



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – GEOTECNIA

LUCAS RAFAEL REIS SOARES

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM  
NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO MODIFICADAS  
SUPERFICIALMENTE**

Campina Grande – Paraíba

2018

**LUCAS RAFAEL REIS SOARES**

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM  
NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO MODIFICADAS  
SUPERFICIALMENTE**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande sob a orientação da Professora Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena.

Campina Grande – Paraíba

2018

**LUCAS RAFAEL REIS SOARES**

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM  
NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITÂNIO MODIFICADAS  
SUPERFICIALMENTE**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande sob a orientação da Professora Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena.

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em: 18/12/2018.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Coorientador: Prof. Me. Paulo Germano Tavares Marinho Filho  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

---

Examinador Interno: Prof. Marco Aurélio de Teixeira e Lima  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Examinador Externo: Eng. Esp. Valter Ferreira de Sousa Neto  
Instituto de Pós-graduação e Graduação – IPOG

## AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida, família e amigos.

Aos meus pais, Luiz Soares e Maria Noemia, que são meu orgulho e meu exemplo. Obrigado por todo o esforço, dedicação, educação e amor incondicional. O apoio de vocês possibilitou não somente esta, mas todas as conquistas alcançadas em minha vida. Amo muito vocês.

À Gabriella Castro, pelo amor, incentivo, força e carinho. O seu apoio em momentos de dificuldade tornou essa vitória possível.

À minha orientadora, professora Lêda Christiane, pela paciência, disponibilidade e incentivo não somente no desenvolvimento deste trabalho, mas durante toda minha graduação. Obrigado pelas valiosas oportunidades e pelo grande aprendizado.

Ao meu coorientador, professor Paulo Marinho, pelo suporte irrestrito no pouco tempo que dispunha, por toda ajuda e dedicação.

Aos amigos Daniel, Conrado e Christian, pela grandiosa ajuda na execução dos ensaios laboratoriais e análise dos resultados, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

A toda a equipe do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG, em especial aos técnicos Jadilson e Joseildo, pela amizade e ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos Túlio Freire e Luan Talles, pela amizade verdadeira e apoio na execução dos ensaios.

A Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da UFCG, todos os professores e funcionários, pelo conhecimento e dedicação em todos esses anos de formação.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

A malha rodoviária brasileira é composta em sua maioria por pavimentos asfálticos que devem suportar as variações climáticas e as solicitações impostas pelo tráfego de veículos. Atualmente tem-se pesquisado o aumento da vida útil dos pavimentos, evitando a deterioração prematura e, conseqüentemente, os elevados custos de restauração. Neste cenário, tem-se destacado a utilização de nanotecnologia, devido a capacidade de melhorar as características dos ligantes asfálticos. O dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) apresenta-se como uma alternativa de nanomaterial para modificação de ligantes asfálticos, alcançando bons resultados em pesquisas recentes, como o aumento da resistência à deformação permanente e ao surgimento de trincas por fadiga em revestimentos asfálticos. Esta pesquisa tem por objetivo avaliar os efeitos da adição de nanopartículas de dióxido de titânio nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. As nanopartículas foram modificadas superficialmente por oleilamina ( $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$ ) e incorporadas ao CAP 50/70 no teor de 3%. A modificação de superfície teve por objetivo reduzir a energia superficial das nanopartículas, reduzindo a tendência de aglomeração e, conseqüentemente, obter melhor dispersão das nanopartículas no ligante asfáltico. Para avaliar o comportamento mecânico das misturas, foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, estabilidade Marshall, módulo de resiliência, módulo dinâmico, *flow number* e fadiga à tensão controlada. Os resultados indicam que a mistura modificada com nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  apresentou maior resistência à deformação permanente e vida de fadiga quando comparada a mistura convencional.

Palavras-chave: Misturas asfálticas, modificação superficial, nanomateriais, propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

The Brazilian road network consists mostly of asphalt pavements which must withstand the climatic variations and the demands imposed by vehicular traffic. At present research has been carried out to increase the useful life of the pavements, avoiding premature deterioration and, consequently, high restoration costs. In this scenario, the use of nanotechnology has been highlighted due to the ability to improve the characteristics of asphalt pavement. Titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) presents an alternative of nanomaterial for modifying asphaltic binders, achieving good results in recent research, such as the increase of resistance to permanent deformation and the appearance of fatigue cracking in asphalt mixtures. This research aims to evaluate the effects of incorporation of titanium dioxide nanoparticles in the mechanical properties of asphalt mixtures. The nanoparticles were surface modified by oleylamine ( $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$ ) and incorporated into CAP 50/70 at concentration of 3% of weight. The surface modification was aimed at reducing the surface energy of the nanoparticles, reducing the tendency of agglomeration and, consequently, obtaining better dispersion of the nanoparticles in the asphalt binder. In order to evaluate the mechanical behavior of the mixtures, tests were performed to determine tensile strength, Marshall stability, resilience modulus, dynamic modulus, flow number and controlled stress fatigue. The results indicated that the modified mixture with  $\text{TiO}_2$  nanoparticles presented greater resistance to permanent deformation and fatigue life when compared to the conventional mixture.

Keywords: Asphalt mixtures, surface modification, nanomaterials, Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fracionamento do ligante asfáltico pelo método SARA.....	18
Figura 2 – Estrutura molecular do dióxido de titânio nas formas de (a) anatase, (b) rutilo e (c) bruquita.....	23
Figura 3 – Diferentes granulometrias para misturas asfálticas.....	27
Figura 4 – Etapas desenvolvidas na pesquisa.....	30
Figura 5 – Agregados graúdos: (a) Brita 19mm; (b) Brita 9,5 mm.....	31
Figura 6 – Agregados miúdos e filer: (a) Pó de pedra; (b) Areia; (c) Cal hidratada.....	31
Figura 7 – Dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> ).....	32
Figura 8 – (a) Oleilamina e (b) Hexano.....	33
Figura 9 – Procedimento de agitação magnética das nanopartículas.....	34
Figura 10 – Procedimento de centrifugação das nanopartículas.....	34
Figura 11 – Misturador mecânico FISATOM.....	35
Figura 12 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	38
Figura 13 – Curva Fuller intermediária.....	39
Figura 14 – Etapas da compactação das misturas avaliadas.....	39
Figura 15 – Determinação da massa específica aparente.....	40
Figura 16 - Execução do Rice Test.....	41
Figura 17 – V <sub>v</sub> x Teor de ligante.....	42
Figura 18 – Execução do ensaio de estabilidade Marshall.....	43
Figura 19 – Aspecto do corpo de prova após a ruptura.....	43
Figura 20 – Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	44
Figura 21 – Aspecto do corpo de prova após o ensaio de RT.....	44
Figura 22 – Execução do ensaio de módulo de resiliência.....	46
Figura 23 – Esquema do carregamento no ensaio de módulo dinâmico.....	47
Figura 24 – Execução do ensaio de módulo dinâmico.....	48
Figura 25 – Realização do ensaio de <i>Flow Number</i> .....	48
Figura 26 – Exemplo de curva de fadiga.....	50
Figura 27 – Execução do ensaio de fadiga por compressão diametral.....	50
Figura 28 – Resultados do ensaio de estabilidade Marshall.....	51
Figura 29 – Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	52
Figura 30 – Módulo de resiliência das misturas a 25°C.....	53
Figura 31 – Curva mestra da mistura com CAP 50/70 puro.....	54

Figura 32 – Curva mestra da mistura com ligante modificado com 3% de TiO <sub>2</sub> .....	54
Figura 33 – Curvas mestras das misturas avaliadas. ....	55
Figura 34 – Módulo dinâmico (4°C). ....	56
Figura 35 – Módulo dinâmico (21°C). ....	56
Figura 36 – Módulo dinâmico (37°C). ....	56
Figura 37 – Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (4°C).....	57
Figura 38 – Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (21°C).....	57
Figura 39 – Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (37°C).....	58
Figura 40 – Resultado do ensaio de <i>Flow Number</i> .....	59
Figura 41 – Número de aplicações de carga (N) x Diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ). ....	62
Figura 42 – Número de aplicações de carga (N) x Deformação específica resiliente ( $\epsilon_i$ ). ....	62



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de giros em função do tráfego. ....	29
Tabela 2 – Caracterização do nanoTiO <sub>2</sub> fornecida pela empresa InterBrasil. ....	32
Tabela 3 – Ensaio de caracterização do cimento asfáltico de petróleo. ....	35
Tabela 4 – Resultados da caracterização dos ligantes asfálticos. ....	36
Tabela 5 – Resultados da caracterização dos agregados ....	37
Tabela 6 – Proporção dos agregados obtida por meio da composição granulométrica dos agregados. ....	39
Tabela 7 – Parâmetros volumétricos para a mistura com teor ótimo de ligante puro. ....	42
Tabela 8 – Valores mínimos de <i>Flow Number</i> recomendados para diferentes níveis de tráfego. ....	59
Tabela 9 – Resumo dos resultados de fadiga para o CAP 50/70. ....	60
Tabela 10 – Resumo dos resultados de fadiga para o CAP 50/70 + 3% TiO <sub>2</sub> . ....	60
Tabela 11 – Resumo das características das curvas de vida de fadiga. ....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Tester</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Material</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador giratório Superpave
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CPA	Camada porosa de atrito
CPs	Corpos de prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	<i>Flow Number</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MD	Módulo Dinâmico
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
RT	Resistência à tração por compressão diametral
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Program</i>
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
VAM	Vazios no agregado mineral
VV	Volume de vazios

## LISTA DE SÍMBOLOS

$ E^* $	Módulo dinâmico
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celcius
cm	Centímetro
cP	Centipoise
D	Diâmetro do corpo de prova
g	Gramma
$G_{mb}$	Massa específica aparente medida
$G_{mm}$	Densidade máxima medida
H	Altura do corpo de prova
Hz	Hertz
$k_1, k_2, k_3, k_4$	Parâmetros determinados no ensaio de fadiga
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma-força
Km	Quilômetro
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
$M_s$	Massa seca do corpo de prova
$M_{ss}$	Massa do corpo de prova com a superfície seca
$M_{sub}$	Massa submersa do corpo de prova
$N_{projeto}$	Número de giros de projeto no compactador Superpave
P/A	Proporção pó/asfalto
Pa	Pascal
rpm	Rotação por minuto
SBS	Estireno-Buadieno-Estireno
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões no centro do corpo de prova
$\epsilon_i$	Deformação resiliente específica

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa .....	15
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo geral .....	16
1.2.2 Objetivos específicos .....	16
1.3 Organização do trabalho .....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1 Ligantes asfálticos .....	17
2.2 Principais defeitos em pavimentos flexíveis .....	18
2.3 Ligantes asfálticos modificados .....	20
2.4 Nanotecnologia .....	21
2.5 Dióxido de titânio .....	22
2.6 Modificação superficial de nanopartículas .....	24
2.7 Misturas asfálticas .....	25
2.8 Dosagem de misturas asfálticas .....	27
2.8.1 Dosagem Superpave .....	28
3.1 Materiais .....	31
3.1.1 Ligante asfáltico .....	31
3.1.2 Agregados.....	31
3.1.3 Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> .....	32
3.1.4 Modificador de superfície.....	33
3.2 Métodos .....	33
3.2.1 Modificação superficial das nanopartículas de TiO <sub>2</sub> .....	33
3.2.2 Procedimento de mistura .....	34
3.2.3 Caracterização dos ligantes asfálticos .....	35
3.2.4 Caracterização dos agregados.....	37

3.2.5 Dosagem Superpave .....	38
3.2.6 Determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas .....	42
3.2.6.1 Estabilidade Marshall .....	43
3.2.6.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT) .....	44
3.2.6.3 Módulo de resiliência (MR) .....	45
3.2.6.4 Módulo dinâmico (MD) .....	46
3.2.6.5 <i>Flow Number</i> (FN) .....	48
3.2.6.6 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada .....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	51
4.1 Estabilidade Marshall .....	51
4.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT) .....	52
4.3 Módulo de resiliência (MR) .....	53
4.4 Módulo dinâmico (MD) .....	54
4.5 <i>Flow Number</i> (FN) .....	58
4.6 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada .....	60
5 CONCLUSÕES .....	63
5.1 Considerações finais .....	64
5.2 Sugestões para pesquisas futuras .....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a pesquisa CNT de Rodovias (2018) 50,9% da extensão de rodovias pavimentadas foi classificada como regular, ruim ou péssima no estado geral. A baixa densidade e inadequação da malha rodoviária elevam os custos do transporte, reduzem a segurança das vias e comprometem a retomada do crescimento econômico do país (CNT, 2018).

A degradação de um pavimento asfáltico geralmente está associada a um conjunto de patologias que comprometem seu desempenho e vida útil. Fatores como condições ambientais, capacidade de suporte, qualidade dos materiais empregados e do processo construtivo e o volume de tráfego podem ser apontados como responsáveis por desencadear esse processo destrutivo. Dentre os defeitos mais comuns aos pavimentos brasileiros destacam-se a deformação por trilha de roda, aparecimento de trincas, ondulações, exsudação do ligante asfáltico e desgaste da superfície. Retardar o aparecimento de qualquer uma das falhas mencionadas pode aumentar a durabilidade dos pavimentos (ROSSATO, 2015).

A utilização de ligantes asfálticos modificados é uma alternativa para melhorar o desempenho dos pavimentos. Dentre as principais vantagens da modificação dos ligantes asfálticos destacam-se o aumento da resistência à deformação permanente, aumento da resistência ao aparecimento e propagação de trincas ocasionadas por fadiga ou por variações térmicas, reduzindo a frequência de manutenções e aumentando a vida útil dos pavimentos. A incorporação de polímeros é a alternativa mais estudada e empregada na modificação de ligantes asfálticos, entretanto, nos últimos anos, outros modificadores têm ganhado espaço na engenharia de pavimentos, como por exemplo os nanomateriais (MARINHO FILHO, 2017).

Embora a utilização de nanotecnologia seja estudada há muitos anos, sua aplicação é relativamente recente. O desenvolvimento da nanociência, nas mais diversas áreas, proporcionou a descoberta de novos materiais que apresentam propriedades superiores aos materiais convencionais. Estudos recentes, como o de Marinho Filho (2017) e Marcon (2016) apontam resultados positivos quanto a utilização de materiais na escala nano como modificadores de ligantes asfálticos, constatando melhorias nas propriedades reológicas e mecânicas destes ligantes.

O dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) é o nono elemento mais abundante do planeta, sendo utilizado em diversos ramos da indústria devido a suas propriedades e baixo custo. Dentre as aplicações industriais mais relevantes, destaca-se sua aplicação na produção de tintas, papel,

plástico, medicamentos, células solares, cerâmicas, fibras, dentre outras. O  $\text{TiO}_2$  pode ser sintetizado como nanopartículas, nano-bastões ou nano-tubos, tendo o tamanho das partículas influência considerável no desempenho da aplicação desejada (PENA, 2015). Estudos recentes como o de Shafabakhsh et al. (2014) indicam que a adição de nanopartículas de dióxido de titânio em misturas asfálticas pode exercer influência positiva sobre suas propriedades, principalmente no tocante a resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga.

Embora a incorporação de nanomateriais permita obter compósitos com propriedades superiores, a exploração de todo o potencial das nanopartículas depende do controle preciso da sua química superficial. A modificação de superfície permite prevenir a aglomeração das nanopartículas e fornece estabilidade a suspensão, alcançando a compatibilidade com matrizes sólidas ou ambientes biológicos (SHEN, 2009).

Nesse contexto, esta pesquisa tem por objetivo avaliar o comportamento de misturas asfálticas confeccionadas a partir de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio modificadas superficialmente.

## 1.1 Justificativa

Tanto o projeto estrutural de pavimentos quanto o projeto de misturas asfálticas buscam alcançar a maior vida de operação possível para o pavimento diante do total de recursos disponíveis. Uma das alternativas para alcançar tal objetivo é retardar o surgimento de fenômenos desencadeadores dos principais tipos de defeitos encontrados nos pavimentos brasileiros: deformação permanente e trincas por fadiga.

A aplicação de novas soluções técnicas de execução e a utilização de novos materiais são alternativas para atender às necessidades funcionais e estruturais dos pavimentos projetados, resultado em maior eficiência no setor rodoviário.

Um estudo comparativo do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com CAPs convencionais e ligantes asfálticos modificados com nanopartículas poderá apresentar dados importantes para validar o emprego de revestimentos asfálticos com desempenho superior aos encontrados atualmente nas rodovias brasileiras.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de misturas asfálticas produzidas com ligante asfáltico modificado com nanopartículas de dióxido de titânio modificadas superficialmente.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- analisar o comportamento mecânico de misturas produzidas com ligante modificado com nanopartículas de dióxido de titânio por meio dos ensaios de estabilidade Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo dinâmico, módulo de resiliência, *flow number* e fadiga por compressão diametral à tensão controlada;
- avaliar o desempenho de misturas modificadas com nanopartículas de dióxido de titânio em termos de deformação permanente e vida em fadiga.

