestimento é a camada mais superficial do pavimento, a qual irá resistir a intempéries, as condições climáticas, os desgastes causados pelo tráfego, além de garantir segurança e conforto ao usuário.

Sabe-se que a camada de revestimento é composta por alguns materiais. Desta forma, Bernucci *et al.* (2008) afirma que as misturas asfálticas são constituídas por agregados minerais, ligantes asfálticos, e a depender das necessidades, aditivos. Dentro desse contexto, é indubitável salientar que a função do ligante asfáltico é de atuar como ligante entre os agregados, garantindo durabilidade e coesão ao pavimento. Já os agregados, por sua vez, desempenham importante papel na resistência mecânica da mistura. Os aditivos são utilizados para melhorar determinada característica.

O conhecimento acerca das propriedades mecânicas da mistura asfáltica é primordial, haja vista que seu desempenho depende de diversos fatores como: ambiente ao qual está localizada, frequência e tipo de cargas ao qual é submetida, e o envelhecimento do ligante asfáltico. Sabe-se a dificuldade de reproduzir todas as variáveis envolvidas em laboratório; logo a caracterização dessas misturas deve procurar pelo equilíbrio entre viabilidade e precisão, tendo como foco os aspectos mais relevantes para prever o comportamento real das misturas em campo. Dito isto, podem ser citadas algumas propriedades importantes, como: módulo de resiliência, resistência a tração, dano por umidade, *Flow Number*, entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O Módulo de Resiliência (MR) é uma propriedade mecânica que expressa a rigidez elástica recuperável da mistura asfáltica quando submetida a carregamento repetidos (DNIT 135:2018 – ME). A determinação do MR é feita através da relação tensão de tração gerada e a deformação elástica recuperável, parâmetros adquiridos na execução do ensaio, e calculada de acordo com a norma.

A norma DNIT 136:2018 – ME, por sua vez, define que a Resistência à Tração (RT) é a máxima tensão suportada pela mistura asfáltica antes que ocorra a ruptura, logo essa propriedade mecânica avalia a coesão interna da mistura e a sua capacidade de resistir a separação de suas partículas. Bernucci *et al.* (2022) complementa afirmando que a resistência à tração varia de acordo com: forma e tamanho do agregado, teor e tipologia do ligante asfáltico utilizado, temperatura de ensaio, entre outros diversos fatores.

O Dano por Umidade Induzida é a medida da coesão entre agregado e ligante asfáltico diante da presença de água. Essa propriedade mecânica indica a integridade da mistura asfáltica em relação à sua sensibilidade à umidade (DNIT 180:2018 – ME). Esse parâmetro reflete a redução na resistência à tração, obtida por meio da comparação entre corpos de prova condicionados à umidade e corpos de prova não condicionados.

Por fim, a norma ABNT NBR 16505:2016 e a DNIT 184/2018-ME definem *Flow Number* como o número de ciclos de carga repetida aplicados em uma amostra de mistura asfáltica até o início da deformação permanente. Neste contexto, o parâmetro é obtido por meio de um ensaio uniaxial de carga repetida, com temperatura controlada, indicando a resistência da mistura sofrer afundamento quando submetida ao tráfego. Logo, sabe-se que quanto maior for o número do *Flow Number* maior será a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica, sendo essenciais para o dimensionamento de pavimentos e seleção de materiais.

## 2.2 Ligantes asfálticos

Compreender acerca do ligante asfáltico é de extrema importância. Dito isto, a norma DNIT 448:2024 – ME define ligante asfáltico como misturas complexas compostas por hidrocarbonetos de elevada massa molar presentes no petróleo e que podem ser obtidas através de depósitos superficiais de petróleo ou por meio da destilação industrial. Desta forma, Mota *et al.* (2022) afirma que os ligantes asfálticos são constituídos por aproximadamente 5% a 10% de heteroátomos unidos através de ligações covalentes e de 90% a 95% de hidrocarbonetos.

Nesse contexto, Mota *et al.* (2022) complementa afirmando que o ligante asfáltico possui propriedade de ser impermeável à água, pouco reativo e um adesivo termoplástico. Balbo (2007) afirma que o CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) utilizado como ligante apresenta propriedades favoráveis ao seu uso, sendo flexibilidade, insolúvel em água, durabilidade relativa e alta resistência a grande maioria dos ácidos, sais e álcalis.

O ligante asfáltico é um material que assim como diversos outros materiais, possui diversas propriedades, sejam elas propriedades físicas (viscosidade, ponto de

fulgor, ponto de amolecimento, por exemplo), reológicas (comportamento viscoelástico, módulo de rigidez e ângulo de fase) ou propriedades de adesividade.

Nesse sentido, Balbo (2007) afirma que a propriedade de aderência do ligante é a capacidade do material aderir à superfície do agregado, tornando-o fixo na mistura, por exemplo. Logo, caso o material não possua boa adesividade aos agregados, poderá ocorrer um deslocamento do ligante aos agregados e/ou materiais finos. Outra propriedade física é a durabilidade, a qual consiste na capacidade do ligante preservar suas características originais quando exposto a intempéries e ao processo de envelhecimento (BALBO, 2007).

Em relação às propriedades físicas, a norma DNIT 131:2010 – ME define que o ponto de amolecimento é a temperatura à qual o material asfáltico passará por um amolecimento e apresentar o comportamento de líquido ao escorrer. A norma do DNIT 448:2024 regulamenta o procedimento para a determinação da viscosidade do ligante asfáltico, que pode ser definida como a capacidade que o material tem de fluir a diferentes temperaturas. Além disso, essa norma também define o ângulo de fase como a “defasagem entre o carregamento aplicado e a resposta resultante para um material viscoelástico linear submetido a carregamento oscilatório”, ou seja, é a medida do atraso existente entre a solicitação e a resposta mecânica.

Agência Nacional de Transportes Terrestres (2017) afirma que o comportamento viscoelástico como a capacidade do ligante asfáltico apresentar resposta viscosa e elástica de forma simultânea, dependendo da temperatura e da velocidade com que a carga é aplicada. Logo, é propriedade importante para a garantia do desempenho adequado dos pavimentos aos longos dos anos, evitando posteriores defeitos como trincas ou deformações plásticas.

Carneiro (2015) afirma que o ponto de fulgor – propriedade física do ligante – é uma determinada temperatura a qual o ligante pode vir a ser considerado inflamável, quando houver uma fonte de ignição. Trata-se, portanto, de uma propriedade de extrema importância, pois seu conhecimento é essencial para o manuseio seguro do material, evitando que seja aquecido elevadamente, podendo levar a liberação de vapores inflamáveis, que ao se misturem com ar e chama, pode gerar uma combustão.

### 2.3 Modificação dos ligantes asfálticos

Na busca pela melhoria das propriedades dos ligantes asfálticos, a incorporação de materiais alternativos como forma de modificá-los e melhorar as propriedades é uma prática bastante difundida na engenharia de pavimentação. Neste contexto, Pereira *et al.* (2020) afirma que essas modificações se devem também ao avanço da indústria química, e com isso trazem algumas vantagens como segurança e durabilidade. Neste sentido, alguns materiais são aplicados nas modificações dos ligantes, como por exemplo: Dióxido de titânio (Marinho Filho, 2017), lignina (Batista, 2017), Óleo de *Moringa Oleifera Lam* (Lucena *et al.*, 2016), entre outras.

Lucena *et al.* (2016), modificou o ligante asfáltico (CAP 50/70) utilizando o óleo da *Moringa Oleifera Lam*, como sendo um aditivo verde em diferentes percentuais. Deste modo, o autor supracitado pôde observar que a aplicação do material trouxe melhoria para a trabalhabilidade e redução das temperaturas de usinagem e compactação. Além disso, a aplicação deste óleo em maiores proporções que 1% não atende ao ponto de amolecimento sugerido pelas normas vigentes. Lucena *et al.* (2016) afirma que a utilização desse óleo pode ser em pequenas percentagens (de 0,5% a 1%) para resultados satisfatórios, e que a aplicação do material traz consigo uma contribuição em algumas reduções como efeito estufa e emissões de gases poluentes.

Convergindo com Lucena *et al.* (2017), Gualberto Filho (2020) enfatiza que o uso de materiais alternativos para a modificação do ligante asfáltico tem a finalidade de diminuir o consumo de recursos naturais, consumo de energia e até mesmo proporcionar melhorias ao desempenho do pavimento.

Outra modificação de ligante foi feita por Batista (2017), na qual consistiu na aplicação de lignina como um aditivo de antienvelhecimento. Desta forma, o autor observou que os ligantes modificados com a lignina conseguiram apresentar uma maior resistência a temperaturas altas, como também resistência a trincas, quando baixas temperaturas. Além disso, esses ligantes modificados com lignina apresentaram uma maior resistência à fotodegradação quando comparados com o ligante convencional.

Batista (2017) ainda afirma que a viscosidade do ligante sofreu um aumento, como também uma diminuição dos valores referentes ao ensaio de penetração.

Atrelado a isso, o autor enfatiza que a mistura asfáltica com o ligante modificado apresentou um aumento na deformação plástica, quando comparada com uma mistura convencional.

Nascimento e Faxina (2017) modificaram o ligante asfáltico com PPA e copolímeros SBR e SBS, com a finalidade de avaliar o efeito da radiação ultravioleta sobre as propriedades reológicas, incorporando esses materiais modificadores em diferentes porcentagens. Neste sentido, os autores afirmam que aplicaram radiação ultravioleta tanto para o ligante convencional (puro), como para o ligante modificado com os materiais supracitados. Logo, Nascimento e Faxina (2017) observaram que o CAP + SBR + PPA apresentou-se menos prejudicado com a radiação quando comparado com o CAP convencional, demonstrando que o material betuminoso modificado se destacou como mais resistente ao longo prazo.

Desta forma, é possível compreender que a adição de um novo material para a modificação do ligante asfáltico, em diferentes formas – pulverulentas, nanopartículas ou até mesmo em forma de óleo como Lucena *et al.* (2017) aplicou em seu estudo – podem trazer grandes benefícios para o material, quando aplicados na proporção adequada.

## **2.4 Misturas Asfálticas com adição de materiais alternativos**

Misturas asfálticas são compostas pela combinação de agregados graúdos, miúdos, filer e ligante asfáltico. Dentro desse contexto, é importante salientar que, para a melhoria de desempenho dessas misturas, alguns materiais alternativos são adicionados em busca da melhoria de propriedades mecânicas, avaliações térmicas (pavimentos coloridos), melhoria de trafegabilidade, durabilidade entre outros.

Serra *et al.* (2018) em seu estudo fez a utilização de resíduos de polietileno tereftalato (PET) como um agregado alternativo para misturas asfálticas. Desta forma, os autores fizeram a utilização do PET na substituição de agregados miúdos de misturas usinadas a quente nas proporções de 1%, 2% e 3%. Logo, foram realizados alguns ensaios mecânicos, podendo ser observado que as misturas com adição de 1% do material apresentaram valores de Resistência a Tração menores que misturas convencionais, enquanto as misturas com incorporação de 2% obtiveram valores pouco menores que as misturas convencionais.

Além disso, Serra *et al.* (2018) ainda observou que a estabilidade das misturas com incorporação do PET obteve valores maiores quando comparadas a misturas convencionais, além de serem superiores ao exigido pela norma. Ademais, foi possível observar também que, no que tange o Módulo de Resiliência, todas as misturas (convencional e com diferentes incorporações do PET) obtiveram valores superiores aos sugeridos por norma.

Carvalho *et al.* (2021) em seu estudo fez uma análise dos parâmetros mecânicos de misturas com a adição de óxidos metálicos. Logo, é interessante ressaltar que essa adição tem como um de seus objetivos diminuir a sensação térmica através da produção de pavimentos coloridos, porém garantindo concomitantemente um bom desempenho mecânico. Foram realizados dois ensaios mecânicos, sendo: Resistência à Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR).

No que se refere ao MR foi possível verificar que misturas com adição de óxido metálico vermelho obtiveram uma diminuição de 16% quando comparadas com misturas convencionais, já a mistura com adição do corante amarelo apresentou uma redução maior, sendo de 37,6%. No que tange o RT, a mistura com adição do óxido metálico obteve valores próximos aos de referência, enquanto a mistura com adição de corante amarelo obteve uma redução de 30,7%, contudo, o autor enfatiza que os valores foram acima dos estabelecidos pelo DNIT. Destaca-se, no entanto, a necessidade de mais verificações mecânicas para uma melhor compreensão do real comportamento da mistura.

Moraes *et al.* (2022), por sua vez, analisou o desempenho mecânico de misturas asfálticas com adição da cera de carnaúba. O autor justifica a utilização do material outrora citado devido a finalidade minimizar o impacto ambiental aplicando-o em misturas asfálticas a quente, incorporado nos teores de 1%, 2% e 3%. Desta forma, é importante salientar que a análise mecânica foi realizada através dos ensaios de Resistência à Tração, Dano por Umidade Induzida, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico e Vida de Fadiga.

Moraes *et al.* (2022) observou que com a adição da cera de carnaúba conseguiu reduzir a temperatura de usinagem em 9°C para mistura com incorporação de 2%, e de 7°C para misturas com incorporação de 3%. Além disso, pode ser observado que a incorporação de 2% do material apresentou melhor desempenho a fadiga, contudo, não suportando um número alto de ciclos, limitando-se a vias de tráfego leve. No que se refere ao Dano por Umidade Induzida, percebeu-se que as

misturas com a incorporação da cera obtiveram resultados melhores quando comparados com os de referência. No que tange ao Módulo de Resiliência e Modo Dinâmico, apresentaram valores próximos aos da mistura de referência. Por fim, Moraes *et al.* (2022) percebeu que à medida que o teor de cera de carnaúba se aumentava, maior foi a redução da resistência à tração, contudo sendo todos valores superiores aos estabelecidos por norma.

