



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

**ESTUDO SOBRE A AÇÃO DA MODIFICAÇÃO DOS LIGANTES  
ASFÁLTICOS POR MONTMORILONITA ORGANOFILIZADA COM  
GENAMIN NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS**

**Aluno: Daniel de Almeida Motta**

**Orientadoras: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça**

**Dr<sup>a</sup> Carina Silvani**

Campina Grande – PB

Dezembro 2018

**ESTUDO SOBRE A AÇÃO DA MODIFICAÇÃO DOS LIGANTES  
ASFÁLTICOS POR MONTMORILONITA ORGANOFILIZADA COM  
GENAMIN NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande – PB

Dezembro/2018

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

**DANIEL DE ALMEIDA MOTTA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal  
de Campina Grande como requisito  
para obtenção do grau de bacharel  
em Engenharia Civil.

**Área de habilitação:** Geotecnia

Sub-área: Pavimentação

**Orientadoras:**

PhD. Ana Maria G. Duarte  
Mendonça.

Dr<sup>a</sup> Carina Silvani

Campina Grande – PB

Dezembro/2018

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por sempre ter cuidado de mim e dado sabedoria nos momentos mais difíceis da minha vida e por me transformar através do seu exemplo de integridade.

Às minhas tias, Josélia e Joseluca, e ao meu tio Jedman por sempre me incentivarem e apoiarem na minha vida acadêmica.

À minha avó Marluca, por ter me dado todo o apoio durante minha jornada acadêmica.

Aos meus amigos Caroline Ramalho e Artur Alves pela força nos momentos mais difíceis de minha vida.

Aos meus pais, irmão, irmãs e sobrinhos, sem a qual não teria me tornado quem sou hoje.

Ao escritor Anthony Robbins, que mesmo sem conhecer, e através de seus livros, me apresentou a Programação Neurolinguística, permitindo saúde mental e a superar medos e fobias.

À minha professora Ana Maria, pela dedicação e orientação de minha pesquisa.

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho para Deus; a meus pais Jean e Vanderli, meu irmão Erick e irmãs Adriely, Vivian e Lilian; aos meus sobrinhos Alan, Kalebe e Hadassa; às minhas tias Joseluze e Josélia; ao meu tio Jedman; aos meus amigos Caroline Ramalho e Artur Alves; à minha avó Marluce; e por fim, à minha professora Ana Maria.*

*“Tudo o que a mente do homem é capaz de conceber e acreditar pode ser alcançado.”*