## 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos, sendo apresentada a seguir uma breve descrição dos assuntos abordados em cada um deles.

Capítulo 1 – Introdução, objetivos e organização do trabalho;

Capítulo 2 – Fundamentação teórica, onde foram abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: principais defeitos em pavimentos flexíveis, experiências com o uso de nanotecnologia em ligantes asfálticos, modificação de superfície de nanopartículas e características do dióxido de titânio.

Capítulo 3 – Descrição dos materiais utilizados na pesquisa, dos procedimentos laboratoriais e equipamentos utilizados, apresentando a caracterização dos materiais, etapas da modificação de superfície das nanopartículas e da dosagem Superpave realizada.

Capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados obtidos durante a realização do programa experimental.

Capítulo 5 – Conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

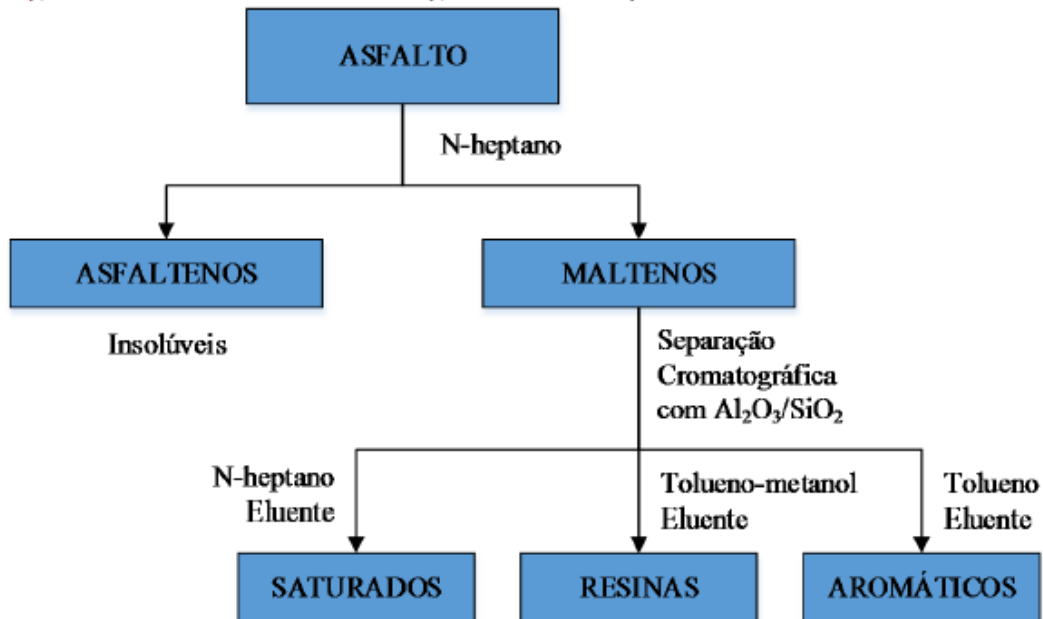
### 2.1 Ligantes asfálticos

O ligante asfáltico é obtido por meio do refino do petróleo, sendo constituído de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio, e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio). Este possui cor preta ou marrom, sendo muito viscoso e dotado de propriedades aglutinantes, com consistência sólida ou semissólida em temperaturas ambientes. Apresenta ainda propriedades como flexibilidade, durabilidade e grande resistência a maior parte dos ácidos, sais e álcalis; além de ser insolúvel em água. Devido a suas propriedades, os ligantes asfálticos são altamente utilizados na engenharia, sobretudo como material aglutinante e/ou impermeabilizante (BALBO, 2007).

As propriedades físicas dos ligantes asfálticos estão associadas à sua temperatura. Em temperaturas muito baixas os ligantes apresentam viscosidade muito elevada, comportando-se quase como um sólido. À medida que a temperatura aumenta, a viscosidade dos ligantes diminui. Quando essa temperatura alcança valores elevados, os ligantes se comportam como um líquido. Essa alteração da viscosidade decorrente da variação de temperatura do ligante é um processo reversível. A faixa de temperatura correspondente à transição entre sólido e líquido é influenciada pela proporção entre os componentes do ligante asfáltico e pela interação entre eles (BERNUCCI et al., 2010).

Segundo Melo (2014) uma das complexidades de se estudar os ligantes asfálticos refere-se à variedade de seus componentes. Conhecer a composição química do asfalto e o processo de refinamento empregado é de grande importância devido a sua influência sobre as propriedades físicas do ligante asfáltico, que afetam diretamente o desempenho das misturas asfálticas. O método mais empregado para o fracionamento do ligante asfáltico realiza a separação dos seus constituintes em saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos por meio da cromatografia fina por alumina. Tal procedimento recebe o nome de SARA, fazendo referência as letras iniciais de cada constituinte obtido no processo. A metodologia de fracionamento citada é atribuída ao químico L. W. Corbett e está esquematizada na Figura 1.

Figura 1 – Fracionamento do ligante asfáltico pelo método SARA.



Fonte: Melo (2014).

Os asfaltenos são sólidos amorfos, contendo carbono e hidrogênio em adição com nitrogênio, enxofre e oxigênio, e constituem de 5% a 25% do ligante asfáltico. O teor de asfaltenos tem grande influência nas características reológicas do ligante, uma vez que seu aumento conduz a um ligante mais duro e com menor penetração, com ponto de amolecimento mais elevado e maior viscosidade. As resinas contêm carbono e hidrogênio em adição a pequenas quantidades de nitrogênio, enxofre ou oxigênio. Estes são agentes dispersivos para os asfaltenos e a proporção entre as duas frações governa o caráter do ligante. Os aromáticos têm o menor peso molecular dentro do ligante e constituem 40% a 65% do betume, sendo líquidos viscosos com grande capacidade de dissolver outras moléculas hidrocarbonadas de elevado peso molecular. Já os saturados compreendem cadeias de hidrocarbonetos lineares e/ou ramificadas. O peso molecular médio é semelhante ao dos aromáticos e esta fração corresponde a um valor de 5% a 20% do ligante (MELO, 2014).

## 2.2 Principais defeitos em pavimentos flexíveis

Existem vários tipos de defeitos em pavimentos flexíveis, que são especificados e definidos pela norma DNIT 005/2003 – TER. Entre os fatores que podem provocar o aparecimento de defeitos estão falhas no projeto, no controle de qualidade dos materiais ou na

execução das diferentes camadas do pavimento. Os defeitos estruturais mais comuns nos pavimentos das rodovias brasileiras são a deformação permanente em trilha de roda e o aparecimento de trincas por fadiga. Em países de clima frio, como Estados Unidos e Canadá, outro defeito é comumente encontrado nos pavimentos flexíveis, apresentando-se também em forma de trincas. Entretanto, diferentemente das trincas por fadiga, estas possuem origem térmica, tendo como principais agentes as baixas temperaturas e a presença de água (SOBREIRO, 2014).

A deformação em trilha de roda é o exemplo mais comum de deformação permanente, sendo definida como o acúmulo de pequenas quantidades de deformação não recuperável, que ocorre quando o pavimento é submetido à aplicação de cargas. De maneira geral, pode-se dizer que a deformação permanente acontece em consequência da deformação viscosa do ligante asfáltico e deformação plástica da estrutura mineral da mistura asfáltica (MOURA, 2010).

A deformação permanente ocorre preferencialmente em misturas asfálticas submetidas a elevadas temperaturas. Sob estas condições, o ligante asfáltico sofre diminuição da sua viscosidade, e a mistura asfáltica comporta-se como um material não consolidado, cuja resistência à deformação permanente depende significativamente do estado de confinamento dos agregados. Sendo assim, tanto o ligante asfáltico quanto o esqueleto pétreo desempenham um papel fundamental na resistência à deformação permanente da mistura (MURAYA, 2007).

As trincas por fadiga são o segundo tipo de defeitos mais comuns nos pavimentos brasileiros, podendo ocorrer devido a aplicação de carregamentos repetidos. O fenômeno da fadiga pode ser entendido como a deterioração de um material – misturas asfálticas – quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, que resultam na perda de resistência do material e formação de trincas ou até na ruptura completa, após um número suficiente de ciclos de carga e descarga (GAMA, 2016).

O mecanismo de formação de trincas por fadiga é bastante complexo, sendo função das propriedades do ligante, das características da mistura e da estrutura do pavimento. Diversos fatores influenciam a vida de fadiga de um revestido asfáltico – temperatura, volume de tráfego, velocidade e carga dos veículos, pressão de inflação dos pneus – o que torna complexa a modelagem e previsão do dano por fadiga. A formação de trincas por fadiga reduz a capacidade de suporte do pavimento e possibilita a entrada de água, agravando o problema (MARTINS, 2014).

No tocante as trincas térmicas, Everton Santos (2015) afirma que, ao contrário da deformação permanente, a trinca devido a retração térmica tem sua ocorrência mais provável nas regiões de clima frio, não sendo comuns em países com o cenário climático do Brasil. A retração térmica do material da mistura asfáltica e infiltração da água nas camadas inferiores promovem a deterioração do pavimento, dando origem a trincas que podem propagar-se transversal e/ou longitudinalmente, reduzindo a vida útil do revestimento.

A modificação de ligantes asfálticos permite melhorar o comportamento mecânico das misturas asfálticas, superando algumas desvantagens do ligante puro, principalmente na sua contribuição para aumento da resistência ao acúmulo das deformações permanentes e ao aparecimento de trincas por fadiga/variação térmica.

### 2.3 Ligantes asfálticos modificados

Os ligantes asfálticos convencionais apresentam desempenho satisfatório na maioria das aplicações rodoviárias. Entretanto, com o aumento das cargas sobre os pavimentos surgiu a necessidade de desenvolver misturas asfálticas mais resistentes e, conseqüentemente, com maior vida útil. Neste cenário surgem os ligantes asfálticos modificados que possuem propriedades reológicas otimizadas por meio da adição de fileres, fibras, extensores, polímeros, dentre outros (EVERTON SANTOS, 2015).

Os modificadores são adicionados aos ligantes com o objetivo de melhorar o comportamento mecânico e o desempenho funcional do pavimento, aumentando a resistência ao acúmulo de deformações permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga e contração térmica. Além de agregar melhorias ao ligante, os modificadores devem ter baixo custo, boa dispersão no ligante e resistência à degradação na temperatura de processamento da mistura. Dentre os modificadores utilizados em misturas asfálticas, a incorporação de polímeros ao ligante é a alternativa mais estudada e empregada. Todavia, o desenvolvimento da nanotecnologia tem chamado a atenção para a possibilidade de utilização de nanomateriais como modificadores de ligantes asfálticos (DANTAS, 2015).

A engenharia de pavimentos tem obtido resultados promissores com o uso de nanomateriais, devido à capacidade que estas nanoestruturas possuem em influenciar positivamente diversas propriedades dos ligantes asfálticos, tais como a resistência ao envelhecimento, ao trincamento por fadiga, ao dano por umidade induzida e a deformação

permanente. Dentre os nanoproductos que podem beneficiar o desempenho de misturas asfálticas, destacam-se os nanotubos de carbono, nanopartículas de sílica e dióxido de titânio (MARCON, 2016).

Gama (2016) ressalta que, do ponto de vista econômico, nem sempre a modificação do ligante pode ser apontada como a melhor opção para melhorar a qualidade do pavimento. No caso do asfalto modificado por polímero, por exemplo, o custo é relacionado com a quantidade de polímero adicionado, e a escolha do teor de polímero tem influência sobre o grau de desempenho do pavimento. Portanto, é necessário conhecer o grau de desempenho que deve ser alcançado pelo pavimento a ser construído e, em seguida, decidir pelo uso ou não do ligante modificado.

## 2.4 Nanotecnologia

A nanotecnologia é a ciência que estuda a concepção, construção e utilização de materiais com pelo menos uma dimensão característica em nanômetros. Portanto é a ciência que envolve a manipulação de materiais de tamanho muito reduzido, na ordem de  $10^{-9}$  m. Materiais nestas dimensões, designados de nanomateriais, possuem características físicas, químicas e biológicas únicas, que permitem aplicações inovadoras (CARLESSO, 2017).

A nanotecnologia é uma área relativamente recente (com origem na segunda metade do século XX) e evoluiu nos últimos anos devido às iniciativas dedicadas à área, a modernização de equipamentos de caracterização de materiais e um melhor entendimento da química e da física na escala nanométrica. Inicialmente a nanotecnologia desenvolveu-se principalmente nas áreas da eletrônica, física, química, medicina e suas aplicações mais recentes são na engenharia. Os diferentes nanomateriais estão sendo descobertos dia após dia, dando origem a materiais mais leves e eficientes, adequados e de baixo custo, muitos deles já em fase de comercialização em cosméticos, eletrodomésticos, vestuários e em diversos utensílios e equipamentos (DIAS, 2013).

O grande diferencial dos nanomateriais é potencializar as propriedades físicas e químicas nos materiais, proporcionando um imenso interesse e crescente importância para aplicações tecnológicas. De todas as oportunidades de utilização dos nanomateriais na engenharia, destacam-se atualmente as nanopartículas e nanocompósitos. A aplicação de nanopartículas como cargas reforçadas em materiais é muito atraente, pois estas apresentam

propriedades distintas dos materiais macrocristalinos quimicamente análogos. Os nanocompósitos são materiais híbridos, contendo uma matriz e uma fase dispersa, com pelo menos uma dimensão nanométrica. As interações entre os componentes podem influenciar a dinâmica molecular dos nanocompósitos, resultando em alterações significativas nas suas propriedades físicas, principalmente no comportamento térmico e/ou mecânico (CARLESSO, 2014).

Tratando-se dos nanomateriais aplicados a pavimentação, pesquisas recentes têm utilizado nanoargilas, nanopartículas de dióxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), nanosílica (NS), nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ).

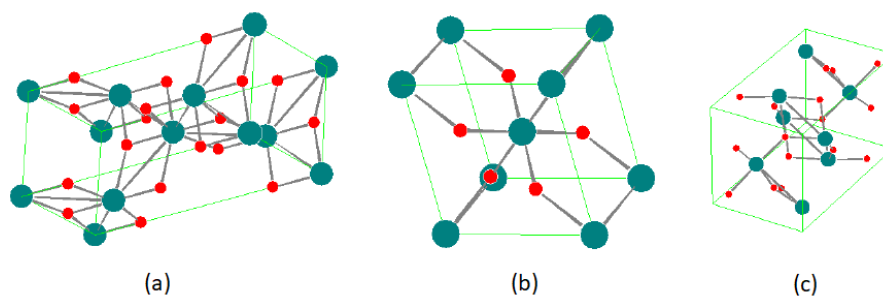
Carlesso (2014) realizou uma comparação da vida em fadiga de misturas asfálticas convencionais, modificadas com borracha moída de pneu e com 3% de nanoargila. Segundo o autor, a incorporação de nanoargila às misturas asfálticas resultou em um aumento significativo da resistência ao trincamento por fadiga nas simulações realizadas, chegando a alcançar praticamente o dobro da vida útil em relação à mistura com ligante convencional.

Carlesso (2017) avaliou os efeitos da adição simultânea de nanoargila e do polímero SBS nas propriedades reológicas de ligantes asfálticos, nos teores de 3% e 2% respectivamente. A partir dos estudos reológicos, o autor identificou uma redução da susceptibilidade térmica e cinética para os ligantes duplamente modificados, além de aumento da resistência à deformação permanente estimando em 58%, com relação à mistura convencional.

## 2.5 Dióxido de titânio

Álvarez Montoya (2014) apresenta o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) como o nono elemento mais abundante na terra, sendo um sólido estável, não tóxico, não inflamável e anfótero, apesar de apresentar características mais ácidas do que básicas. O  $\text{TiO}_2$  aparece na natureza em três formas cristalinas conhecidas: rutilo tetragonal, anatase tetragonal e bruquita ortorrômbica (Figura 2). A forma termodinamicamente mais estável é o rutilo, que é também a fase de equilíbrio em todas as temperaturas.

Figura 2 – Estrutura molecular do dióxido de titânio nas formas de (a) anatase, (b) rutilo e (c) bruquita.



Fonte: Adaptado de Álvarez Montoya (2014).

Pena (2015) afirma que o dióxido de titânio é um óxido semiconductor normalmente estudado pelos interesses em suas propriedades físicas e químicas, como a sua abundância, baixa toxicidade, resistência à corrosão, baixo custo, dentre outras. O  $\text{TiO}_2$  é encontrado principalmente sob a forma do mineral ilmenita ( $\text{FeTiO}_2$ ), que pode ser processado industrialmente e convertido em dióxido de titânio.