Outra adição de material alternativo em misturas betuminosas para avaliação mecânica foi realizada por Nunes *et al.* (2022), a qual foi analisada a influência da borracha de pneus no desempenho mecânico de mistura asfálticas. O autor fez a análise mecânica através do MR, RT, *Flow Number* e Dano por Umidade Induzida. Em relação ao Módulo de Resiliência observou-se uma redução, porém com valores próximos a misturas de referência, contudo essa diminuição nos valores de MR não significa que as misturas do asfalto-borracha implicam em desempenho mecânico inferior. No que se refere ao RT, apresentam valores superiores em relação aos valores sugeridos pelo DNIT. Observou-se, ainda, que em relação ao *Flow Number*, apresentaram maiores valores que a de referência, indicando uma maior resistência à deformação permanente quando comparadas com a mistura convencional. Já no que tange o Dano por Umidade Induzida, o asfalto-borracha obteve resultado satisfatório, embora tenha sido inferior à mistura convencional.

É possível perceber que através de variados estudos encontra-se a viabilidade da incorporação de materiais diversos, trazendo uma melhoria de desempenho mecânico, diminuição de impactos ambientais, boa trafegabilidade, diminuição de sensações térmicas, entre outros. Neste sentido, o uso do Dióxido de Titânio pode ser inserido em misturas betuminosas. Logo, Soares (2018) fez uma avaliação mecânica de misturas asfálticas modificadas com  $TiO_2$  por meio dos ensaios de Estabilidade Marshall, Resistência à Tração, *Flow Number*, Módulo de Resiliência e Fadiga por Compressão Diametral.

Neste sentido, Soares (2018) observou que tanto as misturas convencionais quanto as misturas com o ligante modificado com  $TiO_2$  apresentaram valores para a Estabilidade Marshall superiores ao sugerido pelas normas vigentes. Além disso, o autor enfatiza que a Resistência à Tração apresentou valores inferiores quando comparados com a mistura de controle. Paralelamente a isso, o Soares (2018) verificou que a mistura modificada com  $TiO_2$  apresentou *Flow Number* e Resistência à Fadiga superiores à mistura convencional. Por fim, o Módulo de Resiliência

apresentou valores de mesma grandeza das misturas convencionais, não sendo observado uma influência do  $\text{TiO}_2$ .

Marinho Filho (2017) fez uma análise reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , sendo adicionado em teores de 3%, 4% e 5%. Desta forma, o autor supracitado observou que a adição do  $\text{TiO}_2$  apresentou uma diminuição em relação ao enrijecimento demasiado do material, proporcionando melhorias em relação à vida de fadiga. Além disso, os ligantes modificados com  $\text{TiO}_2$ , quando submetidos ao envelhecimento, apresentaram uma perda de massa, indicando que a incorporação do material reduziu a volatilidade do ligante, além de retardar o envelhecimento.

## 2.5 Dióxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ )

Todos os materiais disponíveis no mercado precisam de fatores que influenciam diretamente em sua produção. Desta forma, necessitam da matéria prima disponível no meio ambiente, como também de compreender o processo de refinaria para a obtenção do produto final. Logo, o  $\text{TiO}_2$  também não se diferencia de outros materiais e se torna importante compreender seu processo de produção.

Pereira (2017) afirma que o Titânio é “um metal de brilho prateado, 45% mais leve que o ferro e duas vezes mais resistente que o alumínio”. Destacando também que o Ti tem afinidade com o elemento oxigênio, comumente encontrado no meio na forma de óxido, contribuindo para que se encontre na natureza o Dióxido de Titânio.

Além disso, Pereira (2017) afirma que o dióxido de titânio é obtido a partir de outros minerais. Logo, o autor afirma que a ilmenita é um material composto por cerca de 53% de  $\text{TiO}_2$ , além dele, tem o rutilo que é composto, quase que em toda sua totalidade, por dióxido de titânio. Outros materiais também possuem o  $\text{TiO}_2$  em sua composição, porém com mais difícil acesso, que seria o caso do anatásio, perovskita e leucoxênio.

Baltar *et al.* (2008) afirma que o  $\text{TiO}_2$  é um pigmento não tóxico, além de ser estável e possuir elevada resistência à mudança de cor, como também uma estabilidade térmica elevada. Dentro desse contexto, Baltar *et al.* (2008) enfatiza que o Dióxido de Titânio devido a todas as propriedades apresentadas é um material com pouca absorção da faixa do espectro de luz visível, além de alta capacidade de dispersão, refração e reflexão da luz visível.

Neste sentido, torna-se importante tomar conhecimento acerca das reservas da matéria-prima para a produção do  $TiO_2$ . Dito isto, as principais reservas estão localizadas na China e na África do Sul. O Brasil, por sua vez, detém aproximadamente 0,3% das reservas mundiais, sendo o oposto da china que possui aproximadamente  $\frac{1}{4}$  das reservas mundiais.

Heider (2021) afirma o Brasil possui de algumas empresas produtoras de dióxido de titânio, porém as principais produtoras do material são: Cristal (Mataraca - Paraíba), Titânio Goiás Mineração (Santa Bárbara - Goiás), INB (São Francisco de Itabapoana - Rio de Janeiro). A Figura 2 apresenta o mapa um mapa com a localização das principais produtoras do  $TiO_2$ .

Figura 2: Mapa com as localizações das principais produtoras de dióxido de titânio.



Fonte: Moraes e Seer, 2021.

O processo industrial para obtenção do Dióxido de Titânio é através de Sulfatação e/ou Cloretação. Neste sentido, Couto (2015) afirma que o processo de sulfatação é o primeiro a ser utilizado pela indústria. Desta forma, se faz importante compreender como funcionam os processos de obtenção do dióxido de titânio.

Maia (2018) corrobora com Couto (2015), ao afirmar que para adquirir o pigmento de  $TiO_2$  são mais utilizados os processos de sulfatação e cloretação, os quais, por sua vez, utilizam como matéria-prima concentrados de ilmenita e de rutilo, seja sintético, seja natural.

Pereira (2017) afirma em seu estudo que existem mais dois processos para a obtenção do dióxido de titânio, sendo eles o processo de Kroll e o processo com rota se sulfato. O processo de Kroll (cloreto) é basicamente composto por uma coloração da ilmenita e uma redução da matéria-prima utilizada no processo. Já o processo com rota de sulfato é a primeira tecnologia no comércio para a obtenção de sulfato ferroso, o sulfato férrico, e assim obter o  $TiO_2$ .

Maia (2018) afirma que a obtenção de  $TiO_2$  por sulfatação não pode fazer uso do leucoxênio e rutilo como matéria prima desse processo devido sua insolubilidade. Enquanto isso, no processo de cloretação pode ser utilizado o rutilo tanto na sua forma natural quanto na sua forma sintética.

## 2.6 Aplicações do Dióxido de Titânio

A combinação de materiais diversos tem se tornado objeto de estudo de vários pesquisadores, com o intuito de melhorar produtos já existentes, na busca de novos produtos para as mais diversas áreas, entre outros objetivos. Neste sentido, é válido ressaltar que o dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) vem sendo estudado na adição de diversos materiais em diversas áreas, logo este capítulo tem como objetivo apresentar algumas dessas variadas aplicações.

A priori, a primeira aplicação é dentro da área ambiental, que com o avanço da tecnologia e com a crescente preocupação com meio ambiente tem-se procurado por melhorias para a área. Desta forma, Bergamasco *et al.* (2019) afirma que o  $TiO_2$  tem recebido mais atenção com o passar dos anos devido a observação das suas propriedades fotocatalíticas no auxílio da decomposição de materiais inorgânicos e orgânicos.

Dando continuidade, Bergamasco *et al.* (2019) fez a impregnação do  $TiO_2$  em uma membrana comercial para o tratamento de águas. Na adoção de sua metodologia, foi feito através do próprio sistema de nanofiltração para que se obtivesse êxito na impregnação do material outrora citado. Bergamasco *et al.* (2019) observou o sucesso no processo de impregnação das partículas de  $TiO_2$  nas membranas comerciais, garantindo a melhoria na capacidade fotocatalítica e no tratamento de águas.

Outra aplicação dentro da área ambiental foi feita por Lopes *et al.* (2021), a qual utilizou do  $TiO_2$  para a degradação do diuron presente no meio ambiente. Dentro

desse contexto, é importante salientar que o diuron está presente na cultura de alguns alimentos, como abacaxi, banana, café entre outros. Desta forma, o autor salienta que é preciso aplicar o diuron de forma adequada para que possa vir a ser considerado medianamente tóxico e perigoso ao meio ambiente.

Lopes *et al.* (2021) afirma que o catalisador que está em mais uso dentre outros catalisadores é o  $\text{TiO}_2$ , nos processos oxidativos heterogêneos sob radiação, devido fácil acesso comercial, não poluir o meio ambiente, como também sua alta atividade de degradação. Logo, Lopes *et al.* (2021) concluiu que para a utilização do  $\text{TiO}_2$  como catalisador, o pH foi a variável com maior influência significativa. Enfatizando assim que, os altos percentuais de oxidação do diuron aumentam a visibilidade do processo fotocatalítico para a degradação de pesticidas.

Outra aplicação é na área da medicina, pois com o avanço da tecnologia os pesquisadores da área têm procurado alternativas para melhorar e mitigar patologias existentes no sistema humano. Desta forma, Maddah *et al.* (2023) analisaram os efeitos das nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  no tratamento de câncer de cólon humano. Neste sentido, o autor enfatiza que esse tipo de câncer supracitado é o terceiro maior motivo da causa de mortes humanas, originando a necessidade de meios de estagnar ou até mitigar a doença.

Maddah *et al.* (2023) ainda afirma que, devido às propriedades e características do  $\text{TiO}_2$  vem sendo amplamente utilizado pela indústria da medicina. Além disso, ainda afirma que o Titânio (Ti) é bastante utilizado dentro da odontologia e medicina. Como também, foi afirmado que o  $\text{TiO}_2$  é inofensivo para a saúde dos seres humanos.

Logo, Maddah *et al.* (2023) em seu estudo observou que a aplicação do  $\text{TiO}_2$  veio a ocasionar uma redução no tempo de sobrevivência das células cancerígenas, como também, induzindo diversos danos na célula de câncer HC7116. Em paralelo a isso, o  $\text{TiO}_2$  veio também a reduzir as atividades de algumas enzimas antioxidantes (catalase, superóxido dismutase e glutathiona peroxidase) e reduziu a capacidade antioxidante total.

A construção civil, por sua vez, é uma área que está sempre à procura da melhoria dos materiais para atender às novas necessidades da sociedade. Desta forma, Aguiar (2018) afirma que durante décadas as argamassas foram materiais que não receberam nenhum estudo com alguma modificação substancial. Contudo, com

o avanço da tecnologia essa realidade mudou, passando a ter adição de nanopartículas, cápsulas e fibras no desenvolvimento de novas propriedades.

Aguiar (2018) afirma que o  $\text{TiO}_2$  possui a capacidade de reagir com os poluentes existentes na atmosfera, tanto em ambientes externos quanto internos. Desta forma, superfícies preparadas com o  $\text{TiO}_2$  tem a capacidade de degradar os poluentes atmosféricos. Logo Aguiar (2018) concluiu em seu estudo que a combinação entre  $\text{TiO}_2$  e PCM micro gera a possibilidade de desenvolvimento de argamassas com a capacidade de autolimpeza e armazenamento de calor. Concomitante a isso, o autor afirma que  $\text{TiO}_2$  demonstra possuir sua funcionalidade por longo prazo, como também ser compatível com uma expectativa de vida útil no local onde são aplicadas nas edificações.

Para além disso, sabe-se que com o avanço da sociedade o número de resíduos, seja da construção ou de outras áreas, tem aumentado constantemente enfatizando a necessidade de se mitigar tal problemática, fazendo menor geração de rejeitos ou o uso dos mesmos. Desta forma, Albuquerque *et al.* (2019) veio estudar as propriedades de argamassas com Minério Não Reagido (MNR), oriundo do processo de produção do dióxido de titânio.

Albuquerque *et al.* (2019) observou que realizando a implementação de 15% de MNR em argamassas não garante mudanças consideradas significativas para as propriedades físicas e mecânicas das argamassas, indicando uma possibilidade da diminuição do consumo do cimento na produção de argamassas e fazendo o aproveitamento do MNR gerado na produção do  $\text{TiO}_2$ .

O  $\text{TiO}_2$  também é aplicado em aterros controlados, devido ao alto descarte de materiais, resíduos entre outros. Neste contexto, Castro *et al.* (2018) enfatiza que com o passar dos anos o descarte inadequado e desacerbado de nanopartículas no meio ambiente tem se tornado cada vez mais presente no cotidiano, ressaltando a influência em efeitos indesejáveis ao meio ambiente e à saúde humana.

Oliveira *et al.* (2018) verificou que o óxido de cobre é um nanomaterial bastante presente em solos de aterros controlados devido ampla utilização dentro de diversas indústrias. Desta forma, seu estudo demonstrou a influência das suspensões de  $\text{TiO}_2$ -NPs no processo de percolação, como também as interações com o solo na sua camada protetiva. Concomitante a isso, o autor supracitado salienta que a presença de  $\text{TiO}_2$ -NPs, variadas nanopartículas podem ser carregadas no processo de lixiviação.

Outra aplicação do  $\text{TiO}_2$  é na degradação da Sertralina presente no meio ambiente. Desta forma, Moreira *et al.* (2019) afirma que o descarte inadequado de fármacos gera grandes danos ao meio ambiente, como também a saúde humana, o que incentivou o seu estudo da aplicação do  $\text{TiO}_2$  na degradação da Sertralina.