*(Napoleon Hill)*

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> - Composição do pavimento flexível .....   | 18 |
| <b>Figura 2</b> - Principais etapas do fracionamento do ligante asfáltico .....  | 20 |
| <b>Figura 3</b> - Esquema das parcelas presente nos ligantes asfálticos .....  | 21 |
| <b>Figura 4</b> - Estrutura cristalina da bentonita .....  | 28 |
| <b>Figura 5</b> - Tipos de estruturas de camadas de silicatos do ligante asfáltico modificado  | 29 |
| <b>Figura 6</b> Comparação do Asfalto Virgem com o Nanomodificado em relação ao envelhecimento .....   | 30 |
| <b>Figura 7</b> - Viscosidade rotacional para ligante original, ligante RTFO, Nanoargila A e ligante de asfalto modificado Nanoargila B .....          | 30 |
| <b>Figura 8</b> - Módulos complexos de cisalhamento DSR ( $G^*$ ) no asfalto original, adição de 2% e 4% de nanoargila A ao ligante asfáltico .....    | 31 |
| <b>Figura 9</b> - Módulos complexos de cisalhamento DSR ( $G^*$ ) no asfalto original, adição de 2% e 4% de nanoargila B ao ligante asfáltico .....    | 31 |
| <b>Figura 10</b> - Desempenho à deformação permanente da mistura convencional e das misturas modificadas com as nanoargilas em diferentes teores. .... | 33 |
| <b>Figura 11</b> - Fluxograma das etapas da pesquisa. ....   | 34 |
| <b>Figura 12</b> - Agitador Mecânico, marca FISATOM, modelo 722D .....   | 35 |
| <b>Figura 13</b> - Dados do ensaio Performance Grade (PG) para ligante asfáltico puro .....  | 38 |
| <b>Figura 14</b> - Dados do ensaio Performance Grade (PG) para ligante asfáltico puro envelhecido a curto prazo (RTFO) .....                           | 38 |
| <b>Figura 15</b> - Dados do ensaio Performance Grade (PG) para ligante asfáltico 55/75 ....  | 39 |
| <b>Figura 16</b> - Temperaturas máximas de Performance Grade (PG) para os ligantes asfálticos em estudo.....   | 39 |
| <b>Figura 17</b> - Relação Módulo Complexo ( $G^*$ ) e Temperatura ( $^{\circ}C$ ) dos ligantes em estudo .....  | 41 |
| <b>Figura 18</b> - Relação Módulo Complexo ( $G^*$ ) e Temperatura ( $^{\circ}C$ ) dos ligantes em estudo após RTFO.....                               | 41 |
| <b>Figura 19</b> - Relação $G^*/\sin(\delta)$ e Temperatura ( $^{\circ}C$ ) dos ligantes em estudo .....   | 42 |
| <b>Figura 20</b> - Relação $G^*/\sin(\delta)$ e Temperatura ( $^{\circ}C$ ) dos ligantes em estudo após RTFO. ....                                     | 43 |
| <b>Figura 21</b> - Índices de envelhecimento (AI) para o CAP 50/70 puro e modificados ....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 22</b> - Compliância não recuperáveis para todos os ligantes em estudo .....       | 45 |
| <b>Figura 23</b> - Jnr diferencial para os ligantes de referência e para os modificados..... | 47 |
| <b>Figura 24</b> - Parâmetros A e B para os ligantes de referência e modificados.....        | 48 |



## LISTA DE TABELA

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> - Especificações para os ligantes brasileiros modificados por polímeros SBS ..... | 23 |
| <b>Tabela 2</b> - Nova especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP) .....      | 24 |
| <b>Tabela 3</b> - Argilominerais e sua classificação .....  | 27 |
| <b>Tabela 4</b> - Ensaio para caracterização reológica do ligante modificado .....                | 35 |
| <b>Tabela 5</b> - Comparação ligante modificados antes do RTFO .....                              | 43 |
| <b>Tabela 6</b> - Comparação ligante de referência com ligante modificado em 2% .....             | 44 |
| <b>Tabela 7</b> - Comparação ligante de referência com ligante modificado em 3% .....             | 44 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SHRP: Programa Estratégico de Pesquisas Rodoviárias