Segundo Kandiel et al. (2013) o dióxido de titânio é um material importante para várias aplicações técnicas e ambientais, tais como a composição de células solares, sensores eletrônicos, revestimento contra corrosão, materiais autolimpantes e realização de fotocatalise. Álvarez Montoya (2014) afirma que a principal aplicação do dióxido de titânio é como pigmento branco, devido a seu brilho e alto índice de refração. É usado na fabricação de tintas, papel, plástico, na indústria de alimentos, cosméticos, medicamentos, dentre outras.

O Ministério de Minas e Energia afirma no Relatório Técnico 36 – Perfil do Titânio (2010), que o Brasil figura como detentor da quinta maior reserva mundial de ilmenita ( $\text{FeTiO}_2$ ), mineral de titânio de ocorrência mais comum e abundante. Os depósitos mais importantes de ilmenita situam-se no estado da Paraíba (Mataraca), que acumulam 64% das reservas brasileiras registradas oficialmente pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. O Brasil também é o detentor das maiores jazidas de titânio na forma de anatásio conhecidas no mundo, avaliadas em 440 milhões de toneladas, com teores médios de 17,7% de  $\text{TiO}_2$ , que ocorrem nos estados de Minas Gerais e Goiás.

Tanzadeh et al. (2013) avaliaram a adição de nanopartículas de dióxido de titânio em misturas asfálticas. Em seu estudo, a adição de 4% de  $\text{nanoTiO}_2$  ao ligante diminuiu as deformações permanentes. Além disso, a modificação provocou o aumento do ponto de amolecimento e consequentemente, reduziu a sensibilidade térmica do ligante. Os autores

também observaram o aumento da ductilidade do ligante nanomodificado quando comparado ao ligante convencional.

No estudo de Shafabakhsh et al. (2014) a adição de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  ao ligante asfáltico, para o teor ótimo de 5%, foi avaliada por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e ductilidade, concluindo-se que o  $\text{nanoTiO}_2$  provocou efeitos positivos nas propriedades reológicas do ligante. A adição de  $\text{nanoTiO}_2$  aumentou a viscosidade, ponto de amolecimento e ductilidade do ligante e reduziu sua sensibilidade térmica.

Marinho Filho (2017) avaliou a adição de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , para o teor ótimo de 3%, as propriedades reológicas do CAP 50/70 e do ligante 55/75-E. A incorporação de  $\text{nanoTiO}_2$  ao CAP 50/70 proporcionou maior vida útil e propriedades reológicas similares ao do ligante 55/75-E puro. Dentre as melhorias apresentadas, destacam-se o aumento da rigidez e da temperatura de falha do grau de desempenho, além da redução do ponto de fusão. Com relação ao ligante 55/75-E, a incorporação proporcionou melhorias menos significativas quando comparadas ao CAP 50/70.

## 2.6 Modificação superficial de nanopartículas

As dimensões em escala nanométrica e a alta energia superficial das nanopartículas dificultam sua dispersão devido a capacidade de se agrupar entre si e formar aglomerados com facilidade. A modificação da superfície é uma das alternativas para minimizar a baixa interação entre as nanopartículas e o meio dispersivo. No caso dos compósitos formados por nanopartículas/polímero, os estudos têm demonstrando que a modificação superficial das nanopartículas reduz a interação partícula/partícula e aumenta a interação partícula/polímero (BALARIM, 2015).

Marinho Filho (2017) afirma que a modificação superficial pode melhorar as características das nanopartículas e possibilita a obtenção de nano compósitos inexistentes na natureza. A aplicação bem-sucedida das nanopartículas depende, portanto, tanto da síntese quanto da modificação superficial empregada. Segundo Balarim (2015) a apropriada modificação superficial das nanopartículas não apenas ocasiona apenas uma melhor dispersão e compatibilidade com a matriz, mas também altera as interações físico-químicas que podem melhorar o desempenho do compósito.



A modificação superficial das nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  depende da correta dispersão das partículas durante a suspensão coloidal. Durante a síntese, as nanopartículas tendem a se aglomerar, reduzindo a área de superfície e, conseqüentemente, a energia livre total do sistema. Esse fenômeno influencia não somente o tamanho e a forma das partículas, mas também sua estabilidade quando dispersas em meios fluidos. Uma vez que a perda de estabilidade coloidal traz sérios prejuízos quanto à maioria das aplicações das nanopartículas, é necessário desenvolver estratégias de proteção e estabilização química de sua superfície (BECK JUNIOR, 2011).

Dentre as diversas técnicas de estabilização de superfície utilizadas atualmente, destaca-se a estabilização por repulsão entre as superfícies eletricamente carregadas das nanopartículas, que pode ser controlada por meio do uso de diferentes solventes ou dispersantes. Diversas substâncias podem ser utilizadas como agente espaçador, sendo as mais importantes denominadas de surfactantes (BECK JUNIOR, 2011).

O dióxido de titânio faz parte da família dos óxidos metálicos, sendo comum para estes tipos de materiais a utilização de modificadores de superfície como a oleilamina (MARINHO FILHO, 2017).

## 2.7 Misturas asfálticas

A mistura asfáltica é uma estrutura flexível composta basicamente pela mistura de agregados minerais e materiais betuminosos em proporções adequadas e definidas por meio de métodos de dosagem, que possui a função de receber diretamente os esforços do tráfego rodoviário. Existem diversos tipos de misturas asfálticas, cada uma com padrão granulométrico e características mecânicas adequadas ao tipo de aplicação destinada (ROSSATO, 2015).

As misturas asfálticas podem ser divididas em misturas à quente, misturas mornas e misturas à frio, baseado na temperatura de usinagem. As misturas à quente são preparadas a partir do aquecimento dos agregados e do ligante asfáltico com temperaturas variando entre  $150^\circ\text{C}$  e  $180^\circ\text{C}$ , sendo as mais utilizadas em pavimentação, devido a sua resistência e durabilidade. As misturas mornas são preparadas em temperaturas intermediárias ( $100^\circ\text{C}$  e  $150^\circ\text{C}$ ), quando comparadas às misturas à quente e à frio. Por fim, as misturas à frio são produzidas sem a necessidade de aquecimento, tendo seu uso geralmente restrito a pavimentos de baixo volume de tráfego (SILVA, 2016).

As misturas asfálticas a quente comumente são divididas em três categorias, de acordo com a graduação dos agregados e filler: graduação densa, graduação aberta e graduação descontínua.

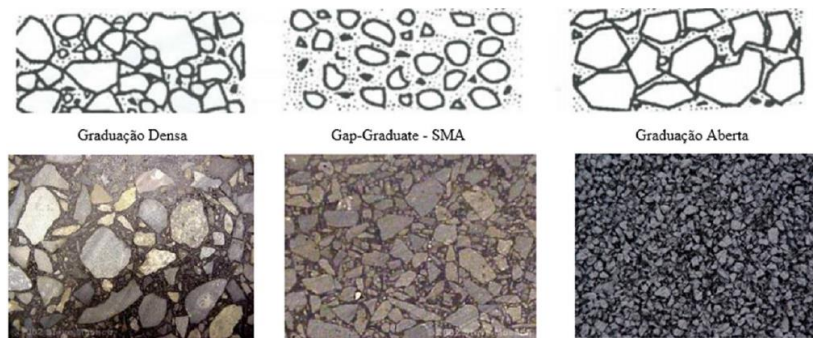
As misturas com graduação densa possuem curva granulométrica contínua e bem graduada, apresentando um esqueleto mineral com poucos vazios entre as partículas maiores, preenchidos pelos agregados com dimensões menores. O volume de vazios indicado para esse tipo de mistura é de 3% a 5% e o teor ótimo de ligante entre 4% e 6%. As misturas com graduação densa, quando bem dimensionadas, apresentam elevada resistência, sendo utilizadas em rodovias de tráfego pesado. O concreto asfáltico (CA) é um exemplo de misturas com graduação densa (BERNUCCI et al., 2010).

As misturas de graduação aberta se caracterizam pela presença de um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, devido a uma curva granulométrica uniforme com agregados exclusivamente de um mesmo tamanho. A quantidade de material fino utilizado nesse tipo de mistura não é suficiente para preencher totalmente os vazios entre as partículas maiores, proporcionando um aspecto drenante a mistura. A camada porosa de atrito (CPA) é um exemplo clássico de mistura com graduação aberta (BERNUCCI et al., 2010).

Por fim, as misturas de graduação descontínua possuem um proporcionamento dominante dos agregados graúdos em relação aos agregados de dimensões intermediárias, completadas com grande quantidade de finos, apresentando uma curva granulométrica descontínua em certas peneiras. As misturas de graduação descontínua apresentam um esqueleto pétreo mais resistente à deformação permanente, devido ao maior contato grão a grão entre os agregados graúdos. A utilização de ligantes modificados e fibras é altamente recomendada nesse tipo de mistura, a fim de evitar o escorrimento do ligante asfáltico. O Stone Matrix Asphalt (SMA) é um exemplo de mistura de graduação descontínua (BERNUCCI et al., 2010).

A Figura 3 ilustra os diferentes tipos de misturas asfálticas, com relação a graduação dos agregados utilizados.

Figura 3 – Diferentes granulometrias para misturas asfálticas.



Fonte: Barros (2017).

No Brasil, em se tratando de misturas asfáltica a quente, as mais utilizadas são as misturas de graduação densa, que possuem elevada resistência em todos os aspectos, desde que sejam convenientemente dosadas e que os materiais constituintes sejam adequadamente selecionados. Devido ao arranjo bem-graduado dos grãos, a quantidade de ligante requerido varia de 3% a 5%, podendo variar de acordo com a forma dos agregados, massa específica, tipo e viscosidade do ligante (BERNUCCI et al., 2010; RAMOS, 2012).

## 2.8 Dosagem de misturas asfálticas

A dosagem de misturas asfálticas tem por objetivo determinar, por meio de procedimentos experimentais, o teor “ótimo” de ligante asfáltico para uma determinada faixa granulométrica previamente escolhida, a partir de um método de compactação que resulte em corpos de provas com parâmetros mecânicos similares aos encontrados em campo. A mistura asfáltica dosada deve apresentar características desejáveis, como trabalhabilidade, durabilidade e resistência adequada. Diversos métodos de dosagem de misturas asfálticas foram desenvolvidos - método Marshall, Superpave, Hubbard-Field, Hveem, etc. – apresentando resultados diferentes para o teor ótimo de ligante asfáltico (SILVA e GOMES, 2015).

O procedimento de dosagem Marshall é o único normalizado no Brasil, e foi elaborado no fim da década de 1930 pelo engenheiro Bruce G. Marshall. Trata-se de um procedimento empírico baseado em parâmetros que melhor se relacionavam com o desempenho em campo de revestimentos asfálticos daquela época. A necessidade de equipamentos simples e de baixo custo provocou a rápida difusão do método Marshall para a maioria dos estados americanos, bem como para outros países. No entanto, a ocorrência de deformações permanentes prematuras

em rodovias de tráfego pesado nos Estados Unidos na década de 1980 levou a um questionamento sobre a adequação da compactação por impacto na dosagem. Na maioria dos casos, o excesso de ligante foi admitido como responsável pelas ocorrências. Essa questão foi abordada no *Strategic Highway Research Program* (SHRP) que tinha como objetivo identificar e definir as propriedades do ligante, dos agregados e das misturas asfálticas que pudessem influenciar o comportamento do pavimento, além de desenvolver métodos de ensaios para especificações baseadas no desempenho. O resultado direto do SHRP foi a elaboração de um novo método de dosagem, denominado de Superpave (LEANDRO, 2016).

Independentemente do método de dosagem e compactação, a proporção dos constituintes e suas propriedades exercem influência determinante no desempenho das misturas asfálticas. Além disso, torna-se necessário também compreender a influência do tráfego e do clima local no desempenho das misturas asfálticas, garantindo a escolha adequada do ligante e da distribuição granulométrica dos agregados (ARTERIS, 2014).

### 2.8.1 Dosagem Superpave

O método de dosagem denominado de *Superior Performance Asphalt Pavements* (SUPERPAVE) foi resultado dos estudos do SHRP no final da década de 1980 e início da década de 1990. O novo método possibilitava a compactação da mistura de forma a atingir as densidades obtidas sob as condições climáticas e de carga de compactação em campo, incluindo um novo sistema para a seleção e especificação de ligantes asfálticos, requisitos quanto à graduação e propriedades dos agregados, e uma nova sistemática para dosagem de misturas asfálticas. Um novo equipamento de compactação foi desenvolvido, Compactador Giratório Superpave (CGS), capaz de realizar a compactação por amassamento, que fornece resultados mais próximos aos encontrados em campo.

O CGS fixa o molde de rotação à um ângulo de rotação de  $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ , aplicando uma tensão vertical constante de 0,6 MPa sobre a amostra dentro do molde, executando 30 revoluções por minuto. Durante a compactação são registradas as alturas do corpo-de-prova a cada giro, permitindo o cálculo da densidade da amostra durante a compactação. O compactador giratório produz corpos-de-prova com diâmetros de 100 mm e 150 mm. A energia de compactação empregada na metodologia Superpave é determinada em termos de números de

giros no CGS e é função do tráfego. A Tabela 1 apresenta os números de giros recomendados para cada classe de tráfego segundo o Superpave.

Tabela 1 – Número de giros em função do tráfego.

Tráfego de projeto, ESAL ( $\times 10^6$ )	Número de Giros		
	Inicial	Projeto	Máximo
	$N_{ini}$	$N_{des}$	$N_{max}$
< 0,3	6	50	75
0,3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
$\geq 30$	9	125	205

Fonte: Asphalt Institute (2001).

Os esforços de compactação  $N_{ini}$  e  $N_{max}$  são usados na avaliação da compactibilidade da mistura, enquanto que o  $N_{des}$  é usado na determinação do teor de ligante ótimo ou de projeto. O teor de ligante é escolhido de modo a fornecer uma mistura com volume de vazios igual a 4%, sendo todos os outros parâmetros volumétricos analisados para este teor.

O método Superpave é constituído, de maneira resumida, por quatro etapas: seleção de materiais, seleção da graduação dos agregados, determinação do teor de asfalto de projeto e avaliação da sensibilidade à umidade.

Na primeira etapa, são definidos o ligante asfáltico e os agregados a serem utilizados. A escolha é realizada com base nas propriedades físicas obtidas em ensaios de caracterização dos materiais. Na segunda, determina-se a faixa granulométrica a ser utilizada na mistura. Posteriormente, é escolhido o teor de asfalto de projeto, com base na análise dos parâmetros volumétricos de corpos-de-prova compactados no CGS. O teor de projeto é estabelecido para o volume de vazios de 4%, verificando se a mistura selecionada atende a todos os critérios volumétricos exigidos. Por fim, avalia-se o dano por umidade induzida nas misturas compactadas.

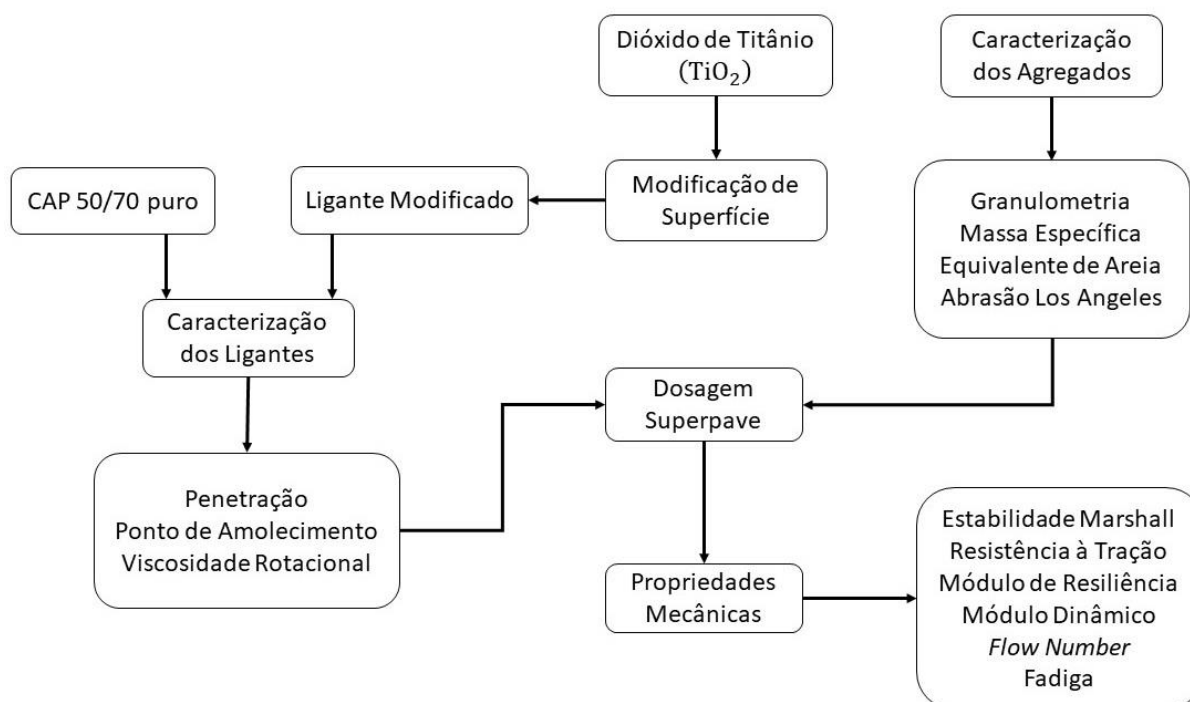
O sistema Superpave tem apresentado sucesso em vários aspectos, principalmente em relação à avaliação dos ligantes asfálticos. As misturas projetadas por essa sistemática têm apresentado em campo boa resistência à deformação permanente em trilha de roda. Em relação ao trincamento e permeabilidade dos revestimentos de misturas dosadas segundo o Superpave, os resultados foram menos satisfatórios, motivando o desenvolvimento de pesquisas com o objetivo de aperfeiçoar vários aspectos desse sistema (ARTERIS, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e os procedimentos que foram utilizados durante o estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas modificadas com nanopartículas de dióxido de titânio. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos e Geotécnica – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

Os ensaios foram realizados de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *American Association of Highway and Transportation Officials* (AASHTO). O fluxograma da Figura 4 apresenta a sequência de atividades desenvolvidas nesta pesquisa.