Moreira *et al.* (2019) fez a avaliação de semicondutores baseados em  $\text{TiO}_2$  no processo de fotocatalise para a degradação da Sertralina. Desta forma, o autor observou que com a utilização do  $\text{TiO}_2$  teve uma redução ou remoção da Sertralina na faixa de 74%, sendo considerada bastante eficiente, contudo, verificou que a utilização do  $\text{TiO}_2$  1%B como semicondutor, trouxe uma redução/remoção maior sendo na faixa de 83%

Por fim, pode-se enfatizar que o  $\text{TiO}_2$  é bastante aplicado em diversas áreas, o que instiga o seu estudo na incorporação em misturas asfálticas. Nesse sentido, na literatura encontram-se estudos da modificação de ligantes com o  $\text{TiO}_2$ , fazendo a avaliação mecânica e reológica da mesma, contudo têm-se uma lacuna da avaliação mecânica de misturas com a incorporação do  $\text{TiO}_2$  entrando como o fíler da mistura.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo tem o objetivo apresentar os materiais a serem estudados nesta pesquisa, como também detalhar os métodos utilizados para a caracterização dos materiais, dosagem da mistura e avaliação mecânica.

#### **3.1 Materiais**

Para esse estudo foram utilizados alguns materiais, sendo eles: agregados, cal hidratada, ligante e Dióxido de Titânio. Neste contexto, a Construtora Rocha Cavalcante, da cidade de Campina Grande - Paraíba, forneceu os agregados graúdos, sendo britas graníticas de tamanhos nominais 19 mm e 12.5 mm conforme as figuras 3 e 4, respectivamente. Já como agregado miúdo foi fornecido pó de pedra de mesma origem granítica, como mostra a Figura 5.

Figura 3: Brita 19 mm.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4: Brita 12,5 mm.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 5: Pó de pedra.



Fonte: Autor, 2025.

Para a escolha da tipologia do ligante asfáltico foi observada a tipologia mais utilizada na região, sendo o CAP 50/70 (Figura 6), fornecido pela empresa Cordilheira Pavimentos LTDA, localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba.

Figura 6: Ligante asfáltico (CAP 50/70)



Fonte: Autor, 2025.

Para o filer das misturas de referências foi utilizada uma cal monohidratada adquirida no comércio da cidade (Conforme a Figura 7). As misturas modificadas fizeram uso de micropartículas de Dióxido de Titânio (Figura 8), o qual foi disponibilizado pela empresa Laiouns's Pigmentação, localizada na cidade do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro.

Figura 7: Cal hidratada.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 8: Dióxido de Titânio.

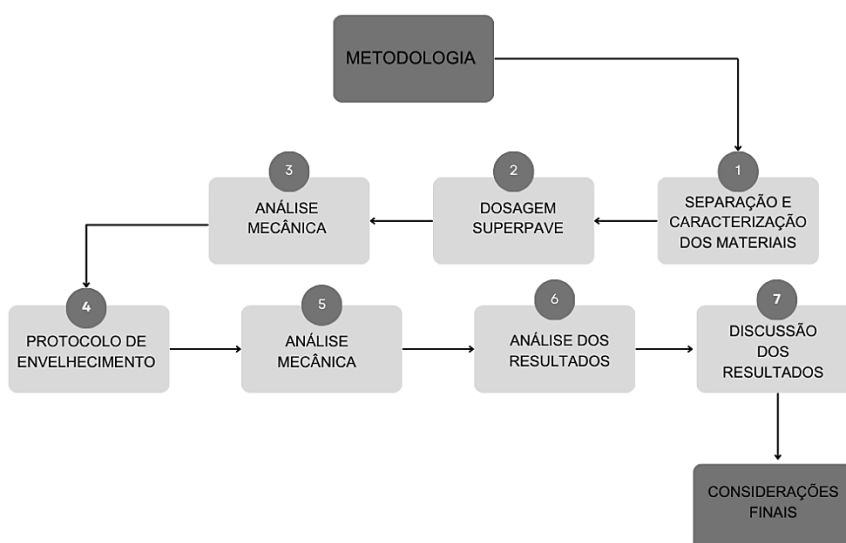


Fonte: Autor, 2025.

### 3.2 Métodos

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos - LEP, localizado no Campus sede da Universidade Federal de Campina Grande. Além disso, salienta-se que para o seu desenvolvimento se fez importante a utilização de uma sequência metodologia a ser seguida. Nesse contexto, esse capítulo tem como objetivo apresentar os métodos a serem aplicados, partindo da caracterização dos materiais até a análise mecânica das misturas. A Figura 9 apresenta um fluxograma da metodologia aplicada neste estudo.

Figura 9: Fluxograma da pesquisa.



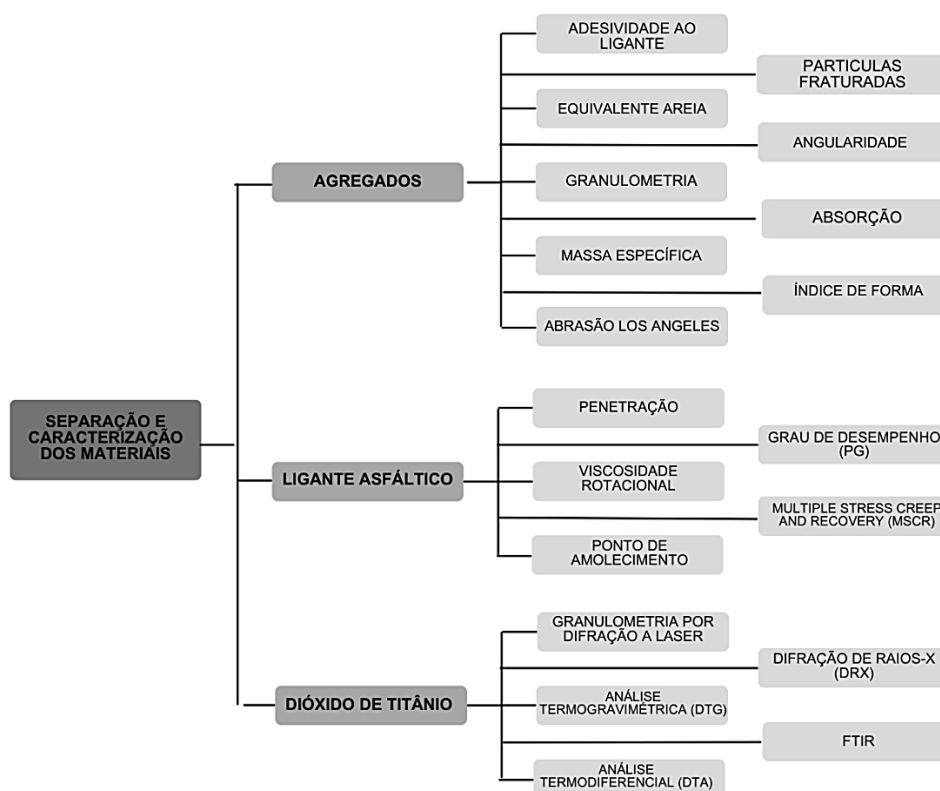
Fonte: Autor, 2025.

De acordo com a Figura 9, pode observar que o método consiste basicamente em separar o material, caracterizá-lo, dosar a mistura, fazer uma análise mecânica, aplicar protocolo de envelhecimento e assim realizar novamente a análise mecânica das misturas propostas. Por fim, coletar os dados analisá-los e discuti-los.

### 3.2.1 Caracterização dos materiais

Para se dar início à parte prática da pesquisa, é importante que ocorra a separação e caracterização dos materiais (agregados, ligante asfáltico e Dióxido de Titânio) a serem utilizados. Desta forma, este capítulo tem como objetivo apresentar os ensaios realizados para a caracterização dos materiais, previamente esquematizado no fluxograma da Figura 10.

Figura 10: Fluxograma da caracterização dos materiais.



Fonte: Autor, 2025.

De acordo com a Figura 10, os ensaios de caracterização foram divididos de acordo com o material a ser utilizado. Neste sentido, foram agrupados em três conjuntos diferentes, sendo eles a caracterização dos agregados, do ligante asfáltico, e do material a ser incorporado na mistura (dióxido de titânio).

### 3.2.1 Caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizada com base nas normativas técnicas vigentes, com o intuito de garantir a adequação dos materiais às exigências para o uso em misturas asfálticas. As metodologias empregadas para essa caracterização estão esplanadas nos tópicos a seguir, contemplando os principais ensaios.

#### 3.2.1.1 Massa específica e Absorção

A ASTM C 127:2015 regulamenta os ensaios de massa específica e absorção de agregados graúdos. Logo para a realização do procedimento experimental se fez necessário o uso de alguns materiais, sendo eles: balança de alta precisão, recipiente com água, estufa e um pano.

O procedimento iniciou-se pela preparação da amostra, a qual consiste na lavagem dos agregados para que se possa limpar toda a superfície, sendo colocado posteriormente imersos em água por tempo suficiente para saturar toda a superfície. A pesagem da amostra ocorrerá de quatro maneiras, sendo:

- Massa ao ar: Após saturada, deixasse a amostra a temperatura ambiente até que sua superfície fique seca, e então pesa-se a amostra;
- Massa submersa: consiste em pesar a amostra ainda imersa em água, utilizando um recipiente suspenso na balança. Essa pesagem pode requerer o cálculo indireto da massa da amostra submersa por meio da diferença entre a massa do recipiente com e sem a amostra;
- Massa saturada e com superfície seca: Consiste em secar a superfície da amostra de forma cuidadosa sem perca de umidade interna com um pano e na sequência realizar sua pesagem;
- Massa de amostra seca: Consiste em secar a amostra totalmente em estufa a  $\pm 110$  °C e posteriormente realizar a pesagem.

Para a determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção são realizados da seguinte maneira:

- Massa específica:  $\frac{\text{Massa da amostra seca}}{\text{Volume da amostra submersa}}$
- Massa específica aparente:  $\frac{\text{Massa da amostra saturada com superfície seca}}{\text{Volume da amostra submersa}}$
- Absorção:  $\frac{\text{Massa da amostra saturada com superfície seca} - \text{Massa da amostra seca}}{\text{Volume da amostra submersa}}$

### 3.2.1.2 Abrasão “Los Angeles”

Regido pela norma ASTM C131:2020, o experimento de abrasão Los Angeles tem como objetivo fazer determinação da resistência do agregado ao desgaste por abrasão e impacto, simulando as solicitações mecânicas causadas pelo tráfego de veículos em pavimentos.

O ensaio é realizado por meio de um tambor rotativo, no qual são inseridos uma quantidade determinada de agregados secos e esferas de aço padronizadas, conforme a fração granulométrica da amostra. Durante a rotação, as esferas de aço colidem com os agregados, gerando desgastes e/ou rupturas, simulando as condições vivenciadas por pavimentos, por exemplo.

Neste contexto, é importante salientar que o resultado é expresso em porcentagens do desgaste e sendo interpretado da seguinte maneira: quanto maior for a porcentagem de desgaste, menor será a resistência, ou seja quanto menor a porcentagem de desgaste, maior será a resistência.

### 3.2.1.3 Índice de forma

O ensaio de índice de forma é regido pela norma ASTM D4791:2019 e possui como objetivo de determinar a proporção de partículas planas, alongadas ou planas-alongas que estão presentes em agregados graúdos. Para a realização do procedimento é necessário o uso de um paquímetro para a coleta das dimensões principais dos agregados.

Com as dimensões das partículas de agregados coletadas é possível realizar o cálculo do índice de forma, fornecendo dados para classificar as partículas como cúbicas, lamelares, alongadas ou lamelares-alongadas. Dito isto, o procedimento consiste em:

- Amostragem: Coletar uma amostra representativa do agregado gráudo;
- Seleção das partículas: Separação de partículas de diferentes faixas granulométrica;
- Medição: Com paquímetro coletar as principais dimensões das partículas;
- Cálculo do Índice de forma: Razões entre as dimensões das partículas, auxiliando para identificação da tipologia das partículas;
- Classificação: Partículas classificadas de acordo com os índices obtidos.

#### **3.2.1.4 Adesividade ao ligante**

O ensaio de adesividade ao ligante é regido pela norma técnica ABNT NBR 16408:2015, objetiva determinar a afinidade entre os materiais, simulando a suscetibilidade à perda de ligação em presença de umidade. A priori, os agregados são secos e posteriormente revestido com ligante asfáltico previamente aquecido com temperaturas usuais de usinagem.

Após o revestimento, as partículas são resfriadas a temperatura ambiente e em seguida imersas em água a uma temperatura de 25 °C por um período de 24 horas. Ao término do tempo necessário de imersão, é realizada uma avaliação visual da superfície das partículas, estimando-se uma porcentagem de cobertura do ligante sobre o agregado. Neste sentido, os valores mais altos indicam uma melhor aderência entre o agregado e o ligante, enquanto valores mais baixos do índice de adesividade pode indicar a necessidade de DOPE do ligante asfáltico.

#### **3.2.1.5 Equivalente de Areia**

Regido pela norma ASTM D2419:2014 o ensaio de equivalente de areia visa fazer a determinação da proporção relativa de materiais finos em relação a agregados finos ou solos granulares. Logo, esse procedimento é importante para compreender a qualidade do agregado utilizado, tendo em vista que a presença de materiais finos

em excesso pode ser prejudicial para o entrosamento de ligante e agregado, por exemplo.

O procedimento consiste em passar o agregado na peneira de 4,75 mm, pegar o agregado fino passante e aplicar uma solução flocculante. Agita-se a amostra e a deixa em repouso com o intuito de que a argila e o pó fino se segreguem da areia, formando assim uma suspensão. Com o auxílio de uma proveta graduada, mede-se a altura da areia e a altura da suspensão de argila e material fino, acarretando resultado expresso em porcentagem.