SUPERPAVE: Performing Asphalt Pavements

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

ANP: Agência Nacional do Petróleo

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR: Norma Brasileira

ASTM: American Society for Testing and Materials

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

PPM: Partes Por Milhão

OMMT: Organommodified Montmorillonite

MMT: Montmorillonite

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

AMP: Asfalto Modificado por Polímero

EAP: Emulsão Asfáltica

ADP: Asfalto Diluído

AR: Asfalto Espuma

ARE: Agentes Rejuvenescedores

SBS: Estireno-Butadieno-Estireno

MSCR: Multiple Stress Creep Recovery

RTFOT: Rolling Thin Film Oven Test

DSR: Dynamic Shear Rheometer

RCRT: Repeated Creep and Recovery

PG: Performance Grade

G\*: Módulo Complexo de Cisalhamento

G': Componente elástica recuperável

G'': Componente viscosa não recuperável

( $\delta$ ): Ângulo de fase

(AI): Índice de Envelhecimento

## RESUMO

Na maioria dos países, a principal técnica para revestimento de pavimentos flexíveis, é o revestimento asfáltico. A introdução de modificadores para os ligantes asfálticos e para as misturas asfálticas, no intuito de evitar o surgimento dos defeitos propriamente ditos, permitem melhorar a qualidade do ligante asfáltico e, por conseguinte, proporcionar ao pavimento uma maior vida de serviço. Assim, este estudo tem como objetivo estudar a ação de modificadores como a montmorilonita organofilizada, nos teores de 2 e 3%, no envelhecimento dos ligantes asfálticos, CAP 50/70, e nas propriedades reológicas. Após a modificação o ligante foi submetido ao envelhecimento a curto prazo-RTFO e foram realizados os seguintes ensaios reológicos: MSCR - Multiple Stress Creep Recovery, PG - Performance Grade e LAS – Linear Amplitude Sweep. Os resultados indicaram que os ligantes modificados por Montmorilonita Organofilizada com Genamin são menos rígidos para os respectivos teores, bem como são menos resistentes à deformação permanente. O CAP + SBS é o mais sensível e possui maior resistência total à deformação. Tanto o polímero quanto a argila são modificadores que permitem que o ligante seja utilizado a altas temperaturas sem perda de desempenho do ligante asfáltico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimentação, ligante, modificador.

## **ABSTRACT**

In most countries, the main technique for coating flexible floorings is the asphalt coating. The introduction of modifiers for asphalt binders and for asphalt mixtures, in order to avoid the appearance of the defects themselves, allow to improve the quality of the asphalt binder and, therefore, to provide the pavement with a longer service life. Thus, this study aims to study the action of modifiers such as organophilic montmorillonite, at 2 and 3%, aging of asphalt binders, CAP 50/70, and rheological properties. After the modification the binder was subjected to short-term aging-RTFO and the following rheological tests were performed: MSCR - Multiple Stress Creep Recovery, PG - Performance Grade and LAS – Linear Amplitude Sweep. The results indicated that the binders modified by Genamin Organophilized Montmorillonite are less rigid for the respective contents, as well as are less resistant to permanent deformation. The CAP + SBS is the most sensitive and has the highest total resistance to deformation. Both the polymer and the clay are modifiers that allow the binder to be used at high temperatures without loss of performance of the asphalt binder.

**KEY-WORDS:** Pavement, linker, modifier.

## SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 14 |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA .....   | 16 |
| 1.2      | OBJETIVOS .....   | 16 |
| 1.2.1    | Objetivo Geral .....  | 16 |
| 1.2.2    | Objetivos Específicos .....   | 16 |
| 1.3      | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC                     | 17 |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA</b> .....                                      | 18 |
| 2.1      | LIGANTES ASFÁLTICOS.....  | 18 |
| 2.1.1    | Tipos de ligantes asfálticos.....                                       | 21 |
| 2.1.2    | Caracterização dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP) .....          | 23 |
| 2.2      | Nanomodificadores de ligantes asfálticos.....                           | 25 |
| 2.2.1    | Argila e Argilominerais .....   | 26 |
| 2.2.2    | Bentonitas (Argila montmorilonita, organofílica ou hidrofóbica).....    | 27 |
| 2.2.3    | Estudos da aplicação de nanoargilas aos ligantes asfálticos.....        | 28 |
| <b>3</b> | <b>MATERIAS E MÉTODOS</b> .....   | 34 |
| 3.1      | Materiais .....   | 34 |
| 3.2      | Métodos .....   | 34 |
| 3.2.1    | Preparação da mistura.....  | 35 |
| 3.2.2    | RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo).....                               | 36 |
| 3.2.3    | MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) .....                             | 36 |
| 3.2.4    | PG - Performance Grade.....   | 36 |
| 3.2.5    | Linear Amplitude Sweep (LAS).....                                       | 37 |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                                    | 38 |
| 4.1      | Performance Grade (PG) .....  | 38 |
| 4.2      | Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) .....       | 45 |
| 4.3      | Linear Amplitude Sweep (LAS) .....                                      | 48 |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b><br>..... | 50 |
| 5.1      | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 50 |
| 5.2      | SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....                                   | 51 |

## 1 INTRODUÇÃO

A malha rodoviária no Brasil é o principal meio de circulação de pessoas e bens de consumo, assim, fundamental para o crescimento social e econômico do país, bem como a interligação de suas regiões e integração da matriz de transporte brasileira, além do que representa 95% na matriz de transporte de passageiros e mais de 61% na de cargas. Neste contexto, mostra-se a relevância desse modal de transporte para o Brasil conforme a Confederação Nacional de Transportes (2017).