Figura 4 – Etapas desenvolvidas na pesquisa.



### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Ligante asfáltico

As misturas utilizadas nesta pesquisa foram confeccionadas utilizando como ligante asfáltico o CAP 50/70, cedido pelo Grupo Rocha Cavalcante.

#### 3.1.2 Agregados

Os agregados graúdos utilizados para confecção das misturas foram a brita 19 mm e a brita 9,5 mm, de origem granítica e cedidos pela mineradora do Grupo Rocha Cavalcante. Como agregados miúdos foram utilizados o pó de pedra (também cedido pelo Grupo Rocha Cavalcante) e areia de leito de rio, adquirida no comércio local. A cal hidratada da marca MegaÓ foi utilizada como filer.

Figura 5 – Agregados graúdos: (a) Brita 19mm; (b) Brita 9,5 mm.

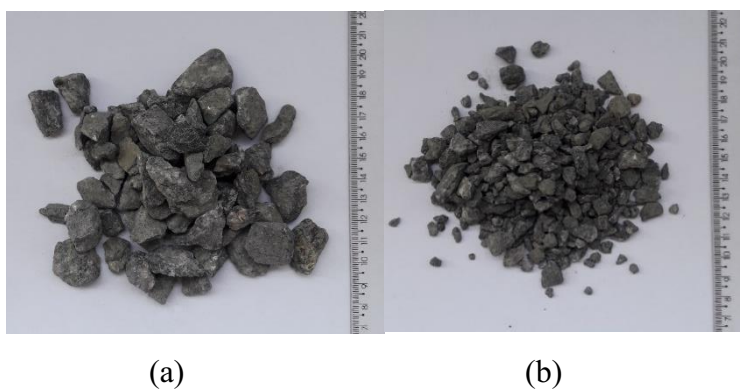
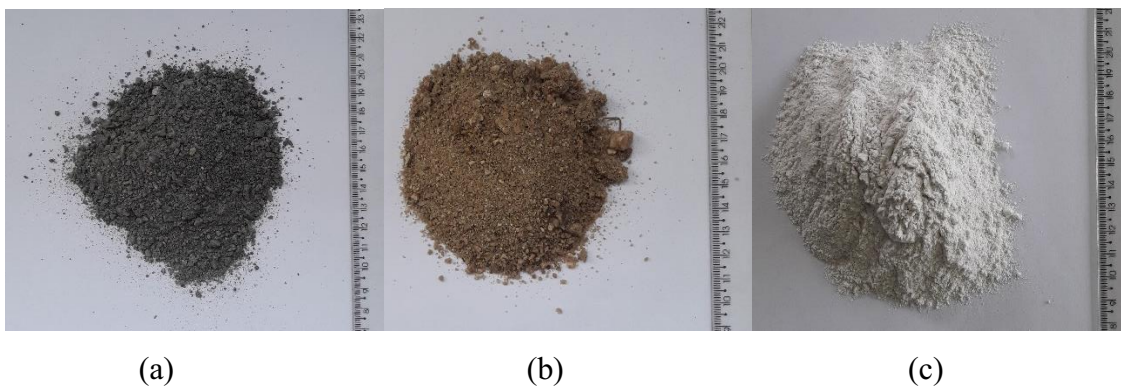


Figura 6 – Agregados miúdos e filer: (a) Pó de pedra; (b) Areia; (c) Cal hidratada.



### 3.1.3 Nanopartículas de TiO<sub>2</sub>

As nanopartículas de dióxido de titânio (Figura 7) utilizadas nesse trabalho foram adquiridas sob a denominação TiO<sub>2</sub> – dióxido de titânio FR 767, classificado dentre os produtos da empresa InterBrasil como Rutilo. A Tabela 2 apresenta a caracterização do TiO<sub>2</sub> fornecida pela empresa InterBrasil.

Figura 7 – Dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>).



Tabela 2 – Caracterização do nanoTiO<sub>2</sub> fornecida pela empresa InterBrasil.

Item	Especificação	Resultado
TiO <sub>2</sub>	≥93	93,9
Alvura (comparação com padrão)	APROXIMADO	PASSOU
Poder de iluminação (Número de Reynolds)	≥ 1800	1940
R (%)	≥ 98	98,9
105 °C Volátil	≤ 0,8	0,4
Matéria solúvel em água (%)	≤ 0,5	-
Ph	6,5 ~ 8,5	7,5
Absorção de óleo (g/100g)	≤ 21	20
Finesa % (45µ resíduo de peneira)	≤ 0,05	0,01
Dispersibilidade (%)	≥ 5,75	6,25
Resistividade (Ω.m)	≥ 80	261
Cor	L	≥ 98
	B	≤ 2,4



### 3.1.4 Modificador de superfície

A modificação de superfície do  $\text{TiO}_2$  foi realizada por meio da oleilamina, fórmula química  $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$ , da marca Merck Sigma-Aldrich. Durante o procedimento de modificação, utilizou-se também o hexano, fórmula química  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$ , da marca Neon.

Figura 8 – (a) Oleilamina e (b) Hexano.



(a)

(b)

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Modificação superficial das nanopartículas de $\text{TiO}_2$

A modificação superficial das nanopartículas de dióxido de titânio foi realizada com o objetivo de minimizar a aglomeração das partículas e facilitar sua dispersão na matriz asfáltica, com base nos procedimentos adotados por Marinho Filho (2017).

As modificações foram realizadas por meio de agitação magnética dispondo as nanopartículas de dióxido de titânio em oleilamina, que constituiu o meio dispersor, em uma proporção de 1:2. Marinho Filho (2017) apontou este como o meio mais eficaz de incorporação das nanopartículas ao ligante asfáltico dentre os métodos utilizados em seu estudo. A agitação ocorreu pelo período de 4 horas sob temperatura ambiente (Figura 9).

Ao final do processo, as amostras foram dissolvidas no hexano e centrifugadas durante 10 minutos a 3.000 rpm. Por fim, as amostras foram dispostas em estufa a  $60^\circ\text{C}$  para volatilizar o álcool, restando apenas as nanopartículas modificadas superficialmente (Figura 10).

Figura 9 – Procedimento de agitação magnética das nanopartículas.



Figura 10 – Procedimento de centrifugação das nanopartículas.



### 3.2.2 Procedimento de mistura

A adição das nanopartículas de dióxido de titânio ao ligante asfáltico puro (CAP 50/70) foi realizada por meio de um misturador mecânico. O teor de 3% de nanoTiO<sub>2</sub> incorporado ao ligante teve como base a pesquisa de Marinho Filho (2017), que utilizou os teores de 3%, 4% e 5% de material nanoparticulado. Como resultado, o autor destacou que a adição de nanoTiO<sub>2</sub> no teor de 3% apresentou maior eficácia na incorporação destas ao ligante asfáltico, conferindo maior rigidez, aumento no grau de desempenho e da vida em fadiga dos mesmos.

O ligante asfáltico puro (CAP 50/70) foi colocado em um misturador mecânico da marca FISATOM, modelo 722D (Figura 11), e aquecido até a temperatura de 150°C ± 5°C. Feito isso, procedeu-se com a adição das nanopartículas de dióxido de titânio modificadas superficialmente ao ligante, agitando o material pelas hélices do aparelho a 2.000 rpm por 90 minutos, a fim de garantir a homogeneidade da mistura e evitar a aglomeração das nanopartículas. Após o procedimento de mistura, armazenou-se o ligante modificado em recipientes adequados, para posterior utilização.

Figura 11 – Misturador mecânico FISATOM.



### 3.2.3 Caracterização dos ligantes asfálticos

A caracterização dos ligantes asfálticos utilizados foi realizada por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, antes e após a realização do procedimento de envelhecimento a curto prazo, conforme descrito pela Tabela 3. Os resultados dos ensaios de caracterização estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 3 – Ensaios de caracterização do cimento asfáltico de petróleo.

<b>Ensaios</b>	<b>Norma</b>
Penetração	DNIT 155/2010-ME
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010-ME
Viscosidade rotacional	NBR 15184/2005
Envelhecimento a curto prazo	ASTM D 2872/2012

Tabela 4 – Resultados da caracterização dos ligantes asfálticos.

<b>Ensaio</b>	<b>CAP 50/70 puro</b>	<b>+ 3% de TiO<sub>2</sub></b>
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	59	31
Ponto de amolecimento, °C	48,8	54
Viscosidade rotacional a 135°C, 20 rpm, cP	433,8	606,3
Viscosidade rotacional a 150°C, 50 rpm, cP	213,0	289,5
Viscosidade rotacional a 177°C, 100 rpm, cP	79,0	99,0
Viscosidade rotacional a 135°C, cP (Pós RTFO)	578,8	737,5
Viscosidade rotacional a 135°C, cP (Pós RTFO)	277,0	345,0
Viscosidade rotacional a 135°C, cP (Pós RTFO)	95,8	116,3
Penetração retida, %	68	81
Perda de massa, %	0,036	0,039
Varição do ponto de amolecimento, °C	5	1

Com base nos resultados dos ensaios de caracterização, observou-se que os ligantes utilizados atenderam a todos os requisitos estabelecidos pela norma DNIT 095/2006-EM, que determina as especificações para os cimentos asfálticos utilizados em serviços de pavimentação.

O valor da penetração do ligante puro determina sua classificação como CAP 50/70, segundo o método de classificação brasileiro. Os resultados apontam que a adição de nanopartículas de dióxido de titânio promoveu uma redução dos valores de penetração do ligante quando comparados ao ligante puro, o que indica aumento da rigidez do ligante à temperatura de 25°C.

A penetração retida é uma relação entre a penetração do ligante antes e após a realização do procedimento de envelhecimento RTFO. Quanto mais próximo a 100%, menor a alteração do valor da penetração pelo envelhecimento a curto prazo. A adição do nanoTiO<sub>2</sub> resultou no aumento do valor da penetração retida.

O resultado do ensaio de ponto de amolecimento reiterou o aumento da rigidez do ligante provocado pela adição das nanopartículas de TiO<sub>2</sub>. O ligante modificado apresentou não somente maiores valores de ponto de amolecimento, como também uma redução na variação do ponto de amolecimento, levando em consideração os resultados antes e após a realização do procedimento RTFO. O resultado indica uma redução da suscetibilidade ao envelhecimento a curto prazo do ligante modificado com as nanopartículas.

O ligante modificado com 3% de nanoTiO<sub>2</sub> apresentou viscosidade rotacional superior ao do CAP puro antes e após o procedimento RTFO. Segundo Gama (2016) a modificação de ligantes asfálticos geralmente resulta no aumento da viscosidade, consequentemente elevando as temperaturas de usinagem e compactação.

A perda de massa observada no procedimento de envelhecimento a curto prazo está relacionada com a degradação e redução de parte da matéria presente, provocados pela ação do calor e do ar aplicado no processo (SANTOS, 2017). Verifica-se que as amostras ensaiadas apresentam perda de massa inferior ao limite máximo de 1% estabelecido pela norma DNIT 095/2006-EM.

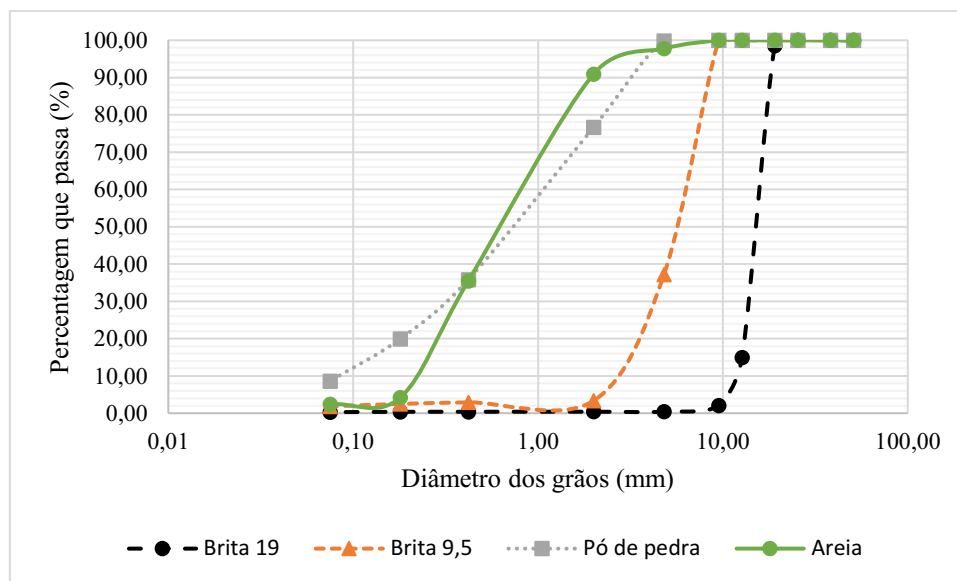
### 3.2.4 Caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados foi realizada por meio dos ensaios de granulometria dos agregados graúdos e miúdos (DNIT–ME 083/1998); massa específica do agregado graúdo e miúdo (DNIT–ME 081/1998 e DNIT-ME 084/1995, respectivamente); abrasão Los Angeles (DNIT-ME 035/1998); equivalente areia (DNIT–ME 054/1997), cujos resultados estão apresentados na Tabela 5. A Figura 12 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos.

Tabela 5 – Resultados da caracterização dos agregados.

<b>Ensaio</b>	<b>Brita 19</b>	<b>Brita 9,5</b>	<b>Areia</b>	<b>Pó de pedra</b>
Massa específica real, g/cm <sup>3</sup>	2,79	2,79	2,31	2,45
Massa específica aparente, g/cm <sup>3</sup>	2,74	2,76	2,27	2,38
Absorção (%)	0,7	0,3	-	-
Abrasão Los Angeles, %	22	25	-	-
Equivalente areia, %	-	-	70,2	57,5

Figura 12 – Distribuição granulométrica dos agregados.



### 3.2.5 Dosagem Superpave

A dosagem das misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa foi realizada por meio da metodologia Superpave. O objetivo da dosagem de uma mistura é escolher o teor ótimo de ligante relativo a uma faixa granulométrica predefinida. Os procedimentos de dosagem foram realizados apenas para o CAP 50/70 puro. A utilização de dois ligantes distintos (CAP 50/70 puro e o ligante modificado com  $TiO_2$ ) poderia resultar em teores ótimos diferentes, dificultando a comparação das propriedades mecânicas das misturas. O traço da mistura de projeto encontrado ao final do processo de dosagem foi utilizado para as duas misturas estudadas.

A primeira etapa da dosagem consistiu na escolha da composição granulométrica da mistura. A partir da granulometria dos agregados, constatou-se o enquadramento da mistura na faixa “C” estabelecida pelo DNIT. A curva de Fuller intermediária da Figura 13 foi construída para auxiliar na escolha da composição granulométrica adequada, garantindo o enquadramento na faixa escolhida e respeitando os critérios de pontos de controle e zona de restrição estabelecidos pela metodologia Superpave. A Tabela 6 apresenta as proporções definidas para os agregados por meio da análise da curva de Fuller.

Figura 13 – Curva Fuller intermediária.