Por fim, o equivalente de areia é calculado da seguinte maneira:

$$\text{Equivalente de areia} = \frac{\text{Altura da areia}}{\text{Altura da suspensão de argila}} \times 100$$

### **3.2.1.6 Partículas fraturadas**

O ensaio de partículas fraturadas em agregados graúdos é regido pela norma ASTM D5821-13:2017, possuindo como objetivo principal a determinação da porcentagem das partículas que apresentem uma ou mais de suas faces fraturadas em uma amostra significativa. Logo, esse ensaio é essencial para averiguar a qualidade do agregado graúdo.

Nesse contexto, é válido enfatizar que determinação pode ser feita através de contagem ou de massa. Por contagem, visa avaliar individualmente cada partícula, observando a existência ou não de fraturas em suas faces. Por massa, consiste em determinar a massa das partículas que atendem os critérios e fratura em relação a massa total da amostra. Logo, são consideradas faces fraturadas aquelas que apresentam quebra natural ou artificial, não sendo consideradas lisas ou arredondadas.

### **3.2.1.7 Angularidade**

O ensaio de angularidade de agregados miúdos é regido pela norma ASTM C1252:2017 e objetiva fazer a avaliação indiretamente da forma e da textura superficial do pó de pedra ou dos grãos de areia. Baseia-se na medição do teor de vazios presente em uma amostra de agregado miúdo, deixada escoar livremente por um funil para dentro de um recipiente cilíndrico de volume conhecido, sem

compactação. Quanto maior for a angularidade, maior será a angularidade e a rugosidade das partículas.

Sendo assim, o procedimento resume-se em:

- Preparação da amostra: secar agregado em estufa e caracterizar granulometria;
- Ensaio de fluxo livre: Coloca-se a amostra em um funil padronizado e deixa escoar dentro de um recipiente cilíndrico de volume conhecido, sem a ocorrência de qualquer compactação;
- Determinação do teor de vazios: Tendo com base a massa da amostra depositada no cilindro, o volume do recipiente e a massa especificada amostra.

### 3.2.1.8 Resultados de caracterização dos agregados

Dando início, salienta-se que esse tópico irá apresentar os resultados em relação a caracterização dos agregados utilizados (brita 19 mm, brita 12.5 mm e pó de pedra). Ainda nesse sentido, enfatiza-se que na Tabela 1 temos os resultados obtidos para os agregados.

Tabela 1: Resultados da caracterização dos agregados.

Ensaio	Norma	Especificações	Material		
			Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Pó de Pedra
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127:2015	-	2,77	2,772	2,712
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127:2015	-	2,767	2,75	2,659
Absorção (%)	ASTM C127:2015	≤2	0,13	0,287	0,731
Abrasão "Los Angeles"	ASTM C131:2020	≤55	18,5	20,4	-
Índice de Forma	ASTM D4791:2019	≥0,5	0,653	0,649	-
Adesividade ao ligante		-	Não satisfatório	-	-
Equivalente Areia (%)	ASTM D2419:2014	≥55	-	-	67,3
Partículas alongadas e	ASTM D4791:2019	≤10	5,68	3,25	-

<b>achatadas (%)</b>					
<b>Partículas fraturadas (%)</b>	ASTM D5821-13:2017	≥90	98,28	99,34	-
<b>Angularidade</b>	ASTM C1252:2017	≥45	-	-	45,1

Através dos resultados apresentados na tabela, pode-se perceber os mesmos foram obtidos dentro do esperado, com exceção da adesividade ao ligante asfáltico da brita 19mm, a qual foi visivelmente abaixo do esperado, corroborando para a necessidade do uso de aditivos que melhorem a adesividade. Neste sentido, para melhorar a adesividade da brita 19 mm, foi feito o uso do DOPE concentrado D.08-líquido-TM em uma proporção de 0,1% em relação ao peso do ligante. Salienta-se que para se adicionar o DOPE, esquentam-se o ligante asfáltico a uma temperatura variando de 150°C a 180°C, para que seja adicionado o D.08-líquido-TM, e agitado de forma mecânica, para que assim se garanta a homogeneização completa.

Desta forma, salienta-se que após a aplicação do DOPE ao ligante, foi realizado novamente o ensaio de adesividade ao ligante com a brita 19 mm, tornando-se desta vez um resultado satisfatório.

### **3.2.2 Caracterização do ligante asfáltico**

Para que se possa fazer a caracterização do ligante asfáltico, é necessário a realização de procedimentos experimentais. Neste sentido, este tópico irá abordar como são executados os ensaios realizados para a caracterização do ligante utilizado na pesquisa.

#### **3.2.2.1 Penetração**

O ensaio de penetração é regido pela norma do DNIT 155/2010 - ME, o qual objetiva fazer a determinação da penetração de materiais asfálticos, sejam eles em estado sólido ou semi-sólidos, para que possa determinar sua tipologia. Neste sentido, para a realização deste ensaio é necessário a utilização de alguns materiais, sendo eles: recipiente de penetração, penetrômetro, agulha, banho de água, cuba de transferência, cronômetro e termômetro.

Figura 11: Penetrômetro para ensaio de Penetração.



Fonte: Autor, 2025.

Logo, para se iniciar o ensaio é necessário colocar a amostra no recipiente de penetração e colocar a tampa no recipiente para evitar a acomodação de poeira no material a ser ensaiado. Após isso, coloca a amostra e a cuba de transferência no banho de água, a uma temperatura de aproximadamente 25°C (sugerida por norma). E paralelo a isso, deve ser verificado se a luva da agulha e a haste contenham água, para que o operador possa estar certificado da ausência de água e de outros materiais. Ainda nesse sentido, é importante ressaltar que se deve limpar a agulha com solvente.

Para a realização do ensaio, posiciona-se a amostra no penetrômetro e, na sequência, a agulha é ajustada e liberada para penetrar a amostra por tempo determinado (em segundos). Ao final, registra-se a profundidade atingida. Salienta-se que o procedimento é repetido, no mínimo, três vezes, conforme orientações da norma.

### **3.2.2.2 Viscosidade rotacional**

Regido pela norma ABNT NBR 15184, o ensaio de viscosidade rotacional tem como objetivo realizar a medição da viscosidade de materiais betuminosos em estado líquido, fornecendo uma estimativa da resistência ao escoamento do ligante asfáltico quando submetido a altas temperaturas, comumente temperaturas superiores a 100 °C. Para a execução do procedimento experimental, foi necessário o uso do viscosímetro do tipo Brookfield (Figura 12), disponível no Laboratório de Engenharia de Pavimentos -LEP.

Figura 12: Viscosímetro do tipo Brookfield.



Fonte: Autor, 2025.

O ligante asfáltico quando submetido a altas temperaturas se comporta como um fluido viscoso, e a medição da sua viscosidade auxilia na determinação de sua consistência e rigidez em diferentes faixas térmicas, importantes para a definição das temperaturas de usinagem e de compactação.

O funcionamento do viscosímetro Brookfield tem como base a rotação de um eixo metálico (spindle) imerso na amostra de ligante aquecida, mantendo uma velocidade constante. A viscosidade é determinada pelo torque necessário para vencer a resistência interna ao movimento, ou seja, a resistência da amostra ao cisalhamento originado pelo spindle. Sendo assim é traçada a curva de viscosidade-temperatura por meio de leituras em diferentes temperaturas, possibilitando a avaliação do material diante as variações térmicas.

### 3.2.2.3 Ponto de amolecimento

A determinação do ponto de amolecimento foi feita pelo método do Anel, regido pela norma DNIT 131/2010- ME. Nesse sentido, este ensaio objetiva determinar o ponto de amolecimento de ligantes asfálticos em faixa de temperatura que varia entre 30°C a 157°C. Logo, para sua realização são necessários os seguintes materiais: anéis de latão, guias das bolas, bolas de aço, suporte de latão, béquer de vidro, termômetro, bico de Bunsen ou aquecedor elétrico, espátula metálica, placa de latão e bastão de vidro, observe a Figura 13.

Figura 13: Aparelhagem do ponto de amolecimento.



Fonte: Autor, 2025.

O ensaio consiste em colocar ligante dentro dos anéis, tomando cuidado para que não tenha excessos, e colocar para esfriar a temperatura ambiente. Faz a montagem adequada do aparelho, na sequência coloca-se os anéis posicionados no suporte. Na sequência colocam-se as guias das bolas sobre os anéis, pega esse conjunto e coloca dentro do béquer contendo água destilada. As bolas de aço são posicionadas em cima dos anéis contendo ligante, lembrando de o colocar com a pinça.

Após toda a montagem do aparelho e posicionamento do material, o béquer é aquecido, colocando o termômetro dentro dele. Logo, é anotado a temperatura com a qual o material toca a placa inferior. Deste modo, o resultado do ensaio é a média da temperatura em que as duas amostras tocam a placa inferior.

#### 3.2.2.4 Grau de Desempenho (PG)

Regido pela norma ABNT NBR 15511:2022, o ensaio de Grau de Desempenho (PG – Performance Grade) faz uso do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico para sua execução. O ensaio objetiva determinar a faixa de temperatura a qual o ligante asfáltico pode ser manuseado com segurança, tendo como base o seu comportamento viscoelástico. O parâmetro fundamental utilizado é  $|G| / \sin\delta$ , onde  $|G|$  = módulo de cisalhamento complexo e  $\delta$  = ângulo defase, indicador do balanço entre os componentes viscoso e elástico do material.

O procedimento é conduzido a partir de amostras padronizadas por norma, as quais são inseridas no DSR, onde serão submetidas a diferentes temperaturas.

Destaca-se que passa os ligantes asfálticos que não são envelhecidos, o valor da expressão  $|G| / \sin\delta$  deverá ser maior que 1 kPa, evidenciando que o material exibe resistência adequada à deformação permanente sob carga repetida a altas temperaturas. Além disso, salienta-se que o reômetro é programado previamente e realiza as leituras de forma automática, fazendo com que o operador precise apenas posicionar a amostra corretamente.

Figura 14: Reômetro para o ensaio de PG.



Fonte: Autor, 2025.

Além disso, o ensaio também possibilita na obtenção da curva do tangente do ângulo de fase, parâmetro importante para compreensão do comportamento viscoelástico do ligante asfáltico. Valores baixos de  $\tan \delta$  indicam que a amostra possui comportamento majoritariamente elástico, enquanto valores nas proximidades de  $90^\circ$  indicam rigidez e predominância viscosa. Logo, esses dados auxiliam na determinação do grau de desempenho, sendo extremamente importante para definição de material para as variadas condições climáticas.

### 3.2.2.5 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Regido pela norma DNIT 423/2020 – ME, o ensaio de *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) objetiva realizar a determinação da complância não recuperável ( $J_{nr}$ ) e o percentual de recuperação (%R) de ligantes asfálticos. O ensaio ocorre no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) conforme a figura x, logo destaca-se que o ensaio analisa o comportamento visco elástico do ligante asfáltico submetido a tensões múltiplas, o qual é um indicador importante da suscetibilidade à

deformação permanente quando submetido a cargas repetidas, como ocorre com as cargas do tráfego veicular em campo.

Figura 15: Equipamentos para ensaio de MSCR.



Fonte: Autor, 2025.

Ao realizar o envelhecimento acelerado da amostra de ligante asfáltico pelo método *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) de acordo a norma NBR 15235, a amostra passa a ser submetida no DSR a ciclos de carregamentos de tensões constantes, para cada ciclo com a duração de 1 segundo de aplicação de carga (fase de fluência) é seguido de recuperação livre (sem carga) com a duração de 9 segundos. Salienta-se que durante estes ciclos, ocorre o registro das deformações iniciais, máxima e de recuperação para fins de cálculo dos parâmetros %R e Jnr em cada nível de tensão.

Desta forma, os resultados que são obtidos durante o ensaio indicam a capacidade do ligante asfáltico resistir à fluência e de recuperar as deformações elásticas. Altos valores de %R e baixos de Jnr indicam maior resistência ao rutting. Ademais, é realizado o cálculo do índice de sensibilidade ao estresse (Jnr\_diff), o qual corresponde à variação percentual entre os valores de Jnr nas duas tensões aplicadas, contribuindo na classificação do ligante frente a diferentes volumes de tráfego, tendo os limites máximos estabelecidos para garantir bom desempenho como sugere a norma DNIT 423/2020 – ME.

### 3.2.2.6 Resultados de caracterização do ligante

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de reologia, que por sua vez caracteriza o ligante asfáltico. Neste contexto, é importante ressaltar que os ensaios foram realizados de acordo com cada norma vigente. Concomitante a isso, é

perceptível que os resultados obtidos foram dentro dos valores esperados. Além disso, destaca-se o aumento da viscosidade pós-RTFO, como também a diminuição da massa do ligante, o qual é justificada pela volatilidade do material.

Tabela 2: Resultados da caracterização do ligante asfáltico.