Em relação a dados recentes sobre a malha rodoviária brasileira, correspondendo a rodovias não pavimentadas com extensão de 1.352.5163,6 km, enquanto que 211.399,1 km estavam pavimentadas (CNT, 2016). Segundo a Confederação Nacional de Transportes (2016), foram autorizados investimento total de R\$ 9,37 bilhões, R\$ 5,95 bilhões na intervenção da malha rodoviária e o restante destinado para manutenção de 11 mil km de rodovias.

Os principais defeitos que surgem nos pavimentos flexíveis brasileiros são provenientes do elevado número de veículos e acréscimo de suas cargas, como também a condições ambientais e precária manutenção desse modal de transporte, portanto, o revestimento asfáltico é o que sofre maior impacto, levando os pavimentos a um fracasso precoce, assim, produzindo prejuízos para o crescimento socioeconômico do país e desconforto na utilização do sistema rodoviário (SILVA, 2011). De acordo com Santos (2012), em relação a esses defeitos principais nos pavimentos asfálticos, tem-se a fadiga e a deformação permanente.

Neste cenário, essa extensa rede de rodovias não pavimentadas do país, depende de elevados investimentos, de projetos de pavimentos duráveis, econômicos e alinhados com a sustentabilidade, bem como interesses em estudos da utilização de materiais na pavimentação podem conferir o uso racional de insumos e melhorar o desempenho do pavimento (NUÑEZ, 2013).

Em grande maioria esses materiais são polímeros, modificadores dos ligantes asfálticos, que ao serem adicionados proporcionam melhorias químicas, físicas e reológicas ao ligante asfáltico tradicional. Deste modo, os modificadores têm de ter atributos adequados de compatibilidade, resistência, estabilidade e facilidade de mistura com a ligante base nas fases de aplicação e armazenamento. A melhoria no comportamento da mistura asfáltica no pavimento, através da ação dos modificadores,

deve-se ser balanceada para apresentar um custo razoável para sua utilização (JUNIOR, 2008).

A introdução dos modificadores para os ligantes asfálticos e para as misturas asfálticas, no intuito de evitar o surgimento dos defeitos propriamente ditos, conferem melhoria na qualidade do ligante asfáltico e, por conseguinte, proporcionar ao pavimento uma maior vida de serviço (SANTOS, 2012).

Conforme Asfalto em Revista (2011) citado por Santos (2012), destacam-se as nanoargilas como um dos modificadores dos ligantes asfálticos, que apesar de uma realidade tímida em pesquisas, mostra-se em ascensão devido aos seus resultados, uma vez que eleva sua rigidez, reduz o ângulo de fase, modifica suas propriedades reológicas, como também confere resistência ao envelhecimento.

Neste sentido, apesar da realidade tímida da aplicação de modificadores nos ligantes asfálticos tradicionais no mercado brasileiro, evidencia uma área em ascensão devido aos seus resultados serem satisfatórios. Objetivamente, a presente pesquisa, busca estudar o comportamento das propriedades reológicas do ligante asfáltico convencional, CAP 50/70, modificado com montmorilonita organofilizada (OMMT: *Organommodified Montmorillonite*), bem como comparar com o cimento modificado (AMP) 55/75 SBS, assim, sendo possível compreender o seu comportamento e justificar sua utilização no revestimento asfáltico.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A malha rodoviária exerce uma função crucial para o crescimento do país, tanto para o transporte de cargas, como para pessoas, integralizando várias regiões, portanto, a importância de sua conservação. Devido ao aumento do carregamento originado pelo crescimento do volume do tráfego, bem como a quase ausência de manutenção, os pavimentos asfálticos sofrem com essas ações, assim, impondo desafios para minimizar sua deterioração e aumentar sua vida útil.