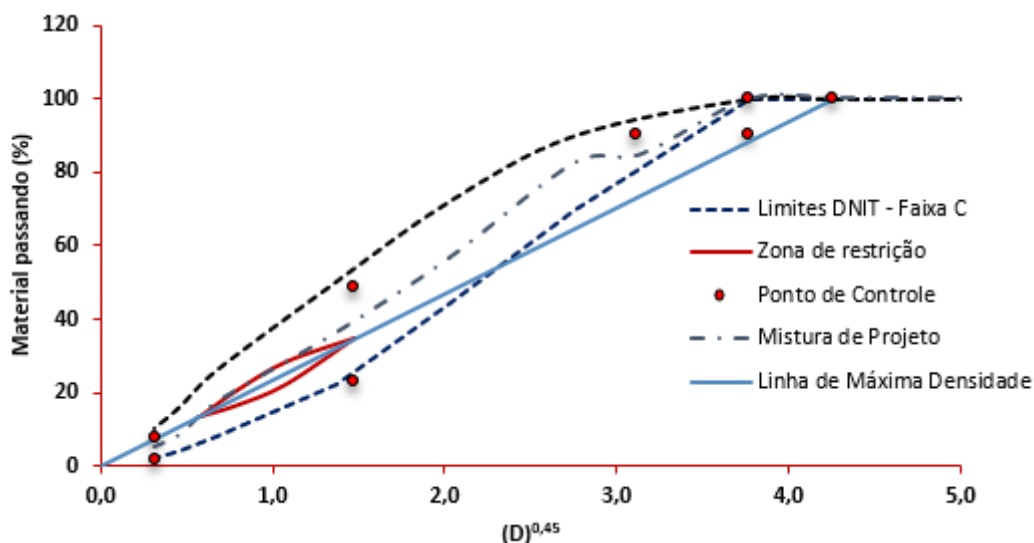


Tabela 6 – Proporção dos agregados obtida por meio da composição granulométrica dos agregados.

<b>Brita 19</b>	<b>Brita 9,5</b>	<b>Areia</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Fíller</b>
18%	40%	15%	25%	2%

O passo seguinte foi a determinação do teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura. A estimativa do teor de ligante inicial foi definida no valor de 4,6% com base no método da superfície específica. Outros três corpos de prova foram confeccionados utilizando os teores de  $\pm 0,5\%$  e  $+ 1\%$  em relação ao teor inicial. A moldagem dos corpos de prova foi realizada por meio do compactador giratório Servopac (Figura 14). O número de giros de projeto adotado foi de  $N_{projeto} = 100$ , que representa um tráfego equivalente em vias urbanas de médio a pesado. O molde utilizado para confecção dos corpos de prova tinha diâmetro de 100 mm.

Figura 14 – Etapas da compactação das misturas avaliadas.



A metodologia Superpave preconiza que o teor de ligante de projeto seja aquele para o qual o volume de vazios ( $V_v$ ) da mistura atinja 4%, dentre outras condições volumétricas. Após a moldagem dos corpos de prova, o volume de vazios das misturas compactadas foi calculado utilizando a Equação (1):

$$V_v = 100 \times \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$V_v$  = volume de vazios da mistura (%);

$G_{mb}$  = massa específica aparente medida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$G_{mm}$  = massa específica máxima medida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

A massa específica aparente medida dos corpos de prova utilizados na dosagem foi obtida segundo os procedimentos descritos pela AASHTO T 166/16, que possui como fundamento a pesagem hidrostática (Figura 15). O valor da  $G_{mb}$  foi calculado conforme a Equação (2):

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{ss} + M_{sub}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

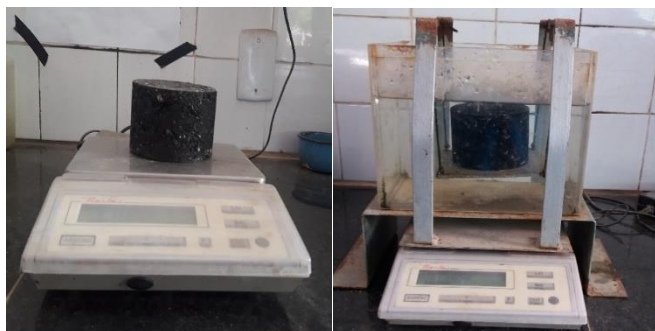
$G_{mb}$  = massa específica aparente medida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$M_s$  = massa seca do corpo de prova (g);

$M_{sub}$  = massa submersa do corpo de prova (g);

$M_{ss}$  = massa do corpo de prova com a superfície seca (g).

Figura 15 – Determinação da massa específica aparente.



A massa específica máxima medida da mistura foi determinada por meio do Rice Test (Figura 16), segundo os procedimentos descritos pela norma americana ASTM D2041/11. O Rice é um método que utiliza vácuo para determinar a densidade da mistura entre o agregado e



o ligante, considerando a quantidade de ligante que é absorvido pelo agregado e a diferença entre as viscosidades da água e do ligante (TAVARES, 2012). O ensaio foi realizado com misturas utilizando cada um dos teores de ligante avaliados durante o procedimento de dosagem. A  $G_{mm}$  foi calculada segundo a Equação (3):

$$G_{mm} = \frac{A}{(A - (B - C))} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$G_{mm}$  = massa específica máxima medida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

A = massa da amostra da mistura seca (g);

B = massa do recipiente com água (g);

C = massa do recipiente + amostra submersa em água (g).

Figura 16 - Execução do Rice Test.



De posse dos valores de  $V_v$  dos corpos de prova com os diferentes teores de ligante escolhidos no processo de dosagem, plotou-se o gráfico de volume de vazios *versus* teor de ligante (Figura 17). No gráfico da Figura 17 identificou-se como sendo 4,5% o provável teor de ligante dito ótimo, associado ao valor de 4% de volume de vazios para a mistura. O valor encontrado no gráfico mostrou-se praticamente idêntico ao teor inicial estimado pelo método da superfície específica.

Uma mistura foi confeccionada utilizando o teor de 4,5% de ligante asfáltico, e os parâmetros volumétricos foram obtidos e registrados na Tabela 7. Observou-se a concordância dos parâmetros volumétricos da mistura com os limites estabelecidos pela norma, portanto o teor de 4,5% de ligante asfáltico foi determinado como ótimo para a mistura e adotado nesta pesquisa.

Figura 17 – V<sub>v</sub> x Teor de ligante.

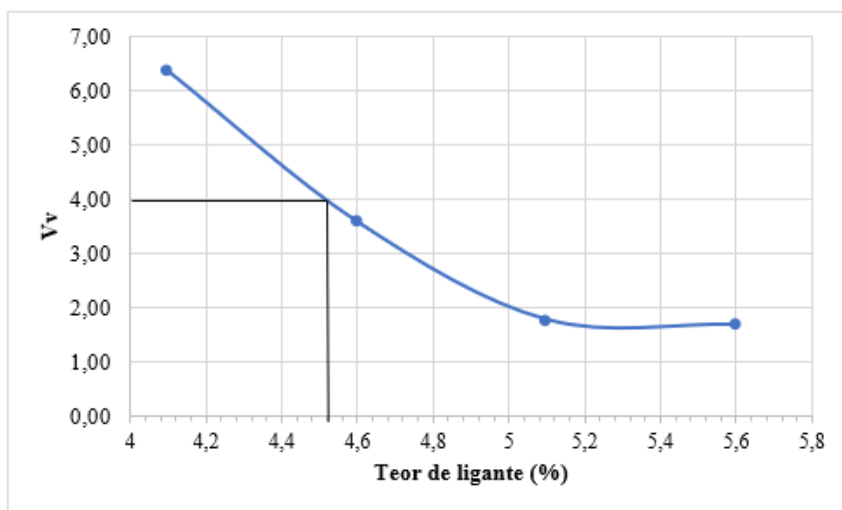


Tabela 7 – Parâmetros volumétricos para a mistura com teor ótimo de ligante puro.

<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>%Gmm</b>	<b>%V<sub>v</sub></b>	<b>%VAM</b>	<b>P/A</b>
4,5	95,84	4,16	15,02	1,08

### 3.2.6 Determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Os corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos foram moldados utilizando a mesma composição granulométrica e mesmo teor de ligante asfáltico, alterando apenas o ligante utilizado entre o CAP 50/70 puro e o ligante modificado com nanoTiO<sub>2</sub>. Deste modo, esperou-se que os resultados dos ensaios mecânicos refletissem o efeito da adição das nanopartículas de TiO<sub>2</sub> ao ligante asfáltico.

A caracterização mecânica das misturas asfálticas foi realizada por meio dos ensaios de Estabilidade Marshall, Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Módulo Dinâmico (MD) e Flow Number (FN).

### 3.2.6.1 Estabilidade Marshall

A estabilidade Marshall, apesar de contestada por alguns autores pela dispersão dos seus resultados, ainda é um dos parâmetros mais avaliados no Brasil (LEAL, 2013). Segundo Costa (2017) o valor da estabilidade Marshall mede, de forma indireta, a resistência ao cisalhamento, o intertravamento e o atrito conferidos pela fricção interna e coesão entre as partículas da mistura asfáltica. O equipamento simples e relativamente barato permite sua instalação nos laboratórios em praticamente qualquer laboratório de campo.

Os corpos de prova foram colocados em banho-maria a 60°C por um período de 30 a 40 minutos, procedimentos estes estabelecidos pela norma DNIT ME 043/95. Após esse período, os corpos de prova foram levados a prensa Marshall, sendo submetidos a uma carga de compressão com taxa de carregamento de 5 cm/minuto, até a ruptura.

A carga máxima de compressão suportada pelo corpo de prova no momento da ruptura é denominada de estabilidade Marshall, sendo expressa em Kgf.

Figura 18 – Execução do ensaio de estabilidade Marshall.



Figura 19 – Aspecto do corpo de prova após a ruptura.



### 3.2.6.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

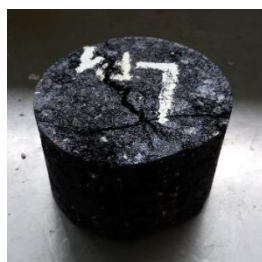
O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro em 1943, com o objetivo de avaliar a resistência à tração de concreto de cimento Portland. Este também é conhecido como “ensaio brasileiro” e determina a resistência à tração indireta por meio da compressão diametral de corpos de prova cilíndrico carregados verticalmente. Desde 1972 passou a ser utilizado também para avaliação de misturas asfálticas (BUDNY, 2012).

O ensaio foi realizado segundo os procedimentos descritos pela norma brasileira DNIT ME 136/10. Consiste na aplicação de um esforço de compressão diametral estático ao longo de duas geratrizes opostas à velocidade constante de 0,8 mm/s, em corpos de prova cilíndrico à temperatura de 25°C. A aplicação das forças ocorreu por meio de frisos metálicos com comprimentos iguais ao do corpo de prova, a fim de garantir a distribuição do carregamento ao longo das duas geratrizes opostas (Figura 20).

Figura 20 – Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Figura 21 – Aspecto do corpo de prova após o ensaio de RT.



A resistência à tração foi determinada pela Equação (4):

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$\sigma_t$  = resistência à tração;

F = carga de ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova.

### 3.2.6.3 Módulo de resiliência (MR)

A análise das características de deformabilidade de misturas asfálticas sob circunstâncias dinâmicas e no regime viscoelástico é realizada por meio do ensaio de módulo de resiliência. O módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) gerada pela tensão aplicada repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico, e a correspondente deformação específica horizontal resiliente ( $\epsilon_r$ ). A deformação resiliente é a deformação elástica ou recuperável das camadas de pavimentos submetidos a carregamentos repetidos (TAVARES, 2012).

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado segundo os procedimentos descritos pela norma brasileira NBR 16018/2011, em um equipamento composto por um sistema pneumático de carregamento com controle da frequência e do tempo de aplicação da carga, um sistema de medição do deslocamento axial dos corpos de prova – LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) e um software para coleta e análise de dados (Figura 22). Durante o ensaio, os corpos de prova cilíndricos foram submetidos a carregamentos repetidos, em compressão diametral, com valor igual a 10% da força do ensaio de RT, num intervalo de 0,1 segundo e repouso de 0,9 segundo. O carregamento gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga e os sensores LVDT medem o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal. Esta aplicação de carga simula o efeito proveniente da ação do tráfego no pavimento. O valor do módulo de resiliência foi calculado pela Equação (5):

$$MR = \frac{F}{\Delta x H} x (0,9976\mu + 0,2692) \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

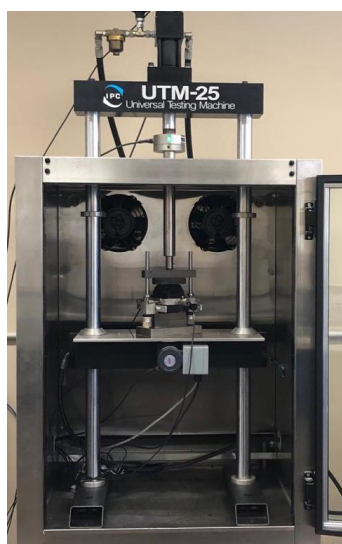
F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova (N);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente;

H = altura do corpo de prova (cm);

$\mu$  = Coeficiente de Poisson (adimensional).

Figura 22 – Execução do ensaio de módulo de resiliência.



#### 3.2.6.4 Módulo dinâmico (MD)

As misturas asfálticas possuem propriedades elásticas, viscosas e plásticas, sendo que no campo das pequenas deformações são apresentadas somente as propriedades viscoelásticas. O módulo complexo visa caracterizar as propriedades viscoelásticas lineares do material, bem como contabilizar os efeitos dos diferentes climas e tráfegos, através da variação de temperatura e frequência do ensaio. Por definição, o módulo complexo ( $E^*$ ) é um número complexo que relaciona tensão e deformação para materiais viscoelásticos sujeitos a carregamento senoidal aplicado num certo domínio de frequência. O valor absoluto do módulo complexo é conhecido como módulo dinâmico  $|E^*|$ . O módulo dinâmico tem sido a base para o desenvolvimento de

modelos de previsão para caracterizar a resposta tensão/deformação de misturas asfálticas, sendo calculado pela Equação (6) (CONCEPA/ANTT, 2017).

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

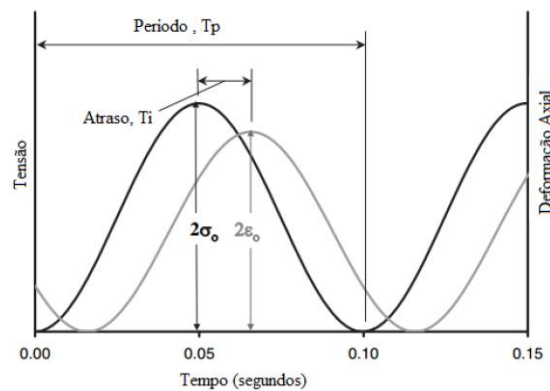
$|E^*|$  = módulo dinâmico (MPa);

$\sigma_0$  = amplitude de tensão;

$\varepsilon_0$  = amplitude de deformação.

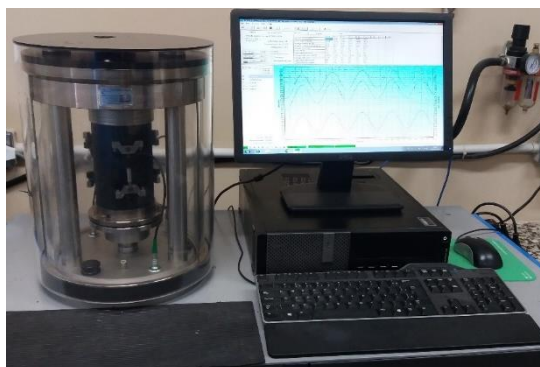
O ensaio foi realizado na AMPT – *Asphalt Mixture Performance Tester* (Figura 24), seguindo os procedimentos descritos pela norma AASHTO TP – 62/2009, aplicando um carregamento senoidal em corpos de prova de 150 mm de altura e 100 mm de diâmetro. A tensão aplicada e a deformação axial recuperável (medida com LVDTs) foram utilizadas para o cálculo do módulo dinâmico. O ensaio foi realizado nas temperaturas de 4 °C, 21 °C e 37°C, em seis frequências de carregamento (0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25 Hz) para cada temperatura, com o objetivo de construir a curva mestre que incorpore o efeito das variáveis citadas.

Figura 23 – Esquema do carregamento no ensaio de módulo dinâmico.



Fonte: Barros (2017).

Figura 24 – Execução do ensaio de módulo dinâmico.

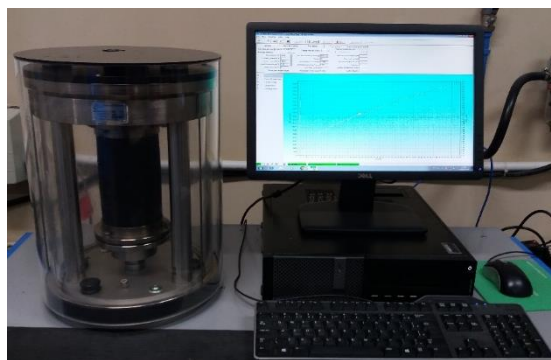


### 3.2.6.5 *Flow Number* (FN)

O ensaio denominado de *Flow Number* tem por objetivo avaliar a resistência à deformação permanente de uma mistura asfáltica. O ensaio simula a condução de um veículo pesado repetidamente sobre a estrutura do pavimento. O *Flow Number* é definido como o número de repetições de carga em que a deformação de cisalhamento se inicia, sob volume constante. A partir do ciclo referente ao FN a deformação permanente ocorre a volume constante e a taxa de deformação volta a subir, visto que a amostra não oferece mais resistência aos carregamentos (COSTA, 2017).