Ensaio		Especificação (antes RTFO)	Resultado (antes RTFO)	Especificação (pós-RTFO)	Resultado Pós-RTFO
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)		50 a 70	59	-	38
Ponto de Amolecimento (°C)		>46	48	-	50
Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)		-	-	≤8	2
Variação de massa do ligante (%)				≤0,5	0,10
Índice de suscetibilidade térmica (ISC)		-1,5 a +0,7	-1,33	-	-
Viscosidade Rotacional (cP)	135 °C	≥274	405,94	-	554,08
	150 °C	≥112	202,37	-	264,99
	175 °C	57 a 285	73,97	-	91,53
Temperatura máxima de PG (°C)		>64 °C	66,9	-	65,6
MSCR	Jnr a 0,1 kPa-1	-	-	-	3,51
	Jnr a 3,2 kPa-1	-	-	-	3,86
	Percentual de recuperação a 0,1 kPa [%]	-	-	-	4,24
	Percentual de recuperação a 3,2 kPa [%]	-	-	-	0,34
	Sensibilidade a níveis de deformação (Jnr dif) [%]	-	-	-	9,97
Penetração Retida (%)			≥55		63,39

### 3.2.3 Caracterização do TiO<sub>2</sub>

A caracterização do dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) foi realizado por meio de procedimentos experimentais solicitados ao Laboratório de Tecnologia de Materiais, pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – Campus Sede. Logo, foi utilizado dos seguintes métodos:

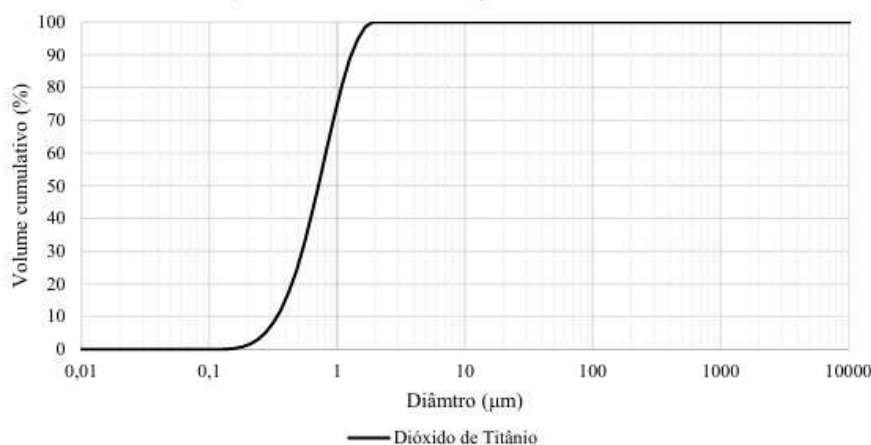
- Granulometria por Difração a Laser: Regido pela norma ISO 13320:2020, é aplicada para determinar a disposição granulométrica

das partículas, ou seja, conhecer o tamanho das partículas para afirmar que seja um material fino;

- Análise Termogravimétrica (TG): Regido pela norma ASTM E1131, é aplicada para realizar a avaliação da estabilidade térmica do material e determinar a perda de massa em função da temperatura;
- Análise Termodiferencial (DTA): Regido pela norma ASTM E794, é aplicado para averiguar eventos endotérmicos ou exotérmicos que estão associados a transições de fases ou reações químicas;
- Difração de Raios-X (DRX): Regido pela norma ABNT NBR 16162:2013, é aplicada para conhecer a estrutura cristalina do material e conhecer as possíveis fases minerais existentes;
- Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR): Regido pela norma ASTM E1252, é aplicada para identificar quais os grupos funcionais que estão presentes na amostra, apresentando informações acerca das ligações químicas e de possíveis impurezas.

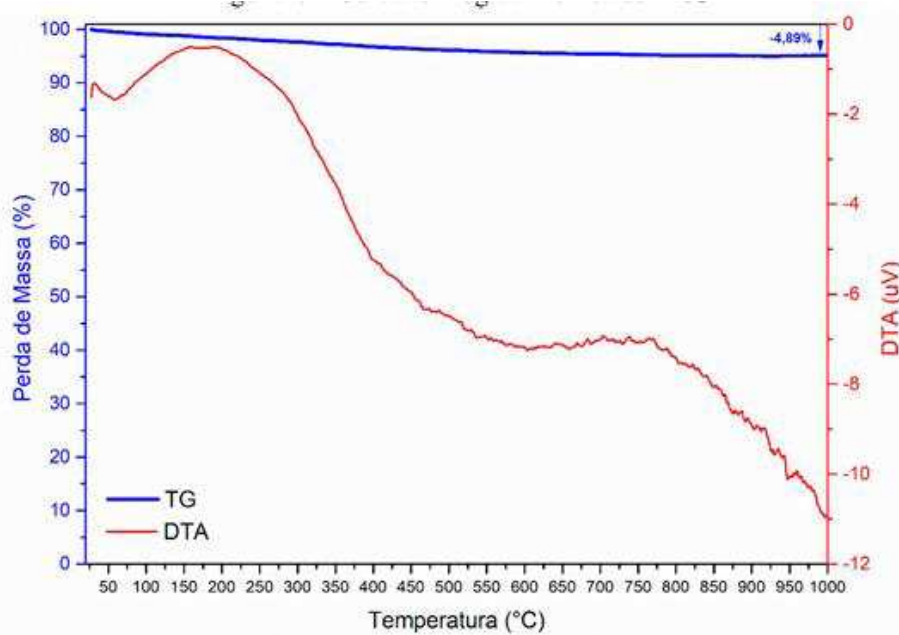
A Figura 16 apresenta a granulometria por difração a laser do  $\text{TiO}_2$ , logo é possível perceber uma distribuição monomodal com partículas predominantemente situadas entre  $0,1 \mu\text{m}$  e  $1 \mu\text{m}$ . Ainda assim, é possível perceber que o diâmetro médio (D50) é de aproximadamente  $0,5 \mu\text{m}$ , podendo ser caracterizado como um material fino, com alta área superficial. Quando analisado as partículas em D10 e D90, é possível perceber que 10% tem partículas com diâmetros inferiores a  $0,2 \mu\text{m}$  em D10 e 90% das partículas possuem diâmetros abaixo de  $1 \mu\text{m}$  para o D90.

Figura 16: Granulometria por difração a laser do  $\text{TiO}_2$



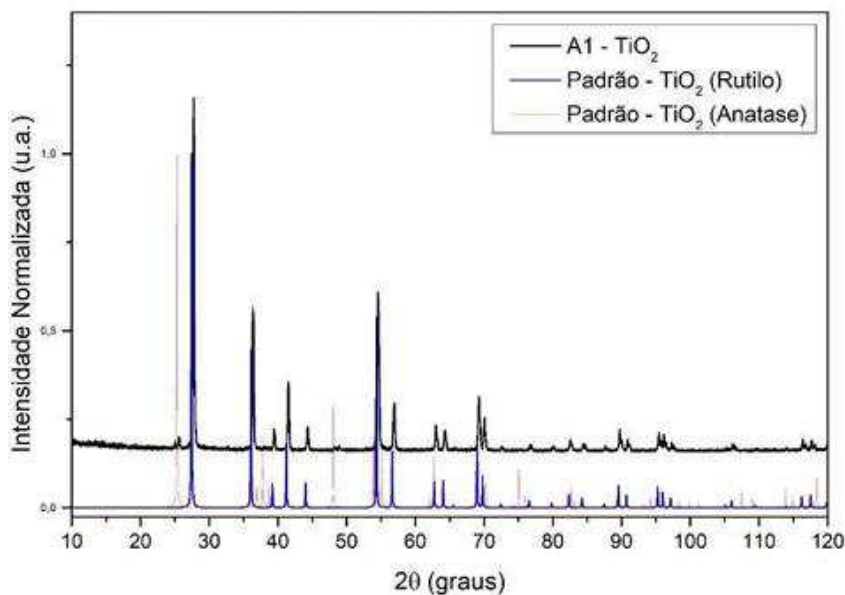
A Figura 17 apresenta os resultados para a análise termogravimétrica (TG) e termodiferencial (DTA). Observando o TG do  $\text{TiO}_2$  é perceptível uma perda de 4,89% de massa até a marca de 1000 °C, o que indica uma alta estabilidade térmica do material, podendo justificar essa perda por estar relacionada, principalmente, com a remoção de umidade superficial e grupos de hidroxila, ocorrer de forma gradual.

Figura 17: DTA e TG do  $\text{TiO}_2$ .



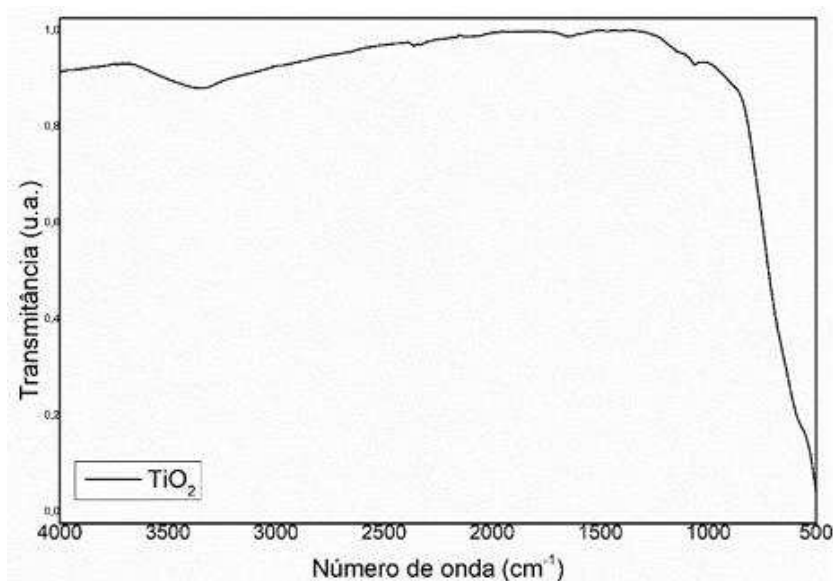
Com relação a Análise Termodiferencial (DTA), percebe-se eventos endotérmicos característicos, mais evidente entre 600 °C e 950 °C, podendo ser atribuído a uma possível transição entre a fase cristalina de anatásio para rutilo, comportamento comum do  $\text{TiO}_2$ . Logo, os resultados indicam que o  $\text{TiO}_2$  pode ser incorporado a misturas asfálticas sem sofrer degradação com a temperatura de produção.

A Figura 18, por sua vez apresenta o gráfico da Difração de Raio-X (DRX) o qual foi utilizado para a identificação das fases cristalinas presentes no  $\text{TiO}_2$ . Logo, é perceptível que os picos da fase anatase coincidem com os picos do padrão experimental, mais especificamente o pico intenso em  $2\theta \approx 25^\circ$ .

Figura 18: Difração de raio-x do TiO<sub>2</sub>

Ainda fazendo uma análise da figura acima, percebe-se picos secundários, como em  $2\theta \approx 27^\circ$ , indicando a ocorrência da fase rutilo, mas em pequenas quantidades. Deste modo, pode-se enfatizar que a amostra apresenta uma estrutura cristalina, sendo majoritariamente da fase anatase o que pode ser considerado favorável do ponto de vista superficial e de potencial de interação ao ligante asfáltico.

A Figura 19 apresenta o resultado do FTIR utilizado para a identificação dos grupos funcionais presente na amostra de TiO<sub>2</sub>. Nesse contexto apresenta-se uma intensa banda de absorção abaixo de  $1000\text{ cm}^{-1}$ , sendo atribuída às vibrações de alongamento Ti-O e Ti-O-Ti, as quais são características do dióxido de titânio.

Figura 19: FTIR do TiO<sub>2</sub>

Ainda de acordo com a figura 19 destaca-se também a ausência de bandas significativas na região de 3200 a 3600  $\text{cm}^{-1}$ , o que sugere uma baixa presença dos grupos hidroxila (-OH) ou umidade superficial. Além disso, nas regiões onde são associadas as impurezas orgânicas ou carbônicas não foram identificadas bandas, sugerindo uma alta pureza da mostra de  $\text{TiO}_2$  analisada.

### 3.3 Dosagem Superpave

A metodologia Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) é uma dosagem de misturas asfálticas que tem a finalidade de garantir o melhor desempenho do pavimento em campo, com adaptações da mistura para as condições reais de tráfego e clima. Baseada na seleção criteriosa de ligantes asfálticos e agregados, granulometria dentro a zona de controle Superpave e com definição de teor ótimo de ligante tendo como referência parâmetros volumétricos.

DNIT 178/2018-PRO indica que a compactação dos corpos de prova é realizada pelo compactador giratório (Figura 20), o qual simula a ação de um tráfego real sobre a mistura. Enfatiza-se que são adotados os níveis de giro  $N_{ini}$ ,  $N_p$  e  $N_{máx}$ , definidos a partir do volume de tráfego definido, sendo utilizado nível de médio a alto. Em paralelo a isso, destaca-se que o teor ótimo de ligante asfáltico é aquele que resulta em 4% de vazios de ar no número de giros de projeto ( $N_p$ ). Durante a compactação é possível observar a densidade relativa e a curva de compactação.

Figura 20: Compactador Superpave.



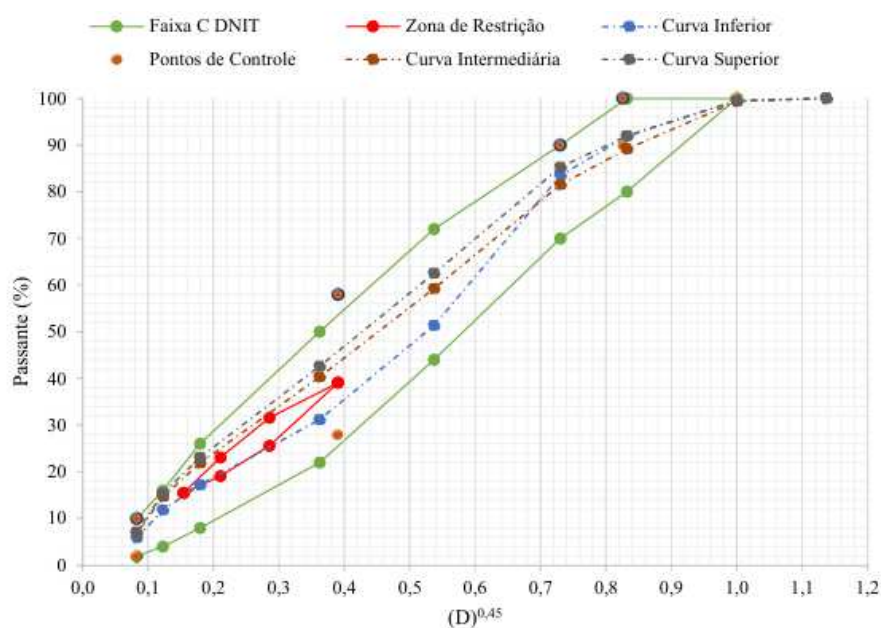
Fonte: Autor, 2025.