Neste contexto, é importante a compreensão dos materiais que constituem os pavimentos asfálticos brasileiros, buscando aprimoramento destes materiais e, conseqüentemente, melhoria de desempenho do ligante asfáltico quando em serviço, dessa forma pode-se destacar os estudos das nanoargilas em ligantes asfálticos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 *Objetivo Geral*

Esta pesquisa tem como principal objetivo estudar as propriedades reológicas do ligante asfáltico convencional, CAP 50/70, modificado por montmorilonita organofilizada nos teores de 2% e 3%.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Avaliar o comportamento reológico do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por montmorilonita organofilizada nos teores de 2% e 3% antes de envelhecimento a curto prazo;
- Avaliar o comportamento reológico do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por montmorilonita organofilizada nos teores de 2% e 3% após envelhecimento a curto prazo;
- Comparar o desempenho do CAP 50/70 modificado por montmorilonita organofilizada nos teores de 2% e 3% ao cimento asfáltico modificado (AMP) 55/75 SBS.



### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

O texto deste Trabalho de Conclusão de Curso encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma:

- Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos da Pesquisa e Organização desta pesquisa
- Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados a ligantes asfálticos, nanomodificadores e suas aplicações.
- Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.
- Resultados e Discussões – Neste tópico são apresentados os resultados obtidos com a modificação do cimento asfáltico de petróleo por montmorilonita organofilizada;
- Considerações Finais e Sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações sobre a pesquisa e as sugestões para estudos futuros sobre o tema. Posteriormente, estão as Referências, onde são listadas as pesquisas citadas neste estudo.

Por fim, estão todos os anexos, onde são apresentados todos os resultados dos ensaios realizados na presente pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

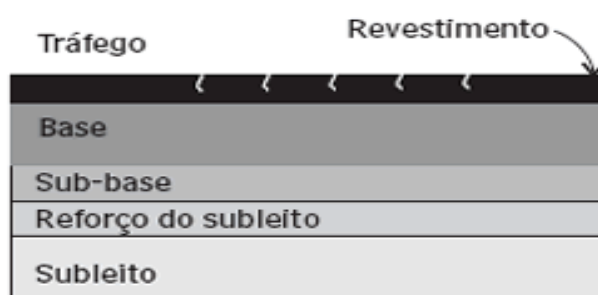
### 2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS

De acordo com a Resolução da ANP N° 2, 14 de janeiro de 2005, estabelece como ligante, um material proveniente do petróleo, constituído de uma mistura de hidrocarbonetos pesado. Apresenta-se como material negro, semi-sólido ou sólido, com predominância de betume.

Extraído de forma natural, por exemplo, em lagos, ou através da destilação do petróleo, apresenta características adequadas para a pavimentação, devido à função de ligante betuminoso, logo, a sua aplicação é comum em serviços de impermeabilização e para a fabricação de misturas asfálticas que levam agregados em sua composição (SANTOS, 2012).

Conforme Bernucci *et al.*, (2008), na maioria dos países, a principal técnica para revestimento de pavimentos flexíveis, é o revestimento asfáltico, como ilustrado no esquema da Figura 1. Na realidade brasileira, 95% desses pavimentos são revestidos por asfalto. O revestimento asfáltico corresponde à camada superior, recebendo as cargas e transmitindo para as camadas inferiores, dissipando esse carregamento. Oferece durabilidade, impermeabilização do pavimento e forte união dos agregados, apresentando-se como ligante, portanto, permitindo flexibilidade controlável, assim, melhorando as condições de rolamento no que se refere à segurança e ao conforto. Apresentando qualidades e consistência fundamentais para a aplicação em construções de pavimentos asfálticos (DNER, 1995).