O ensaio foi realizado na AMPT (Figura 25), seguindo os procedimentos descritos na norma brasileira NBR 16505 /2016, a temperatura de 60°C e ciclos de carga uniaxial compressiva de 200 kPa. Os corpos de prova utilizados no ensaio possuíam aproximadamente 150 mm de altura, 100 mm de diâmetro e volume de vazios de  $7\% \pm 0,5\%$ . O carregamento foi aplicado num intervalo de 0,1 segundo com repouso de 0,9 segundo, até atingir o critério de parada de 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 *microstrains*.

Figura 25 – Realização do ensaio de *Flow Number*.





### 3.2.6.6 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada

A fadiga pode ser definida como o fenômeno que ocorre quando cargas cíclicas produzem a ruptura dos materiais com cargas menores que aquelas necessárias durante a aplicação de cargas estáticas. A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura ou vida de serviço. A vida de fratura refere-se ao número total de aplicações de certa carga necessária para ocorrer à fratura completa da amostra. A vida de serviço refere-se ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho da amostra a um nível preestabelecido (BERNUCCI et al., 2010). Existem diversos ensaios para analisar a fadiga de um determinado material. Devido a facilidade de execução, o ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada é o mais usual no Brasil.

O ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada foi realizado numa frequência de pulso de 1 Hz, sendo 0,1 s para aplicação de carga senoidal e 0,9 s de repouso, adotando os níveis de tensão de 40%, 45% e 50% da resistência à tração estática da mistura, a uma temperatura de 25°C. Inicialmente optou-se por realizar o ensaio nos níveis de tensão de 30%, 40% e 50% da resistência à tração da mistura, no entanto o nível de tensão de 30% demandou muito tempo para conclusão do ensaio, inviabilizando sua utilização nesta pesquisa. A vida de fadiga (N) foi definida como o número total de aplicações de carga suficiente para levar a amostra a um colapso estrutural, sendo expressa pelas Equações (7) e (8):

$$N = k_1 \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^{K_2} \quad \text{Equação (7)}$$

$$N = k_3 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{K_4} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

N = vida de fadiga ou número de aplicações de carga;

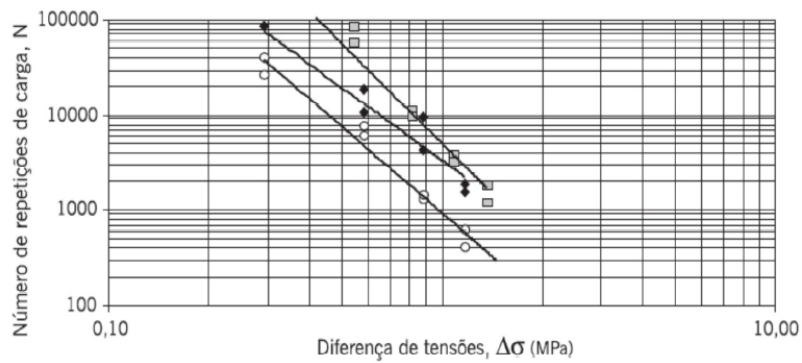
$\Delta\sigma$  = diferença de tensões no centro do corpo de prova;

$\sigma_t$  = tensão de tração;

$k_1, k_2, k_3, k_4$  = constantes determinadas experimentalmente.

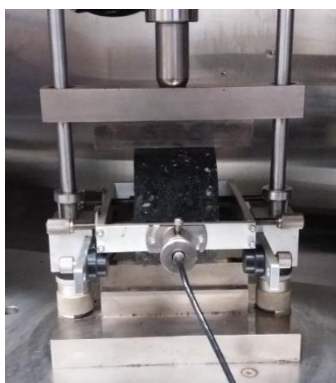
A partir do número de aplicações de carga (N), plotou-se o gráfico logarítmico N em função da diferença entre a tensão máxima horizontal e vertical no centro do corpo de prova ( $\Delta\sigma$ ), como o ilustrado pela Figura 26.

Figura 26 – Exemplo de curva de fadiga.



Fonte: Bernucci et al. (2010).

Figura 27 – Execução do ensaio de fadiga por compressão diametral.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de propriedades mecânicas das misturas confeccionadas com CAP 50/70 puro e com o ligante modificado com nanopartículas de dióxido de titânio modificadas superficialmente.

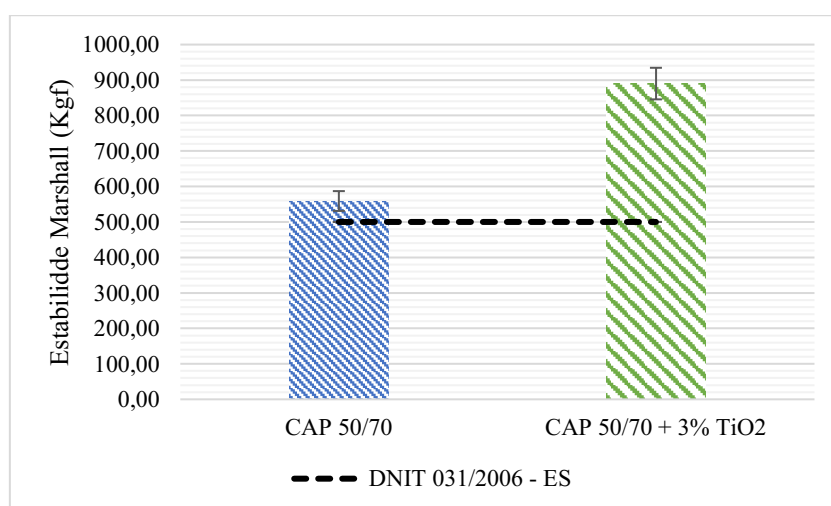
### 4.1 Estabilidade Marshall

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos no ensaio de estabilidade Marshall, bem como o valor mínimo estabelecido pela norma DNIT 031/2006 – ES para misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento.

Na Figura 28 observa-se que todas as misturas atingiram valores superiores ao valor mínimo de 500 kgf especificado pela norma DNIT 031/2006 – ES. Além disso, nota-se que a adição do modificador promoveu um aumento de 59,23% na estabilidade Marshall da mistura.

Shafabakhsh e Ani (2015) encontraram resultados semelhantes para a estabilidade Marshall de misturas asfálticas modificadas com nanoTiO<sub>2</sub> e nanoSiO<sub>2</sub>. Segundo os autores, o aumento da estabilidade Marshall das misturas confeccionadas com o ligante nanomodificado pode ser explicado pelo aumento da rigidez do ligante devido a propriedades únicas das nanopartículas, citando como exemplo a alta dureza.

Figura 28 – Resultados do ensaio de estabilidade Marshall.



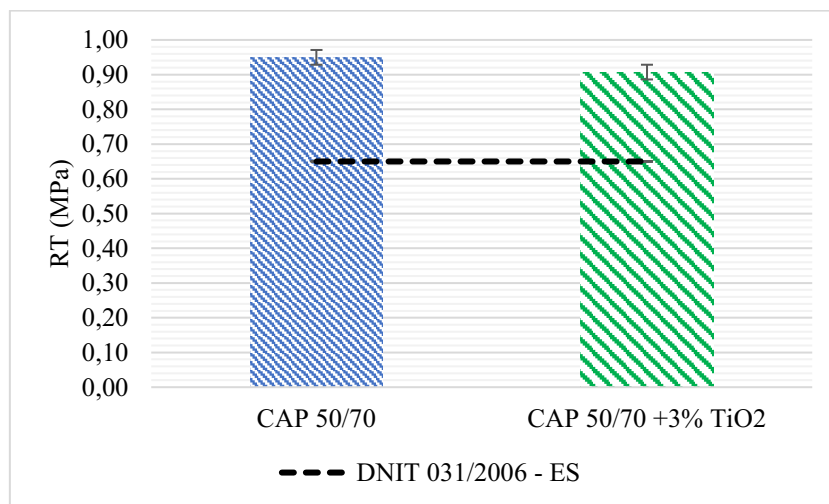
De acordo com Leandro (2016) a estabilidade Marshall não é um parâmetro eficiente para indicar se uma determinada mistura é propensa a apresentar comportamento plástico em pista devido as solicitações do tráfego. Bernucci et al. (2010) destacam que, embora o ensaio de estabilidade Marshall seja prático e historicamente importante, não é apropriado para previsão de desempenho dos pavimentos.

#### 4.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

A Figura 29 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração para as misturas estudadas, bem como o valor mínimo de RT de 0,65 MPa definido pela norma DNIT 031/2006 – ES para misturas asfálticas.

Analisando a Figura 29, verifica-se que tanto a mistura com o ligante puro quanto a mistura modificada com  $\text{TiO}_2$  apresentam resistência à tração superior ao requisito mínimo estabelecido pelo DNIT. Considerando o desvio padrão das amostras, as misturas estudadas apresentaram valores similares. Em termos absolutos, a adição das nanopartículas de dióxido de titânio não produziu benefícios na resistência à tração da mistura.

Figura 29 – Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Gama (2016) afirma que o ensaio de tração indireta promove um estado biaxial de tensões que se aproxima bastante das condições produzidas na base das camadas de rolamento por uma carga de roda, e está relacionado com a viscosidade do ligante.

Melo (2014) observou aumento da resistência à tração para misturas modificadas com nanocompósitos com nanotubos de carbono. Segundo o autor, a melhora do desempenho mecânico observado estaria diretamente relacionada com a maior rigidez ocasionada pela adição das nanopartículas. Resultado similar foi obtido por Marcon (2016) e Carlesso (2017), que atribuem os elevados valores de resistência à tração observados para as misturas nanomodificadas ao aumento de rigidez do ligante asfáltico.

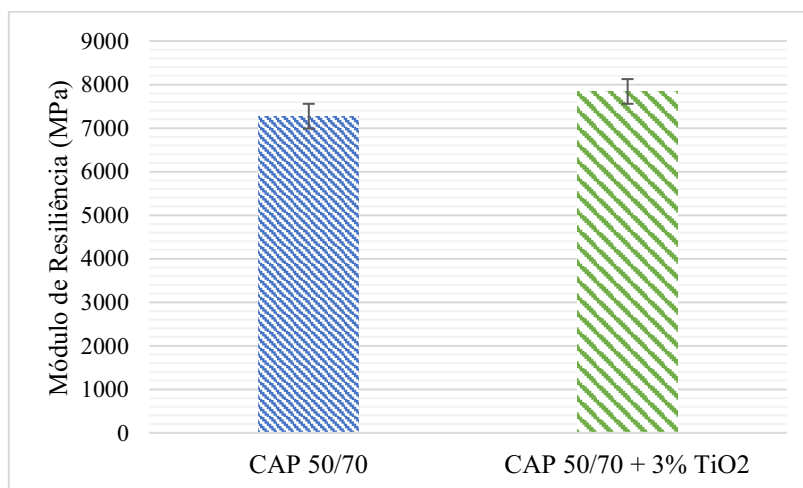
Visto que a caracterização empírica do ligante modificado com  $\text{TiO}_2$  evidenciou aumento da rigidez quando comparado ao CAP 50/70 puro, esperava-se um aumento da resistência à tração da mistura modificada assim como observado nos estudos citados anteriormente envolvendo modificação de ligantes asfálticos com nanomateriais.

#### 4.3 Módulo de resiliência (MR)

A Figura 30 apresenta os resultados do ensaio de módulo de resiliência obtidos a temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . Bernucci et al. (2010) afirmam que para a temperatura de  $25^\circ\text{C}$  os valores típicos de módulo de resiliência estão na faixa de 2.000 MPa a 8.000 Mpa. Os valores de MR encontrados para ambas as misturas estudadas estão dentro do intervalo citado.

Analisando a Figura 30, verifica-se que a modificação do ligante com  $\text{TiO}_2$  não promoveu aumento significativo no valor do módulo de resiliência da mistura. Este resultado se contrapõe ao observado por Shafabakhsh e Ani (2015) que relataram um aumento dos valores de MR para misturas com  $\text{nanoTiO}_2$  e  $\text{nanoSiO}_2$  quando comparadas as misturas convencionais.

Figura 30 – Módulo de resiliência das misturas a  $25^\circ\text{C}$ .



#### 4.4 Módulo dinâmico (MD)

Os resultados do ensaio de módulo dinâmico estão apresentados na forma de curvas mestras, na temperatura de referência de 21°C, utilizando o princípio de superposição tempo-temperatura. As curvas mestras foram elaboradas por meio dos dados de módulo dinâmico para três temperaturas e seis frequências de carregamento. Segundo Otto (2009) esta representação gráfica, na forma de uma curva contínua, fornece informações sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. As Figuras 31 e 32 apresentam as curvas mestras para as misturas com CAP puro e com ligante modificado com nanoTiO<sub>2</sub>, respectivamente.

Figura 31 – Curva mestra da mistura com CAP 50/70 puro.

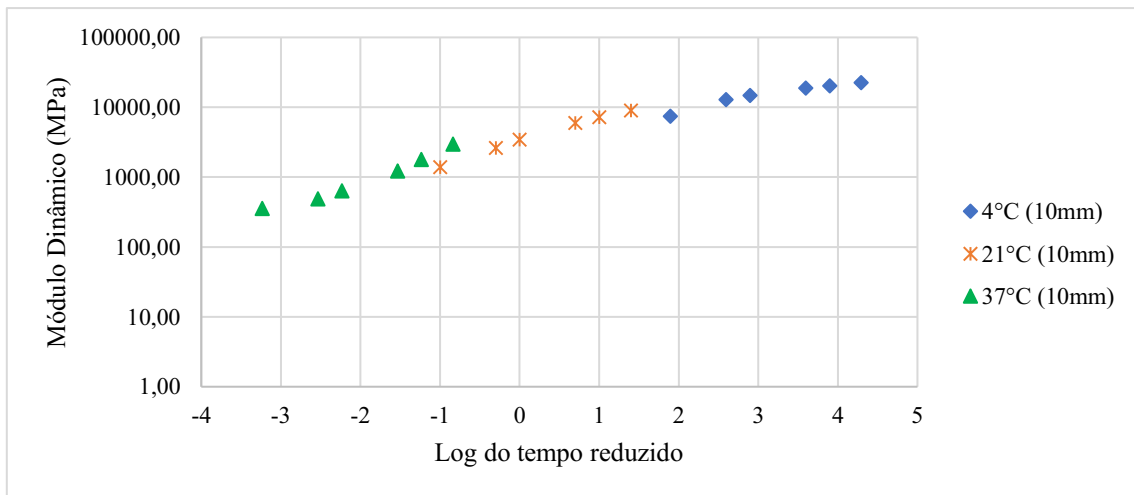
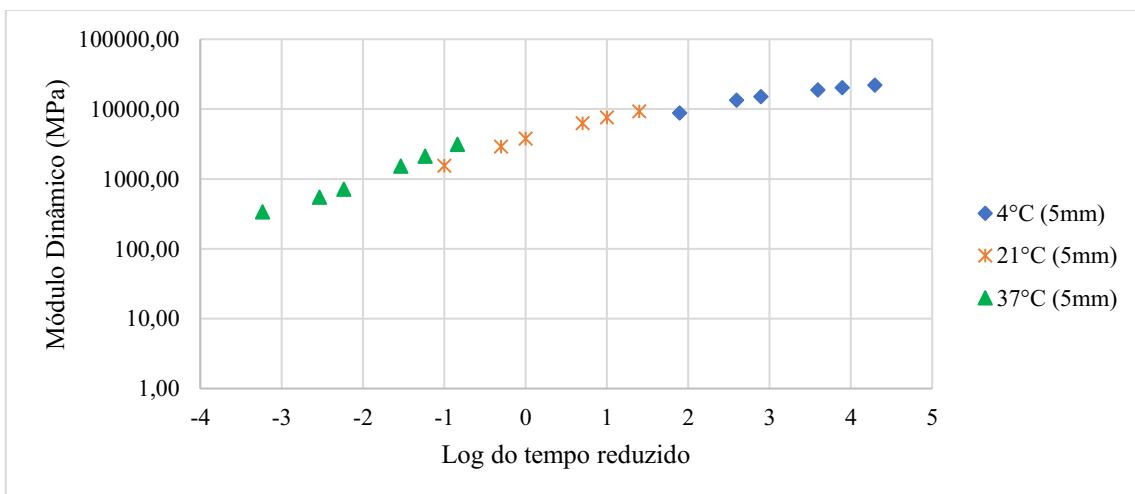
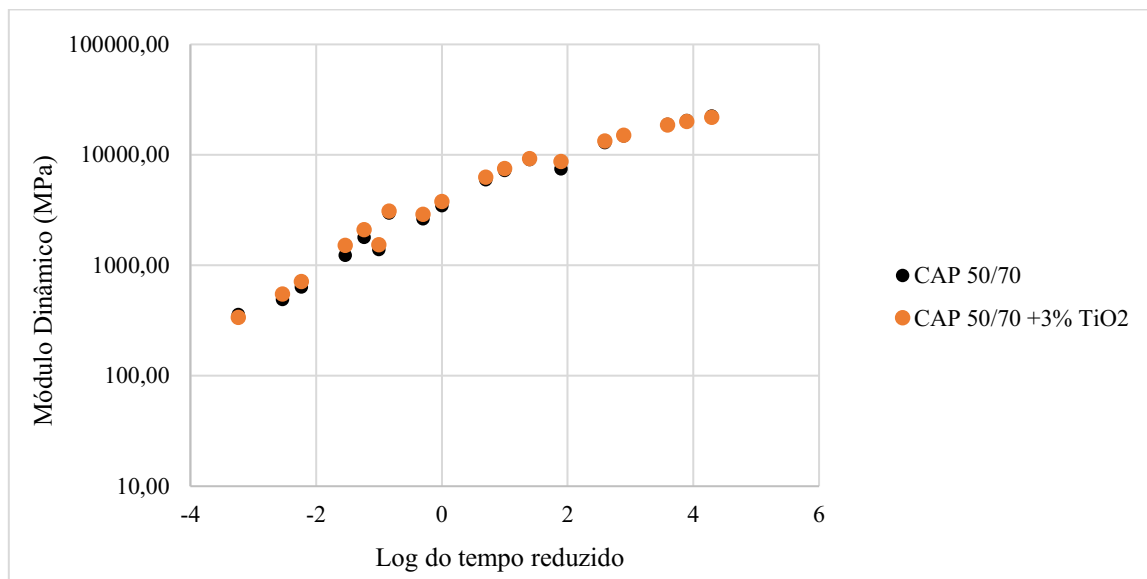


Figura 32 – Curva mestra da mistura com ligante modificado com 3% de TiO<sub>2</sub>.