A norma DNIT 178/2018-PRO regulamenta que a relação pó/asfalto deve ser entre 0,6 e 1,2 e que o teor ótimo do ligante garanta estabilidade, trabalhabilidade e

durabilidade da mistura. Além disso, salienta-se que para a validação da dosagem são realizados ensaios mecânicos e volumétricos, etapa fundamental para garantia do desempenho da camada de rolamento diante das condições ambientais e da ação do tráfego.

Para a dosagem Superpave foi definido que o nível de tráfego a ser considerado na metodologia foi de médio para alto. Logo, foram escolhidas três disposições granulométricas diferentes e plotadas na Figura 21, juntamente com os limites da faixa C, sugerido pelo DNIT 031/2006, como também a zona de restrição.

Figura 21: Curva inferior, intermediária e superior.



Ainda observando a Figura 21, pode ver a disposição granulométrica das faixas inferior, intermediária e superior. Junto a isso, ainda pode-se analisar que a curva inferior se encaixa nos limites da faixa C do DNIT, como também enquadrando-se dentro das exigências da metodologia Superpave. Com o intuito de melhor visualização, em termos numéricos, a Tabela 3 apresenta a proporção dos materiais da dosagem para as curvas inferior, intermediária e superior.

Tabela 3: Curvas da metodologia da dosagem.

CURVA	MATERIAL			
	BRITA 19 mm (%)	Brita 12.5 mm (%)	Pó de Pedra (%)	Fíler (%)
Inferior	11	50	36	3
Intermediária	15	34	48	3
Superior	11	35	51	3

Dentro desse contexto, é realizado ao cálculo de teor de ligante inicial para cada uma das curvas, sendo determinado pelo método proposto por Bernucci (2022), a qual considera as propriedades físicas dos agregados como massa específica real, aparente, absorção e distribuição granulométrica. Desse modo, de início foi feito o cálculo da massa específica dos agregados assumindo absorção máxima dos ligantes pelos vazios. Na sequência, determinou-se o volume do ligante absorvido e volume de ligante efetivo, sendo o segundo estimado com base no tamanho máximo nominal da mistura. Através desses valores obteve-se a massa total dos agregados, e por fim, o teor ótimo de ligante inicial para cada curva (Tabela 4), conforme a equação que relaciona os volumes e as massas dos componentes.

Tabela 4: Tentativa inicial para teor de ligante.

<b>Parâmetros</b>	<b>Inferior</b>	<b>Intermediária</b>	<b>Superior</b>
<b>Massa específica</b>	2,61	2,6	2,6
<b>Volume de ligante absorvido</b>	0,0002368	0,0021320	0,00018203
<b>Volume de ligante efetivo</b>	0,100584899	0,10058499	0,100584899
<b>Massa de agregado</b>	2,208	2,203	2,20
<b>Teor de ligante inicial (%)</b>	4,45	4,46	4,46
<b>MÉDIA</b>	4,5		

Os parâmetros volumétricos foram calculados para diferentes teores de ligante com o intuito de atender aos critérios estabelecidos pela metodologia Superpave, dando enfoque para o número de vazios de 4%. Embora o teor inicial de 4,5% tenha sido adotado como referência, tornou-se perceptível a necessidade de ajustes, uma vez que os parâmetros obtidos, como Vv, VAM, RBV e P/A não atenderam simultaneamente aos requisitos normativos. Deste modo, a avaliação com teores superiores (Tabela 5) permitiu a identificação do teor de ligante e da curva granulométrica mais adequada, garantindo o desempenho e a estabilidade da mistura.

Tabela 5: Diferentes teores de ligante

<b>Teor de ligante</b>	<b>%Gmm @N<sub>projeto</sub></b>	<b>VAM (%)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>RBV (%)</b>
4,7	105,07	15,98	4,83	59,8
4,8	104,39	15,43	4,2	72,75
4,9	104,25	15,74	3,56	74,19
<b>Critérios Superpave</b>		≥13	4	64 - 75%

Deste modo, o teor ótimo de ligante das misturas com 2% e 3% de  $\text{TiO}_2$  definiu-se com base no valor obtido para a mistura de referência, igual a 4,8%. Para a mistura contendo 2% de  $\text{TiO}_2$ , foram testados diferentes teores (4,7%, 4,8% e 4,9%), e embora nenhum atingisse exatamente 4% de vazios, a estimativa por linha de tendencia indicou que 4,83%, valor próximo a 4,8%, que foi adotado por conveniência e precisão. Para a mistura com 3% de  $\text{TiO}_2$ , o teor de 4,8% veio a apresentar parâmetros volumétricos dentro dos critérios Superpave, podendo considerar também como teor ótimo.

Tabela 6: Teor ótimo de ligante.

Mistura	Teor de ligante ótimo (%)	Teor de ligante adotado (%)
Referência	4,81	4,8
2% $\text{TiO}_2$	4,83	
3% $\text{TiO}_2$	4,8	

Por fim, salienta-se que o  $\text{TiO}_2$  entrará na mistura com diferentes percentuais (2% e 3%), substituindo a cal de forma parcial ou total, conforme apresentado na Tabela 7. Neste contexto, é importante enfatizar que devido a literatura apresentar alguns estudos utilizando o dióxido de titânio como modificador do ligante, corroborou para que neste estudo, o  $\text{TiO}_2$  fosse incorporado à mistura como o material fino, o fíler da mistura, devido uma certa carência dessa forma de incorporação na literatura.

Tabela 7: Dosagem da mistura asfáltica.

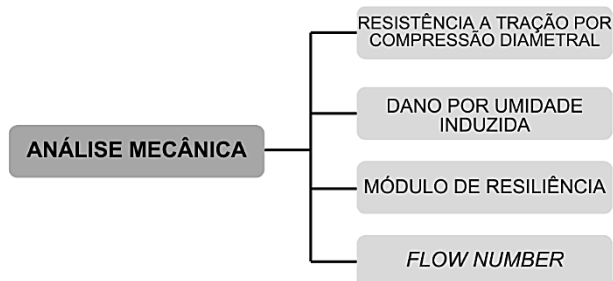
CURVA	MATERIAL				
	BRITA 19 mm (%)	Brita 12.5 mm (%)	Pó de Pedra (%)	Cal (%)	$\text{TiO}_2$
Referência (curva inferior)	11	50	36	3	0
2% $\text{TiO}_2$				1	2
3% $\text{TiO}_2$				0	3

### 3.4 Avaliação mecânica

O procedimento da avaliação mecânica de uma mistura asfáltica é feito através de alguns processos experimentais, ou seja, através de alguns ensaios de

laboratório. Dito isto, o fluxograma da Figura 22 apresenta os ensaios a serem realizados.

Figura 22: Fluxograma da avaliação mecânica.



Fonte: Autor, 2025.

### 3.4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Regido pela norma DNIT 136/2018-ME, o ensaio de resistência a tração por compressão diametral tem como objetivo realizar a determinação da resistência à tração indireta de corpos de prova no formato cilíndrico. Logo, este método consiste na aplicação de cargas de compressão ao longo do diâmetro vertical do corpo de prova, induzindo tensão de tração no plano diametral horizontal até que ocorra a ruptura do corpo de prova.

Inicialmente, são aferidas as dimensões dos corpos de prova com paquímetro, obtendo assim valores médios de diâmetro e de altura. Os corpos de prova necessitam permanecerem temperatura ambiente por no mínimo 4 horas antecedentes ao ensaio, garantindo assim o equilíbrio térmico. Na sequência, cada corpo de prova utilizado deve ser posicionado entre os dois frisos do dispositivo de carregamento, centrados, e os pratos da prensa são ajustados para manter uma leve compressão e estabilidade do corpo de prova (Figura 23).

Figura 23: Equipamento para ensaio de RT.



Fonte: Autor, 2025.

A carga é aplicada verticalmente de forma contínua e crescente, com velocidade de deformação controlada, até que ocorra a ruptura completa do corpo de prova, o separando em duas metades ao longo de um plano vertical, o valor da carga máxima aplicada deve ser registrado, permitindo assim a realização do cálculo da resistência à tração indireta da mistura asfáltica.

### **3.4.2 Dano por Umidade Induzida**

Regido pela norma DNIT 180/2018 – ME, o ensaio de Dano por Umidade Induzida objetiva realizar uma avaliação da resistência de uma determinada mistura asfáltica frente ao dano provocado pela ação da água, de forma especial quanto à adesividade existente entre os agregados e o ligante. Dito isto, essa metodologia consiste na comparação da resistência à tração indireta de corpos de prova condicionados a umidade e corpos de prova não condicionados, permitindo assim a verificação da influência da umidade na coesão interna da mistura asfáltica.

O procedimento do ensaio consiste basicamente na moldagem de sei corpos de prova cilíndricos, com teor de vazios definidos por norma, dividido em dois grupos. No primeiro grupo, os corpos de provas são submetidos a saturação por vácuo com água, sequenciado por um congelamento de 16 horas, a uma temperatura de no mínimo  $-18^{\circ}\text{C}$ , e posteriormente a imersão são aquecidos a banho-maria a uma temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 horas. Os corpos de prova do segundo

grupo, por sua vez, são mantidos a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C), sem que ocorra exposição a umidade.

Os dois grupos de corpos de provas (condicionados e não condicionados), são submetidos a um ensaio de resistência à tração por compressão diametral de acordo com a norma DNIT 136/2018-ME. Através dos ensaios de RT, calcula-se a Razão de Resistência a Tração Retida (RRT), obtendo-se pela razão entre a resistência dos corpos de prova condicionados e dos não condicionados, multiplicada por 100 para que o resultado seja em porcentagem. Desta forma, salienta-se que essa razão indica a perda de desempenho da mistura devido à ação da umidade, geralmente são aceitáveis valores de no mínimo 70% para misturas asfálticas bem projetadas.

$$RRT (\%) = \frac{RT_{condicionado}}{RT_{não\ condicionado}} \times 100$$

### 3.4.3 Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência de misturas asfálticas é regido pela norma DNIT 135/2018-ME, fazendo uso do método de compressão diametral com carga repetida a uma temperatura de 25°C. Dito isso, esse ensaio tem como objetivo de avaliar a capacidade de recuperação elástica do material após a aplicação de esforços repetitivos, tornando-se possível determinar o módulo de resiliência (MR) e o coeficiente de Poisson, parâmetro necessários para caracterização da resposta mecânica da mistura.

Para a execução do ensaio, são executados corpos de prova em laboratório, com dimensões padrões de norma. São coletadas ao menos quatro medidas das dimensões de cada corpo de prova, sendo utilizado da média para os cálculos. Após a compactação, os corpos de prova são armazenados por 24h, e posteriormente condicionados termicamente por aproximadamente 4 horas antes do ensaio, mantendo-se uma temperatura de ensaio de aproximadamente 25°C.

Anteriormente ao ensaio de MR, é realizado o ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral, de acordo com a norma, em no mínimo três corpos de

prova. A partir do valor de carga obtido no ensaio de RT, é definida a carga de ensaio do MR, sendo de 10% da carga de ruptura.

Os corpos de provas são posicionados no equipamento (Figura 24), alinhados entre os frisos de carga e com os sensores LVDT fixados para a medição de deslocamento. Inicia-se com ciclos de pré-condicionamento, posteriormente aplicam-se ciclos de carga, com registro de força e deslocamento registrados em software. Prosseguindo vai se aumentando a carga para próximos ciclos. Através dos dados obtidos, pode-se determinar o módulo instantâneo, módulo total e o coeficiente Poisson, utilizando valores médios para análise de resultado.

Figura 24: UTM para o ensaio de Módulo de Resiliência.



Fonte: Autor, 2025.

### 3.4.4 Flow Number

Regido pelas diretrizes da ABNT NBR 16505:2016 e DNIT 184/2018-ME, o ensaio de *Flow Number* tem sido bastante utilizado para estudos de durabilidade e estabilidade de pavimentos. Dito isto, o ensaio consiste na aplicação de cargas repetidas com o intuito de simular o tráfego em campo. O *Flow Number* é amplamente utilizado para realizar a avaliação de resistência a deformação permanente de misturas asfálticas, considerado eficaz devido o emprego de pulsos de carga intercalados com períodos de repouso, reproduzindo situações reais de carregamento.

Inicialmente são moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões definidas por norma. Após isso, os corpos de prova são condicionados em uma

câmara térmica de  $60,0 \pm 5^\circ\text{C}$ , no mínimo por três horas antecedentes ao ensaio, com o objetivo de garantir a uniformidade térmica. Na sequência o corpo de prova é colocado na máquina de ensaio (figura 25), onde são instalados sensores de LVDT responsáveis pela medição da deformação axial acumulada durante o teste. Com a temperatura estabilizada, ocorre o pré-carregamento com a aplicação de uma carga estática de  $10,2 \pm 05 \text{ kPa}$  durante 60 segundos.

Figura 25: AMPT para ensaio de *Flow Number*.



Fonte: Autor, 2025.

O carregamento cíclico é iniciado, composto por pulsos de carga (tipo Haversine) com a duração de 0,1 segundo, seguido de 0,9 segundos de repouso, porém mantendo a carga de contato. Salienta-se que os ciclos ocorrem repetidamente até que ocorra a ruptura ou até que se atinja o critério de falha por deformação acumulada. Ao final é obtido o parâmetro FN, correspondente ao número de ciclos em que a taxa de carregamento atinge seu ponto mínimo, mascarando o início da falha por fluência acelerada. O valor de FN é utilizado como um indicador de estabilidade da mistura diante de carregamentos repetitivos.