Figura 1 - Composição do pavimento flexível



FONTE: Pini (2006)

O ligante asfáltico no Brasil é comumente chamado de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), designado como semi-sólido em baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido em elevadas temperaturas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Apresenta-se de forma viscosa, próximo da consistência sólida ou semi-sólida quando submetido a temperaturas ambientes (LESUEUR, 2009). Segundo a ABNT NBR 7208/90, reduz sua viscosidade com a elevação da temperatura. Em razão desse comportamento o cimento asfáltico é classificado como um material termoviscoplastico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

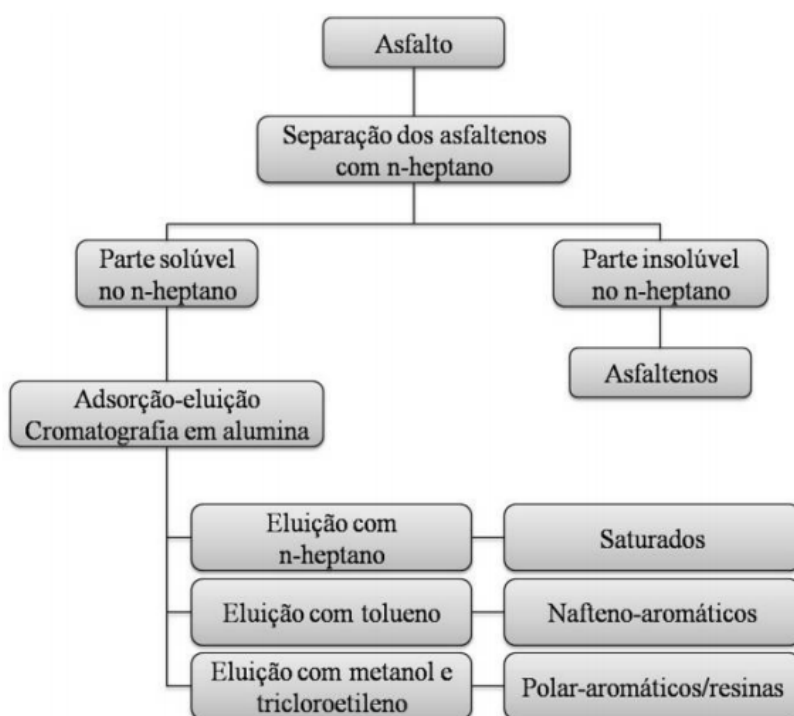
Assim, a temperatura influencia diretamente no comportamento do ligante asfáltico. O bom desempenho em regiões com baixas temperaturas, é necessário que o Cimento Asfáltico de Petróleo tenha elevada elasticidade e coesão, fazendo com que não possua consequências da contração térmica, bem como dos efeitos da carga aplicada na camada. Já em ambientes com elevadas temperaturas, o CAP tende a escoar, ocasionando deformações permanentes devido à influência do tráfego (IMPERPAV, 2008).

### 2.1.1 Composição química

Em relação a composição química, os ligantes são compostos de 90 a 95% de hidrocarbonetos, 5 a 10% de heteroátomos (BERNUCCI *et al.*, 2008). Na constituição desses heteroátomos, estão (oxigênio 0-2%, enxofre 0-9%, nitrogênio 0-2%) e metais em maiores quantidades como o vanádio 2000 ppm e o níquel 200 ppm (LESUEUR, 2009) unidos por ligações covalentes de acordo com Bernucci *et al.*, (2008).