A partir da Figura 33 nota-se que as curvas mestras das misturas estudadas apresentam comportamento semelhante quanto a redução do módulo dinâmico com o aumento da temperatura. Segundo Costa (2017) e Barros (2018) esse resultado já era esperado, pois o módulo dinâmico, assim como o módulo de resiliência, é uma medida de rigidez da mistura, sendo susceptível a mudança de temperatura. A rigidez das misturas também caiu com a diminuição da frequência de aplicação de carga.

Figura 33 – Curvas mestras das misturas avaliadas.



Observa-se que a mistura com ligante modificado com nanoTiO<sub>2</sub> apresentou rigidez similar a mistura com CAP 50/70 puro. Ambas as curvas apresentam uma inclinação suave, que segundo Rossato (2015) e Otto (2009) representa um comportamento viscoelástico do material. Uma curva mestra que forma uma linha horizontal caracteriza uma mistura com comportamento puramente elástico, enquanto que uma curva mestra vertical corresponde a uma mistura muito susceptível às variações de frequência e de temperatura.

As Figuras 34, 35 e 36 apresentam os resultados do ensaio de MD por temperatura de ensaio. O aumento da rigidez da mistura pela adição de TiO<sub>2</sub> pode ser observado apenas para as temperaturas de ensaio mais elevadas (21°C e 37°C). Todavia, assim como no ensaio de MR esse aumento de rigidez não foi significativo, mantendo-se na mesma ordem de grandeza para as misturas estudadas.

Figura 34 – Módulo dinâmico (4°C).

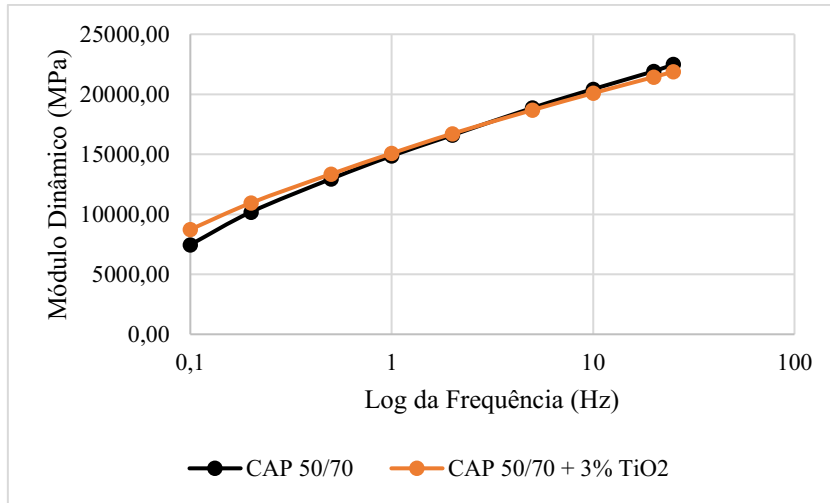


Figura 35 – Módulo dinâmico (21°C).

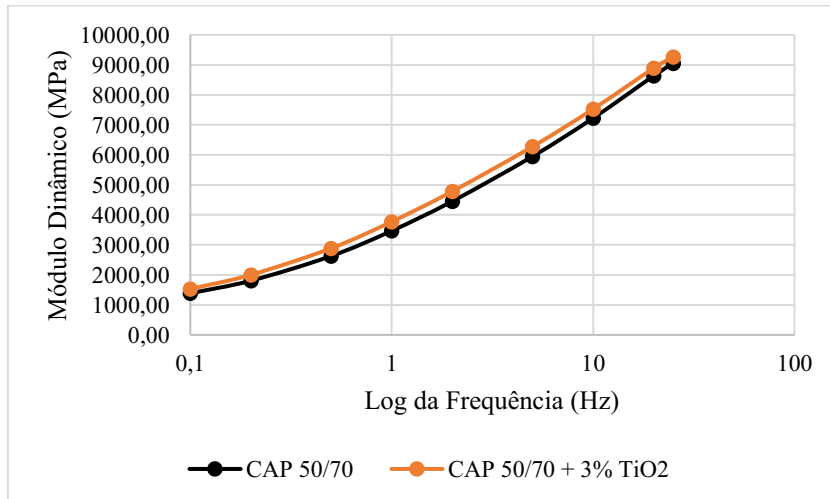
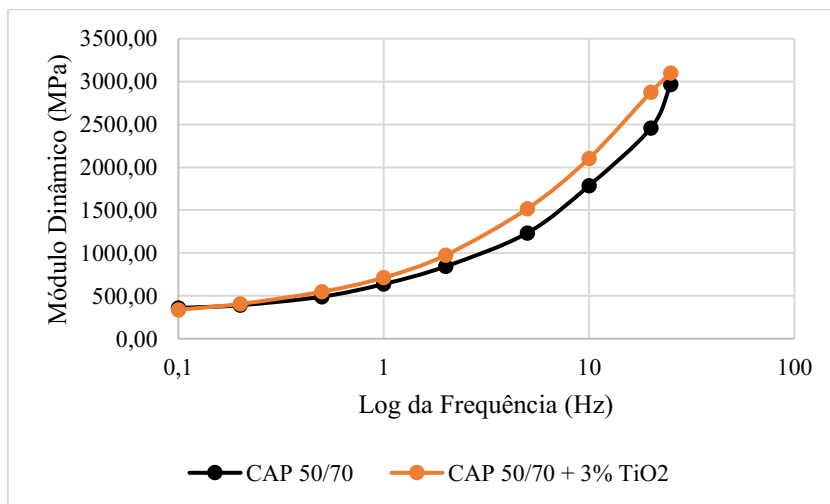


Figura 36 – Módulo dinâmico (37°C).





As Figuras 37, 38 e 39 apresentam os ângulos de fase referentes às frequências de carregamento em cada uma das temperaturas de ensaio. Segundo Cruz (2018), o ângulo de fase é uma propriedade viscoelástica do material, com valores elevados indicando maior viscosidade e menor elasticidade. Observa-se que o ângulo de fase aumenta à medida que a temperatura aumenta e diminui conforme o aumento da frequência. Todavia, na temperatura de 37°C o ângulo de fase diminui para baixas frequências e aumenta em frequência maiores.

Cruz (2018) explica que esse fenômeno está relacionado à presença de agregados na mistura, para o ligante o ângulo de fase aumenta de maneira contínua, porém, com a presença dos agregados na mistura esse valor tende a aumentar com a temperatura. Costa (2017) sugere que a relação entre o ângulo de fase em baixa temperatura e alta frequência é atribuída ao ligante, enquanto que em alta temperatura e baixa frequência é afetado pelo agregado.

Figura 37 – Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (4°C).

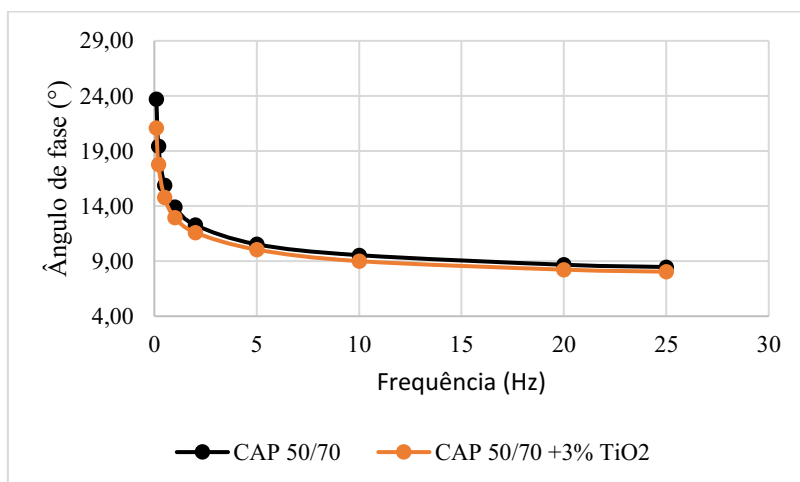


Figura 38 – Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (21°C).

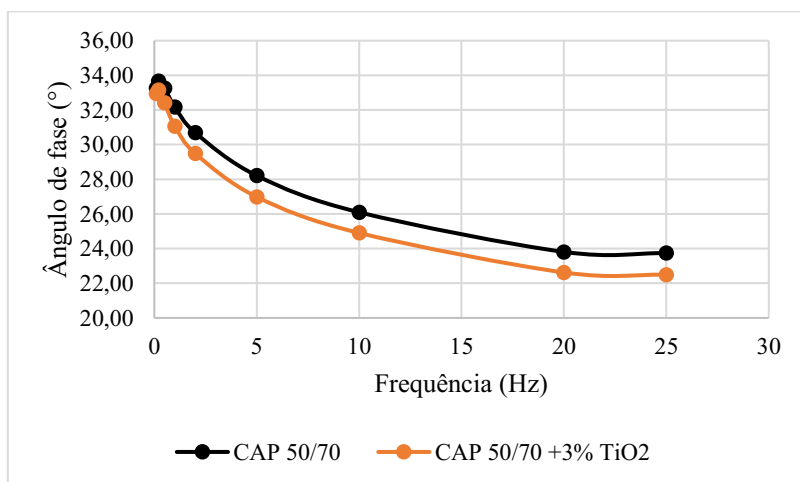
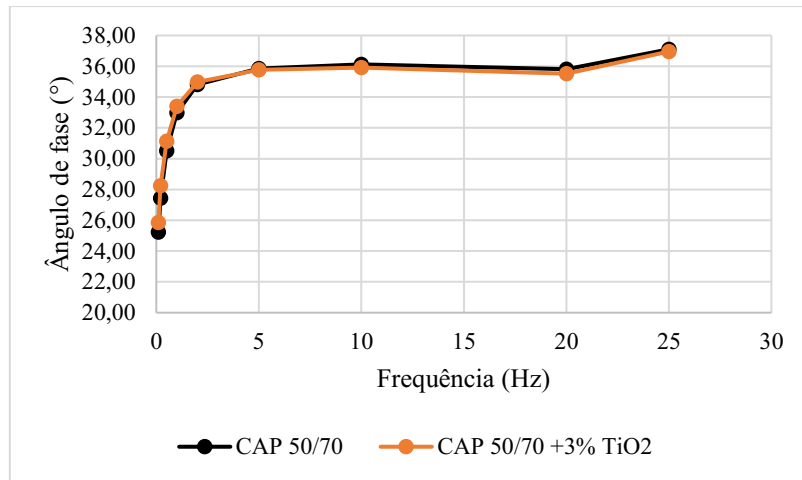


Figura 39 – Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (37°C).



#### 4.5 Flow Number (FN)

A Figura 40 apresenta os resultados médios do ensaio de *Flow Number* com os respectivos desvios padrões. Observa-se que a mistura com 3% de nanoTiO<sub>2</sub> apresentou *Flow Number* superior à mistura convencional com CAP 50/70 puro.

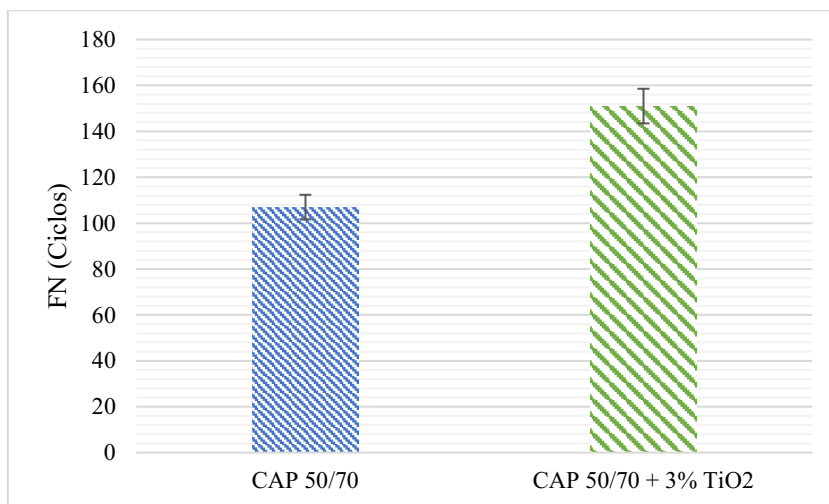
Segundo Costa (2017) esse resultado indica uma maior resistência à deformação permanente, dado que a mistura suportou um maior número de ciclos até alcançar o ponto de transição da zona com taxa de deformação permanente constante para a zona de ruptura. Resultados semelhantes foram encontrados por Shafabakhsh e Ani (2015). Segundo os autores, o aumento da resistência à deformação permanente deve-se ao aumento da adesão entre o ligante asfáltico nanomodificado e os agregados presentes na mistura.

Bernucci et al. (2010) afirmam que o aumento da resistência à deformação permanente da mistura está relacionado ao aumento da viscosidade do ligante asfáltico, como efeito benéfico do retorno elástico na redução da energia de deformação.

Nascimento (2008) estabeleceu uma relação entre os valores de FN para misturas asfálticas com níveis de tráfego recomendados para que as misturas apresentem desempenho satisfatório em campo quanto a deformação permanente. Segundo o autor, misturas asfálticas com FN superior a 300 ( $FN > 300$ ) seriam recomendadas para nível de tráfego médio, enquanto que misturas com FN superior a 750 ( $FN > 750$ ) seriam recomendadas para nível tráfego pesado.

Avaliando os parâmetros de referência sugeridos por Nascimento (2008) pode-se perceber que nenhuma das misturas atingiu o critério para o nível de tráfego médio. Barros (2017) afirma que os parâmetros sugeridos por Nascimento (2008) são conservadores, havendo a necessidade de se estudar a deformação permanente das misturas asfálticas e buscar materiais mais resistentes ou sugerir novos valores de referências.

Figura 40 – Resultado do ensaio de *Flow Number*.



A Tabela 8 apresenta os valores mínimos de *Flow Number* recomendados pelo *Advanced Asphalt Technologies* (2011) para quatro regiões de tráfego distintas (leve, médio, pesado e extremamente pesado). De acordo com a Tabela 8, todas as misturas avaliadas podem ser submetidas ao nível médio de tráfego, com FN mínimo de 53.

Tabela 8 – Valores mínimos de *Flow Number* recomendados para diferentes níveis de tráfego.

	<b>Nível de tráfego</b>			
	<b>Leve</b>	<b>Médio</b>	<b>Pesado</b>	<b>Extremamente Pesado</b>
<b>ESALs</b>	$< 3 \times 10^6$	$> 3 \times 10^6$ e $< 1 \times 10^7$	$> 1 \times 10^7$ e $< 3 \times 10^7$	$\geq 3 \times 10^7$
<b>FN (Ciclos)</b>	-	53	190	740

Adaptado de *Advanced Asphalt Technologies* (2011).