### 3.5 PROTOCOLO DE ENVENLHECIMENTO

Para simulação do envelhecimento da mistura asfáltica foi seguido as diretrizes da norma AASHTO R30. Pode-se afirmar que a mistura foi condicionada por dois períodos diferentes, 2 horas e 4 horas. A priori as misturas são condicionadas em estufa por cerca de 2 horas, à temperatura de compactação, para que assim sejam moldados os corpos de prova. Concomitante a isso, outras misturas, de mesma

dosagem são condicionadas e estufa a um período de quatro horas, com temperatura aproximada de 135° a 150°.

O protocolo de envelhecimento visa reproduzir os efeitos térmicos e oxidativos sofridos pelo ligante asfáltico em campo, podendo citar a perda de compostos voláteis. Após a compactação das misturas condicionadas a 2 horas como sugerido pela metodologia *Superpave* e a 4 horas de acordo com a AASHTO R30, são resfriadas a temperatura ambiente, para assim realizar os ensaios mecânicos.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo, serão apresentados os resultados adquiridos após a realização dos ensaios definidos e apresentados na metodologia. Concomitante a isso, serão apresentadas as discussões dos resultados com o intuito de apresentar a interpretação necessária para a compreensão de cada um deles.

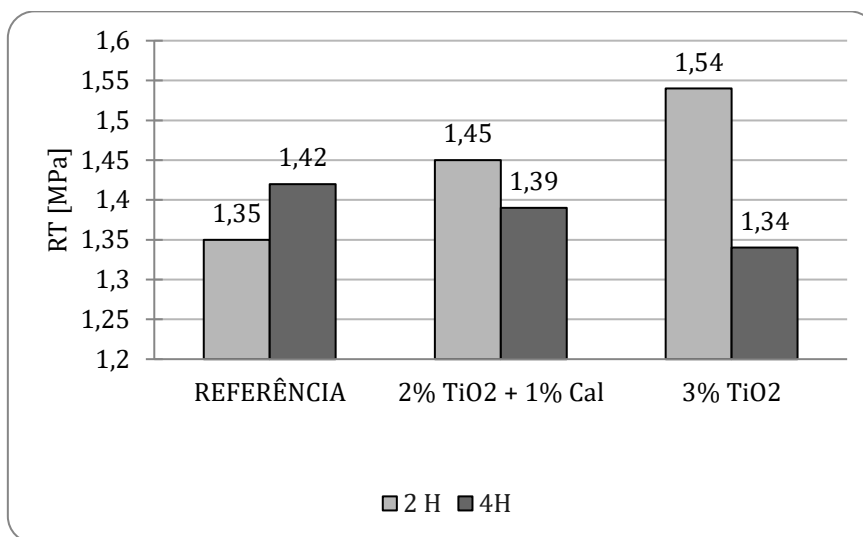
### **4.1 Avaliação mecânica**

A avaliação mecânica foi realizada a partir de ensaios descritos na metodologia e dispostos seus resultados neste capítulo. Desta forma, através dos dados obtidos e dispostos a seguir é possível verificar a influência do Dióxido de Titânio adicionado em diferentes proporções (como fíler) em misturas asfálticas, para que assim, possa justificar a utilização do material na mistura, como também, a possível melhoria mecânica a mesma.

#### **4.1.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)**

A figura 26, apresenta os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tração referente às misturas: referência, 2% de TiO<sub>2</sub> e 3% de TiO<sub>2</sub>. Ainda nesse sentido, é importante salientar que os são apresentados resultados antes do protocolo de envelhecimento (2h) e após o protocolo de envelhecimento (4h).

Figura 26: Resistência à Tração por Compressão Diametral.



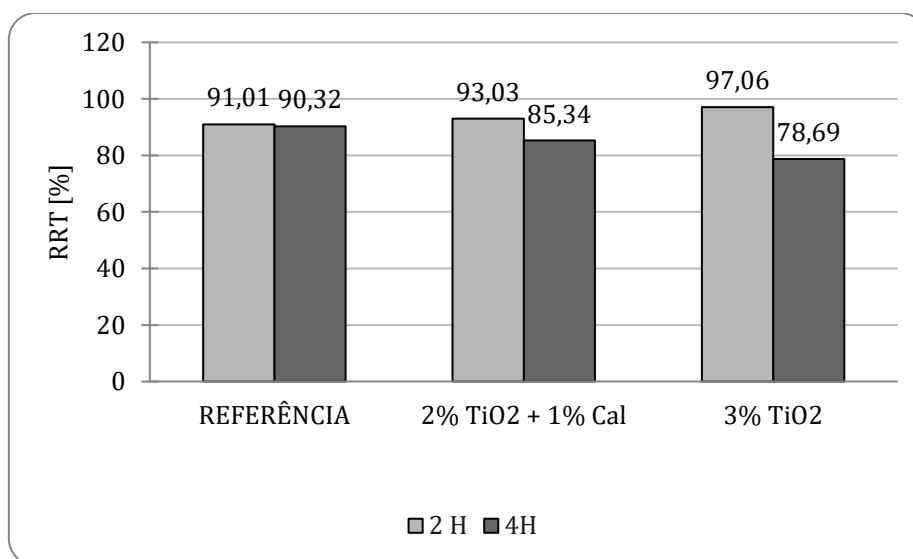
Desta forma, percebe-se que todos os valores obtidos, obtiveram valores superiores a 0,65 MPa à uma temperatura de 25°, conforme sugerido pela norma DNIT 136/2018. Concomitante a isso, percebe-se que à medida que se aumentou a porcentagem de TiO<sub>2</sub> na mistura, ocorreu um aumento na resistência à tração para a mistura com 2 horas de envelhecimento. Além disso, percebe-se também, que após o protocolo do envelhecimento, os corpos de prova obtiveram uma diminuição da resistência à tração à medida que se aumentava a quantidade de TiO<sub>2</sub> (consideravelmente pequena, se observado), contudo ainda com valores superiores aos estabelecidos pelo DNIT.

Neste sentido, pode-se afirmar que a princípio a incorporação de dióxido de titânio obteve um comportamento inicial semelhante ao encontrado por Carvalho *et al.* (2021) ao incorporar 5% de óxido metálico vermelho e amarelo a mistura asfáltica, sendo que todos os valores para RT encontrados foram superiores à média. Porém, diferentemente ao TiO<sub>2</sub>, as misturas com a adição de óxido metálicos não apresentaram valores de RT superiores a mistura de referência, comportamento visto com TiO<sub>2</sub> antes do protocolo de envelhecimento. Contudo, após o protocolo de envelhecimento, pode-se perceber que a mistura com 2% obteve uma ligeira diminuição no valor de RT, ao ser comparado com a mistura de 3%, o que demonstra que essa incorporação aparenta ser mais estável a longo prazo.

#### 4.1.2 Dano por Umidade Induzida

A Figura 27 apresenta os resultados obtidos para o Dano por Umidade Induzida. Nesse sentido, salienta-se que tanto as misturas com a adição de  $TiO_2$  como a de referência obtiveram valores superiores a 70%, como sugerido pelo DNIT 180/2018 - ME. Contudo, quando observado o valor mínimo sugerido pela metodologia Superpave (80%) a mistura de referência e a com adição de 2% de  $TiO_2$  obtiveram resultados superiores, enquanto a com 3% de  $TiO_2$  obteve um resultado inferior de RRT após o protocolo de envelhecimento, sendo de 78,69%.

Figura 27: Dano por Umidade Induzida.



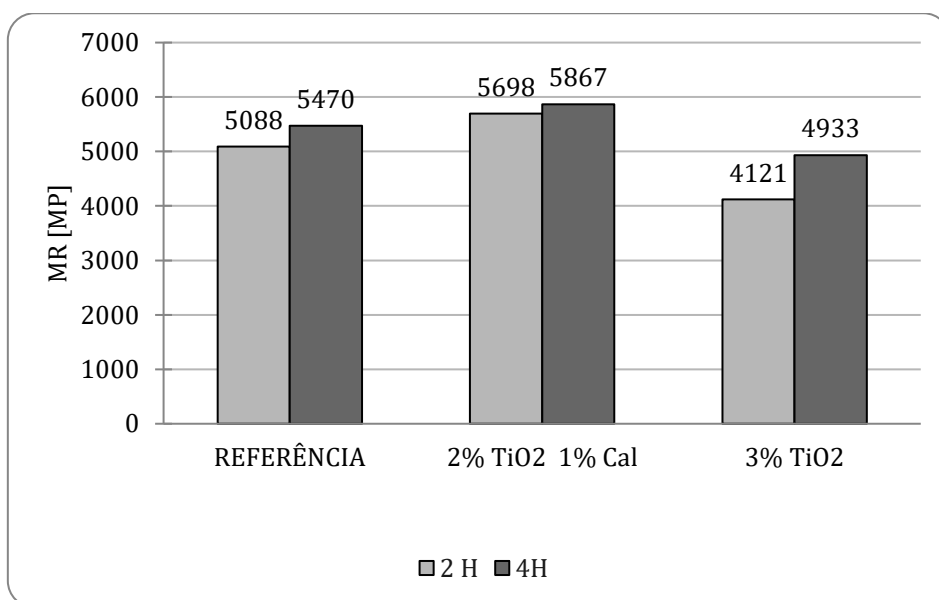
Ainda fazendo uma análise da Figura acima, observa-se que as misturas antes do protocolo de envelhecimento obtiveram valores superiores a mistura de referência, em quando após o protocolo o comportamento tenha ocorrido de forma contrária.

Ademais, os resultados indicam que a composição mineralógica de uma mistura interfere na adesividade e na contribuição do ligante betuminoso, corroborando a afirmação de Stirb *et al.* (2021). Na análise do comportamento das misturas diante ao envelhecimento, constatou-se a redução característica da resistência ao dano por umidade, que foi de 0,76%. Esse resultado pode ser associado à elevada porcentagem de cal hidratada na sua composição (3%), a qual melhorou a adesividade entre ligante e agregados, achando que está em consonância com Singh *et al.* (2021)

### 4.1.3 Módulo de Resiliência (MR)

No que se refere ao Módulo de Resiliência, a Figura 28 mostra que as misturas com 2h obtiveram uma tendência a uma diminuição do MR com o aumento do dióxido de titânio na mistura, conforme apresentado pelas linhas de tendência no gráfico. Porém, quando analisado o MR após o protocolo de envelhecimento, os valores das misturas com adição de  $\text{TiO}_2$  obtiveram valores numericamente maiores que os da mistura de referência. Neste contexto, ainda se faz necessário compreender que inúmeros fatores podem vir a influenciar no MR, sendo alguns deles: histórico de carregamento, temperatura, por exemplo.

Figura 28: Módulo de Resiliência.

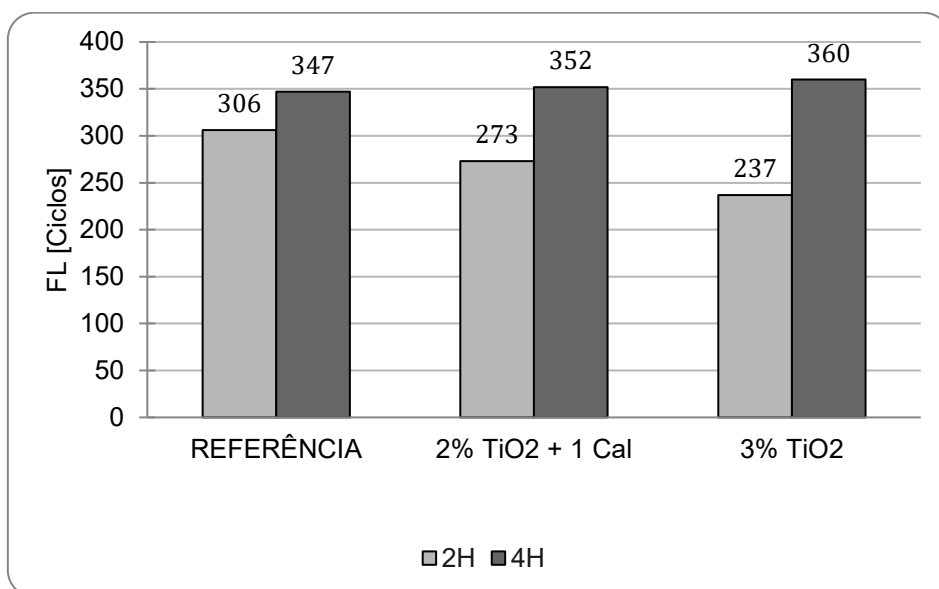


Deste modo, pode-se observar que os resultados para o módulo de resiliência apresentaram tendência semelhante ao estudo de Quintana *et al.* (2025) ao incorporar o Óxido de Zinco em misturas asfálticas como fíler. Neste sentido as misturas com adição de  $\text{ZnO}$  apresentaram um aumento de MR em curto prazo, ao serem comparadas com a mistura de referência, comportamento semelhante com a mistura com 2% de dióxido de titânio. Logo, esse aumento no MR pode indicar que o  $\text{TiO}_2$  pode contribuir para uma melhor performance mecânica ao longo tempo, algo também visto com a incorporação do  $\text{ZnO}$ .

#### 4.1.4 Flow Number (FN)

A Figura 29 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de *Flow Number*. Logo, é perceptível que antes do protocolo de envelhecimento os valores para as misturas com TiO<sub>2</sub> obtiveram valores menores quando comparados com o da mistura de referência. Contudo, após o protocolo de envelhecimento, os valores de FL foram superiores aos da mistura de referência. Neste contexto, percebe-se que quanto maior for teor de dióxido de titânio maior a redução na resistência à deformação permanente. Além disso, salienta-se que outros teores de dióxido de titânio podem vir a obter resultados mais positivos do que os obtidos neste estudo.