#### 4.6 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada

Os resultados do ensaio de fadiga estão representados nas Figuras 41 e 42, que descrevem a vida de fadiga por meio das relações “número de repetições de carga *versus* diferença de tensões” e “número de repetições de carga *versus* deformações específicas resilientes”. Para cada uma das curvas foi determinada a equação que melhor se adequou as respectivas linhas de tendência, como explicado no tópico 3.2.6.6. As Tabelas 9 e 10 apresentam um resumo dos resultados obtidos no ensaio para o CAP 50/70 puro e o ligante modificado com TiO<sub>2</sub>, respectivamente.

Determinou-se também o coeficiente de determinação R<sup>2</sup> para cada linha de tendência, correspondente à qualidade do ajuste do modelo em relação aos pontos e os parâmetros k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> e k<sub>4</sub> das equações. Os resultados estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 9 – Resumo dos resultados de fadiga para o CAP 50/70.

<b>% RT</b>	<b>Carga (N)</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_i</math></b>	<b>N</b>
50	4886	1,90	0,0000653	1271
50	4886	1,90	0,0000653	1491
45	4397	1,71	0,0000588	7636
40	3908	1,52	0,0000522	24032

Tabela 10 – Resumo dos resultados de fadiga para o CAP 50/70 + 3% TiO<sub>2</sub>.

<b>% RT</b>	<b>Carga (N)</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_i</math></b>	<b>N</b>
50	4596	1,82	0,0000580	2486
50	4596	1,82	0,0000580	3151
45	4136	1,64	0,0000522	22864
40	3676	1,46	0,0000464	47323

Tabela 11 – Resumo das características das curvas de vida de fadiga.

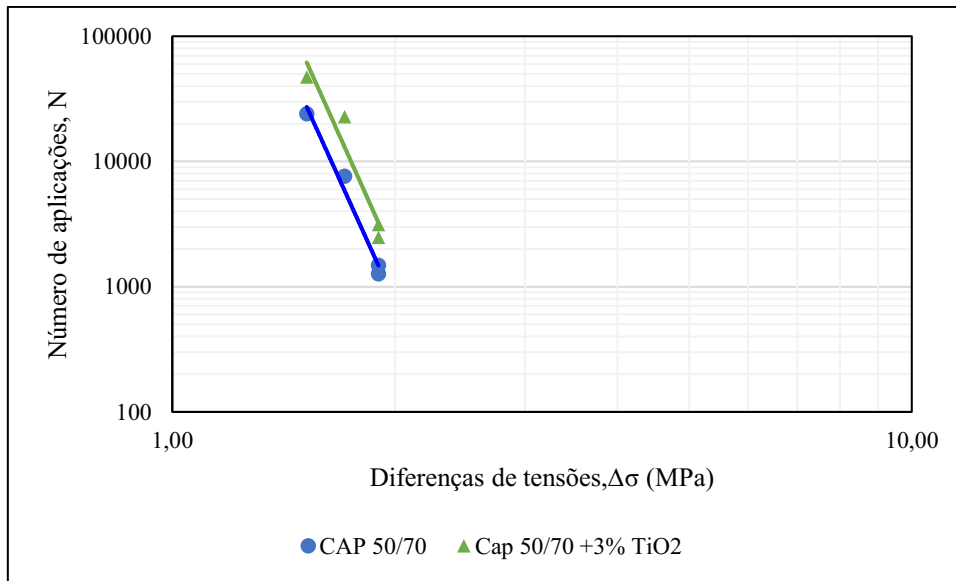
Mistura	Equações		Parâmetros	
	$N \times \Delta \sigma$	$R^2$	$K_1$	$K_2$
CAP 50/70	$6,47 \times 10^6 \left( \frac{1}{\Delta \sigma} \right)^{13,064}$	0,9814	$6,47 \times 10^6$	13,06
	$N \times \varepsilon_i$	$R^2$	$K_3$	$K_4$
	$4,77 \times 10^{-52} \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{13,020}$	0,9804	$4,77 \times 10^{-52}$	13,020
CAP 50/70 +3% TiO <sub>2</sub>	$N \times \Delta \sigma$	$R^2$	$K_1$	$K_2$
	$8,78 \times 10^6 \left( \frac{1}{\Delta \sigma} \right)^{13,197}$	0,9281	$8,78 \times 10^6$	13,197
	$N \times \varepsilon_i$	$R^2$	$K_3$	$K_4$
	$4,00 \times 10^{-53} \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{13,197}$	0,9281	$4,00 \times 10^{-53}$	13,197

Segundo Cavalcanti (2010), é possível realizar uma análise comparativa entre as curvas de fadiga de misturas diferentes apenas quando os módulos de resiliência de ambas estão na mesma ordem de grandeza. Caso contrário, as misturas mais rígidas tendem a absorver mais tensões, gerando maiores valores de tensões de tração. Tendo em vista a proximidade dos valores de MR para as misturas estudadas, pode-se proceder com a comparação gráfica entre as respectivas curvas de fadiga.

Observa-se na Tabela 11 que ambos os modelos utilizados apresentaram valores de  $R^2$  próximos de 1, indicando baixa dispersão dos resultados. A mistura com CAP 50/70 puro apresentou menores valores de  $R^2$ .

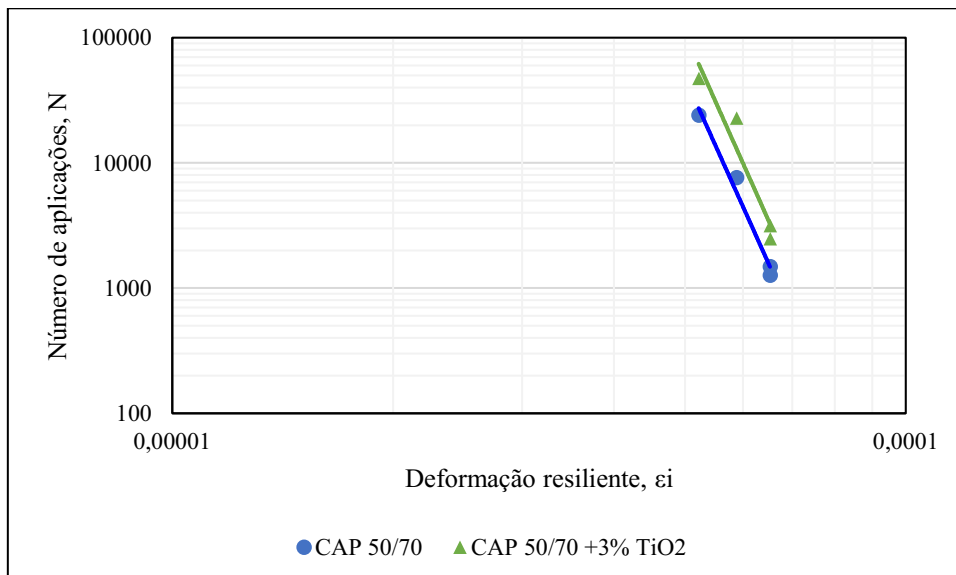
Analisando a Figura 41, pode-se notar que a mistura modificada com TiO<sub>2</sub> apresentou número de aplicações (N) superior a mistura convencional em todos os níveis de tensão, sobretudo nos níveis mais baixos (45% e 40%). O coeficiente  $K_2$  presente na Tabela 11 assumiu valores elevados e próximos entre si para as duas misturas estudadas. Dado que o parâmetro  $K_2$  representa o coeficiente angular da curva  $\Delta \sigma \times N$ , este resultado indica que as misturas avaliadas apresentam resistência à fadiga elevada apenas para baixas diferenças de tensões.

Figura 41 – Número de aplicações de carga (N) x Diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ).



Avaliando a curva N x  $\epsilon_i$  na Figura 42 e os valores de  $K_4$  na Tabela 11, nota-se um comportamento idêntico ao observado durante a análise da curva N x  $\Delta\sigma$ : a mistura modificada com TiO<sub>2</sub> apresentou melhor desempenho em todas as deformações resilientes, especialmente para deformações resilientes menores.

Figura 42 – Número de aplicações de carga (N) x Deformação específica resiliente ( $\epsilon_i$ ).



## 5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa estudou a influência da adição de nanopartículas de dióxido de titânio no comportamento mecânico de ligantes asfálticos. Por meio da análise dos resultados obtidos no decorrer do estudo, conclui-se que:

- todas as misturas avaliadas, confeccionadas com CAP 50/70 puro e com o ligante modificado com  $\text{TiO}_2$ , apresentaram estabilidade Marshall e resistência à tração superiores aos valores estabelecidos pelas normas vigentes. A mistura com  $\text{TiO}_2$  apresentou estabilidade Marshall superior a mistura com CAP 50/70 puro, embora tenha apresentado RT ligeiramente inferior a mistura de controle;
- nos ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico, observou-se que as misturas avaliadas apresentaram valores de módulo da mesma ordem de grandeza, não sofrendo influência pela adição do  $\text{TiO}_2$ . Assim como no ensaio de RT, os resultados dos ensaios de módulo não seguiram a tendência observada em outros estudos envolvendo ligantes modificados com dióxido de titânio;
- a mistura modificada com  $\text{TiO}_2$  apresentou *Flow Number* superior a mistura com CAP 50/70 puro, evidenciando uma melhora na resistência da mistura à deformação permanente. O aumento do FN para a mistura modificada com  $\text{TiO}_2$  não alterou a classificação da mistura quanto ao nível de tráfego recomendado, mantendo a classificação de tráfego médio obtida para a mistura produzida com CAP 50/70 puro;
- no ensaio de fadiga por compressão diametral, observou-se um aumento da resistência à fadiga da mistura modificada com  $\text{TiO}_2$ , que alcançou valores maiores de N para todos os níveis de tensões estudados, principalmente nos níveis mais elevados. As curvas de fadiga apresentaram  $R^2$  próximo a 1 para as duas misturas estudadas.

## 5.1 Considerações finais

Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que a adição de nanopartículas de dióxido de titânio promoveu um aumento da resistência à deformação permanente e vida de fadiga para as misturas asfálticas estudadas. Entretanto, a mistura modificada com  $\text{TiO}_2$  não apresentou desempenho mecânico significativamente superior a mistura convencional de referência.

Visto que a modificação de misturas asfálticas com nanopartículas de dióxido de titânio segundo os procedimentos adotados nesta pesquisa não resultou em grandes vantagens de desempenho mecânico, a viabilidade do procedimento estudado depende de uma vantagem econômica que poderá ser constatada apenas com análises de custo mais elaboradas.

## 5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Tendo em vista os resultados obtidos no presente trabalho, têm-se as seguintes sugestões para o desenvolvimento de estudos futuros:

- a) Estudar a incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio em outras classes de ligantes asfálticos;
- b) Avaliar a viabilidade econômica (relação custo/benefício) da incorporação do  $\text{nanoTiO}_2$  ao ligante asfáltico em escala comercial;
- c) Estudar a modificação simultânea de ligantes asfálticos por nanopartículas distintas;
- d) Estudar no âmbito químico o efeito do tipo de nanomodificador na compatibilidade interna dos ligantes modificados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES, LLC. **A manual for design of hot mix asphalt with commentary**. NCHRP, Report 673, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C, 2011.

ÁLVAREZ MONTOYA, Andrés Camilo. **Produção de filmes de Dióxido de Titânio para aplicações fotovoltaicas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 62: Determining modulus of hot mix asphalt (HMA)**. Estados Unidos, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. Estados Unidos, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. Estados Unidos, 2012.

ARTERIS, Autopista Litoral Sul. **Avaliação de métodos e dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. Relatório Final, Curitiba, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Rio de Janeiro, 2011.

BALARIM, Caio Vinicius Morisco. **Desenvolvimento de nanocompósitos poliamida 11 / dióxido de titânio para aplicação na indústria petrolífera.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projetos e restauração.** São Paulo/SP. Oficina dos Textos, 2007.

BARROS, Ablenya Grangeiro de. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do óleo de milho.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

BARROS, Larissa Montagner de. **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de Flow Number de misturas quentes e mornas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BECK JÚNIOR, Watson. **Nanopartículas magnéticas recobertas com óxido de ferro: intensificação das propriedades magnéticas da nanopartícula e funcionalização para aplicação em biomedicina.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras - ABEDA, 2010. 475p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM. **Relatório Técnico 36 – Perfil do Titânio.** 2010.

BUDNY, Jaelson. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CARLESSO, Gabriela Ceccon. **Estudo do comportamento de mistura asfáltica modificada por nanoargila e polímero SBS.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CARLESSO, Gabriela Ceccon. **Resistência à fadiga de diferentes misturas asfálticas: um estudo comparativo entre misturas convencionais, modificadas com nanoargila e modificadas com borracha moída de pneu.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CAVALCANTI, Leonardo Santana. **Efeito de alguns modificadores de ligantes na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CONCEPA/ANTT. **Relatório final de pesquisa – análise comparativa das propriedades viscoelásticas de misturas asfálticas quentes e mornas.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial.** SEST SENAT, Brasília, 2018.

COSTA, Laiana Ferreira da. **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

CRUZ, Gabryelle Keith Avelino. **Influência das propriedades morfológicas e dos métodos de seleção granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

DANTAS, Luciana Nogueira. **Estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 083: Agregados – Análise granulométrica – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 136: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 031:** Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 043:** Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 054:** Equivalente de areia – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 035:** Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 081:** Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 131:** Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 084:** Agregado miúdo– Determinação da densidade real – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005:** Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

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

DIAS, Elisa Alexandra Lages. **Alteração das características superficiais de camadas asfálticas de pavimentos com nanopartículas e micropartículas: Estudo de envelhecimento.** Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho. 2013.

EVERTON SANTOS, Madson Ricardo. **Comportamento térmico, reológico e planejamento de ligantes asfálticos nanomodificados.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

GAMA, Dennyale Alves. **Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades dos ligantes asfálticos.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

KANDIEL, Tarek A.; ROBBEN, Lars; ALKAIM, Ayad; BAHNEMANN, Detlef. **Brookite versus anatase TiO<sub>2</sub> photocatalysts: phase transformations and photocatalytic activities.** Photochemical and Photobiological Sciences, 12, p. 602-609, 2013.

KIM, Y. Richard. **Modeling of asphalt concrete.** North Carolina: McGraw-Hill Professional, 2009.

LEAL, Claudio Luiz Dias. **Aproveitamento do bagaço da cana de açúcar em misturas asfálticas.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

LEANDRO, Rodrigo Pires. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

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

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

MARTINS, Adriana Tinoco. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MELLO, Marco Saulo. **Avaliação das propriedades reológicas e mecânicas de ligantes e misturas asfálticas irradiadas.** Teses (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MELO, João Victor Satub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MOURA, Edson de. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MURAYA, Patrick Mwangi. **Permanent deformation of asphalt mixtures.** Delf University of Technology, The Netherlands, 2007.

NASCIMENTO, L. A. H. do. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

OTTO, Gustavo Garcia. **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PAREDES TINAJEROS, Reynner Andre. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencional e modificada com polímero**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

PENA, Aline de Lima. **Dióxido de titânio para aplicação em células solares**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ, São João del-Rei, 2015.

RAMOS, Kleberson de Oliveira. **Estudo sobre misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para pavimento aeroportuário**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2012.

ROSSATO, Fábio Pereira. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferente ligantes em variadas temperaturas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SANTOS, Lidiaine Maria dos. **Síntese e caracterização de TiO<sub>2</sub> com modificações superficiais para aplicação em fotocatalise heterogênea**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SHAFABAKHSH, G. H.; ANI, O. Jafari. **Experimental investigation of effect of nano TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates**. Construction and Building Materials, p. 692-702, 2015.

SHAFABKSH, G. H.; MIRABDOLAZIMI, S. M.; SADEGHNEJAD, M. **Evaluation the effect of nano-TiO<sub>2</sub> on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, p. 566-571, 2014.

SHEN, Rui. **Surface Modification of Nanometer and Micron Sized Particles and Their Applications**. Department of Chemical Engineering. University of Rochester, Rochester, New York, 2009.

SILVA, Camila Cândida da; GOMES, Juliana Frutuoso. **Análise do desempenho funcional e mecânico do concreto asfáltico tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) para pavimentos aeroportuários**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2015.

SILVA, Gutemberg Gonçalves da. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SOBREIRO, Fernanda Pilati. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímeros SBS**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

TANZADEH, Javad; VAHEDI, Fariborz; KHEIRY, Pezhouhan T.; TANZADEH, Rashid. **Laboratory study on the effect of nano TiO<sub>2</sub> on rutting performance of asphalt pavements**. Advanced Materials Research, Vols. 622-623, pp. 990-994, 2013.

TAVARES, Diogo Santos. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas do tipo SMA com agregado siderúrgico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ZEGARRA, Jorge Rodolfo Escalante. **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76 -22**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.