Figura 29: Resultados do ensaio de Flow Number



Em seu estudo, Nascimento (2014) sugeriu limites de classificação para o *Flow Number* (FN), sugerindo que as misturas asfálticas não envelhecidas com FN entre 100 e 300 são adequadas para o tráfego médio, adequando-se a classe 2 para condições normais de tráfego. Concomitante a isso, observou-se que misturas envelhecidas apresentaram FN superiores a 300, classificando-se para tráfego pesado conforme estabelecido pelo DNIT (2018). Essa classificação aplica-se a vias sem interseções, sem faixa adicional, com valores superiores a 60 km/h e temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico.

## 5.0 Considerações finais

Por meio dos ensaios laboratoriais realizados, notou-se que a incorporação do dióxido de titânio em diferentes percentuais influenciou de forma direta no desempenho mecânico das misturas asfálticas. Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, todas as composições atenderam aos requisitos sugeridos pelo DNIT 136/2018, indicando um desempenho satisfatório tanto para antes do protocolo de envelhecimento, como para após o protocolo de envelhecimento. Destaca-se que a mistura com 2% de TiO<sub>2</sub> apresentou um incremento inicial, e, mesmo após o envelhecimento, manteve-se estável e superior a mistura de 3% sugerindo assim um comportamento mais consistente a longo prazo.

No que tange o dano por umidade induzida, todas as misturas analisadas mantiveram valores superiores a 70%, estando em consonância com o DNIT 180:2018 – ME. Porém, apenas as misturas com 2% de TiO<sub>2</sub> e de referência conseguiram atingir os critérios mínimos estabelecidos pela metodologia Superpave, sugerindo uma melhor resistência à umidade após o envelhecimento. Tal comportamento pode vir a estar associado a presença da cal hidratada na composição da mistura, a qual contribuiu para a adesividade entre agregados e ligante, conforme sugerido por estudos da literatura.

Em relação ao módulo de resiliência, o comportamento também evidenciou um comportamento similar ao do dano por umidade induzida, haja vista que a mistura com 2% de TiO<sub>2</sub> apresentou, após o envelhecimento, valores superiores a mistura de referência, indicando um potencial para maior resistência às solicitações repetidas ao longo prazo.

Por fim, no ensaio de *Flow Number*, verificou-se que as misturas com adição de TiO<sub>2</sub> apresentaram menor resistência a deformação permanente em comparação com a mistura de referência. Contudo, após o protocolo de envelhecimento, essas misturas demonstraram desempenho superior, com valores que qualificam para aplicações do material, em vias de tráfego pesado, de acordo com os critérios estabelecidos pelo DNIT. Nesse sentido, a incorporação de 2% de dióxido de titânio representa uma solução promissora para o aprimoramento das propriedades mecânicas e da durabilidade de misturas asfálticas. Recomenda-se, no entanto, a

continuidade de estudos com diferentes teores e em diferentes condições de carregamento e temperatura, a fim de aprofundar a compreensão dos efeitos do TiO<sub>2</sub> sobre o comportamento do material ao longo prazo.

## 6.0 Sugestões para pesquisas futuras

- Avaliação térmica de misturas asfálticas com adição de Dióxido de Titânio.
- Incorporação do Dióxido de Titânio em misturas asfálticas com outros teores
- Incorporação de diferentes óxidos em misturas asfálticas

## Referencias

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Caracterização reológica de ligantes asfálticos com vistas à seleção de materiais e ao controle de qualidade. Brasília: ANTT, 2021.

AGUIAR, JL Barroso de; SS, Lucas. Revestimento de parede multifuncional que combina fotocatalise, autolimpeza e armazenamento de calor latente. *Materials Research Express* (2018). DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaa82f>

Albuquerque, D. D. M. ANDRADE NETO, J.S. AMORIM JUNIOR, N. S. de. RIBEIRO, D. V. Propriedades das argamassas de revestimento contendo resíduo proveniente da produção do TiO<sub>2</sub> (MNR). *Cerâmicas* 65 (2019). DOI: 10.1590/0366-69132019653752562

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO R 30-02: Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, D.C., 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1252: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). United States, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1252: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). United States, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. United States, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. United States, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2419: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. United States, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4791: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. United States, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5421-13: Standard Practice for Shigometer Testing of Live Trees. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1131: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E794: Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT 178:2018 – PRO: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15235: Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Brasil: [s.n.], 2009. ISBN: 978-85-07-01443-0

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16408:2015 — Misturas asfálticas — Determinação da adesividade de ligantes asfálticos a agregados. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da temperatura de amolecimento – Método do anel e bola. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15511: Cimento asfáltico de petróleo – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16162: Agregados reciclados para uso em concreto não estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16505: Cimento asfáltico de petróleo (CAP) modificado por polímero – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BALBO, José Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 04 mar. 2025.

BATISTA, Kenia Barros. Desenvolvimento de ligantes asfálticos modificados com lignina como aditivo antienvelhecimento. Tese de doutorado (Universidade Federal de Minas Gerais), 2017.

BERGAMASCO, Rosangela. COLDEBELLA, Priscila Ferri. CAMACHO, Franciele Pereira. REZENDE, Driano. YAMAGUCHI, Natalia Ueda. KLEN, Márcia Regina Fagundes. TAVARES, Carlos José Macedo. AMORIM, Maria Teresa Sousa Pessoa. Self-assembly modification of polyamide membrane by coating titanium dioxide nanoparticles for water treatment applications. ISSN (2019). DOI: 10.4136/ambiente.2297

Bernucci, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2ª edição, 2022. 750 p.: il. ISBN: 978-85-69658-02-3.

BERNUCCI, L.B; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS. RIO DE JANEIRO, 2008.

CARNEIRO, Mariana Souza. Seleção do ligante asfáltico em função do clima e do tráfego da região de aplicação – estudo de caso: Rio de Janeiro. 2015. 70 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015

CARVALHO, Flávia do Socorro de Sousa; LUCENA, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes; MELO NETO, Osires de Medeiros; PORTO, Tassila Ramos; PORTO, Thalita Maria Ramos. Análise dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas com adição de óxidos metálicos. Revista Matéria, v. 26, n.03, 2021.ISSN 1517-7076. DOI:<https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13020>.

COUTO, Allyson Henrique Mendes Fróes. Dióxido de titânio: propriedades, características e aplicações. 2015. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Tecnológica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 135:2018 – ME: Ligantes asfálticos – Determinação da viscosidade cinemática. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 136:2018 – ME: Ligantes asfálticos – Determinação da viscosidade absoluta. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 155/2010 – ME: Emulsão asfáltica: determinação da estabilidade ao armazenamento. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 180:2018 – ME: Ligantes asfálticos – Ensaio de ponto de fulgor em vaso aberto – Método Cleveland. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 184/2018 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 423/2020 – ME: Ligantes asfálticos – Ensaio de recuperação elástica. Rio de Janeiro: DNIT, 2020.

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

DNIT 131/2010-ME. Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola.

DNIT 155/2010-ME. Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio.

DNIT. Manual de Pavimentação. 3ª ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

FERNANDEZ, C. N. Estudo sobre a incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio em argamassas fotocatalíticas. 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017

GUALBERTO FILHO, A. L.; RAMALHO NETA, D. de S. .; COSTA, D. B.; LIMA, G. F. de; BATISTA, L. S.; OLIVEIRA, N. K. A. de. Comparative analysis of the rheological properties of asphalt binders modified by the addition of micronized ethylene polytereftalate and grinded tire rubber. Research, Society and Development, v. 9, n. 9, p. e919996223, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i9.6223.

HEIDER, Mathias. Contexto histórico e potencialidades do titânio no Brasil. Revista In The Mine, [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.inthemine.com.br/site/contexto-historico-e-potencialidades-do-titanio-no-brasil/>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13320:2020 – Particle size analysis – Laser diffraction methods. Geneva: ISO, 2020.

LOPES, Janile Quaresma; CARDEAL, Raphael Alves; ARAÚJO, Rinaldo dos Santos; ASSUNÇÃO, João Carlos da Costa; SALGADO, Bruno César Barroso. Aplicação do dióxido de titânio como fotocatalisador na degradação do diuron: avaliação das variáveis operacionais e estudo mecanístico. Eng Sanit Ambient, V.26, n.1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190092>

LUCENA, Lêda Christiane de F. Lopes. SILVEIRA, Icarly Vanderlei da. COSTA, Daniel Beserra da. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. REVISTA MATÉRIA, v.21, 2016. DOI:10.1590/S1517-707620160001.0007

MADDAH, Alefeh. DANESH, Hiva. GHASEMI, Parvin. ZIAMAJIDI, Nasrin. SALEHZADEH, Maryam. ABBASALIPOURKABIR, Roghayeh. The Effect of Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Nanoparticles on Oxidative Stress Status in the HCT116 Human Colon Cancer Cell Line. BioNanoScience (2023). DOI: 10.1007/s12668-023-01103-3

MAIA, Marcos Aurélio de Oliveira. CARACTERIZAÇÃO DA ILMENITA COMO FONTE DE OBTENÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO. Dissertação de mestrado, UFRN. 2018

MARINHO FILHO, P. G. T. Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio. 2017. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

MARINHO FILHO, Paulo Gemano Tavares. Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande. 2017.

MENDONÇA FILHO, José Moacir. Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do conhecimento. 2018. ISSN: [2448-0959](https://doi.org/10.2448/0959).

MORAES, Thalita Maria Ramos Porto de; LUCENA, Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes; MELO NETO, Osires de Medeiros; PORTO, Tássila Ramos; COSTA, Daniel Beserra; CARVALHO, Flávia do Socorro de Sousa. Efeitos do uso da cera de

carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de mistura e compactação no desempenho mecânico de misturas asfálticas. *Revista Matéria*, v.27, n.04, 2022. ISSN 1517-7076. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0192>

MORAIS, Lucia Castanheira de; SEER, Hildor José. Titânio. Recursos Minerais de Minas Gerais, 2021.

MOREIRA, Ailton Jose. Maldi, Caroline Piza. Freschi, Gian Paulo Giovanni. Aplicação de processo fotocatalítico mediado por dióxido de titânio para degradação de Sertralina. *Acta Brasiliensis* (2019). DOI: 10.22571/2526-4338117

NASCIMENTO, T. C. B.; FAXINA, A. L. Avaliação dos efeitos da radiação ultravioleta sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com PPA e copolímeros SBS e SBR. *Transportes*, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 73–81, 2017. DOI: 10.14295/transportes.v25i1.1100

NUNES, C. G. L.; PEREIRA, P. H. DOS S.; MELO, R. A. DE; RODRIGUES, J. K. G.; LUCENA, L. C. DE F. L. Influence of unserviceable tiresâ€™™ rubber on the mechanical performance of hot mix asphalt. *Revista ALCONPAT*, v. 12, n. 3, p. 362 - 377, 1 Sep. 2022. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.575>

OLIVEIRA, Elizabeth Mendes de. CASTRO, José Adilson de. SILVA, Leonardo Martins. OLIVEIRA, Fabiano Alves de. ALMEIDA, Darlene Souza da silva. Avaliação das interações das nanopartículas de dióxido de titânio em solos de aterro controlado contaminados por óxido de cobre. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.* V 15, n 3, p. 327-332 (julho/setembro de 2018). DOI: 10.4322/2176-1523.01401

OLIVEIRA, Michele Augusto de; FERNANDES, Rafael Costa Paixão; PACHECO, Ronaldo Feu Rosa. Análise comparativa de custos entre pavimentos rígidos e flexíveis. *Concreto e construções*, ed. 113, 2024. DOI <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2024.113.0003>.

PEREIRA, A. G. .; SILVA, R. L. da .; VIEIRA, C. da S. . Modified asphalt binders: A bibliographic analysis. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 4, p. e35710414321, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.14321

QUINTANA, Hugo Alexandre Rodón; RUBIANO, Karem Tatiana Ferero; AGUDELO, Yohan Sebastián Valderrama; MARTINEZ, Juan Gabirel Bastidas. Óxido de zinco como carga em asfalto de mistura a quente: impacto nas propriedades mecânicas. *Infraestruturas*, v.10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures10050110>

SERRA, Gleyciane Almeida; GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues; SILVEIRA, Virlene Leite; BARROS, Ayrton Mendes dos Santos; REIS, Ana Carolina da Cruz. Estudo da adição de resíduos de polietileno tereftalato (PET) como agregado alternativo para misturas asfálticas. 32° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Gramado, 2018.

SILVA, Fabrício Madeira da; ANHOLETTI, Maxsuel; AMORIM JUNIOR, Joãozinho Cabral. ESTUDO DOS AFUNDAMENTOS NOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. MULTIVIX, 2018. Disponível em: <[Microsoft Word - tcc final \(multivix.edu.br\)](https://www.microsoft.com/word/tcc-final)>. Acesso em 16 de Outubro de 2024.

SINGH, D.; HABAL, A.; ASHISH, P.K; KATAWARE, A. Effect of warm mix additives and hydrated lime on viscosity and bonding–debonding behaviour of RET and PPA modified asphalt binder with aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, 24(10):2522–44, 2023. DOI:10.1080/14680629.2022.2151500

SOARES, Lucas Rafael Reis. Avaliação de misturas asfálticas modificadas com nanopartículas de Dióxido de Titânio modificadas superficialmente. TCC (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

STIRB, A.; MARC, P.; BELC, A.; BELC, F.; LUCACI, G. Influence of Natural Aggregates' Mineralogical Composition on the Adhesiveness and Affinity of Bitumen. Em: Di Benedetto H, Baaj H, Chailleux E, Tebaldi G, Sauzéat C, Mangiafico S, organizadores. Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. Cham: Springer International Publishing; p. 1095–101. 2022. (RILEM Bookseries). DOI: 10.1007/978-3-030-46455-4\_139