Como sua composição química é complexa, métodos de fracionamento dos ligantes asfálticos foram elaborados. O mais utilizado é o método de separação dos seus constituintes, normalizado pela ASTM D 4124-01, formado basicamente pelas frações (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos), conhecido como SARA, referente às letras iniciais de cada fração (PAMPLONA, 2013). Na separação por cromatografia de adsorção, os asfaltenos são obtidos pela adição de n-heptano ao asfalto, corresponde a fração insolúvel, enquanto que os maltenos (saturados, aromáticos e resinas) são as partes solúveis (FILHO, 2017).

**Figura 2** - Principais etapas do fracionamento do ligante asfáltico



**FONTE:** Souza (2010)

**Asfaltenos:** Compõem entre 5% a 20% do ligante asfáltico, é bastante estudada devido a sua característica viscosa, são classificados como baixa solubilidade, insolúvel em n-heptano, entretanto, apresenta solubilidade na presença de tolueno. É a principal parcela responsável pela coloração escura do ligante asfáltico (PAMPLONA, 2013). Quanto maior for a composição dos asfaltenos no ligante, mais rígido e viscoso o ligante será (MARINHO FILHO, 2017).

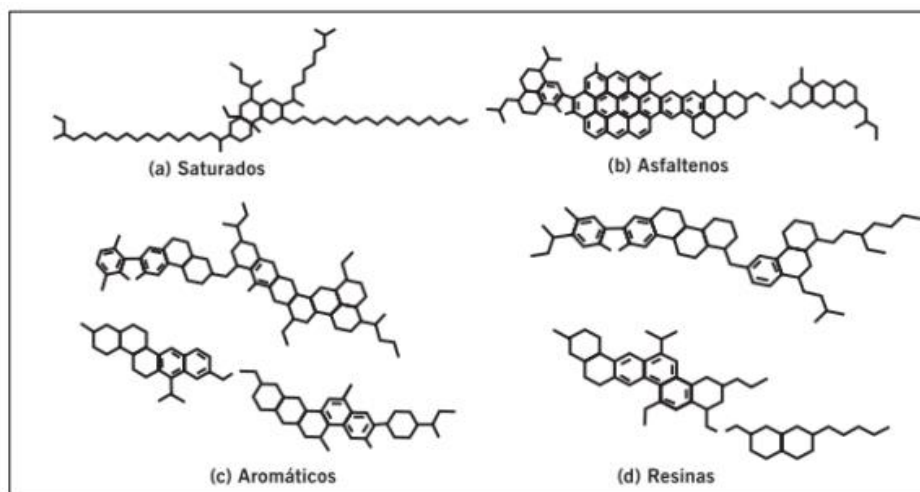
**Resinas:** Compreende a maior parcela, entre 30 a 45% do ligante asfáltico, constituído principalmente por hidrocarbonetos e pequenas quantidades de oxigênio, enxofre e nitrogênio (PAMPLONA, 2013), com natureza polar e fortemente adesiva (BERNUCCI *et al.*, 2008).

**Aromáticos:** Tal como as resinas, os aromáticos também correspondem a maior parcela do ligante asfáltico, constituído entre 40 a 65%, são apresentados como um líquido viscoso amarelo polar e com cadeias não saturadas de carbono. É o meio de dispersão e peptização da parcela asfaltenos (MARINHO FILHO, 2017).

**Saturados:** Correspondem de 5 a 20% do ligante asfáltico. Devido a sua transição vítrea, os saturados são apresentados como um líquido sem ou com pouca coloração em

temperaturas ambientes (LESUEUR, 2009). A Figura 3 ilustra uma representação esquemática dos componentes dos asfaltos, propriamente ditos.

**Figura 3** - Esquema das parcelas presente nos ligantes asfálticos



**FONTE:** Bernucci *et al.*, (2008)

As quatro parcelas SARA presentes no ligante asfáltico, influenciam o seu comportamento. Os saturados apresentam influência negativa na suscetibilidade térmica. Os aromáticos atuam como plastificantes, melhorando as propriedades físicas dos ligantes. As resinas deixam o ligante mais dúctil. Os asfaltenos proporcionam aumento da viscosidade do ligante, conferindo melhoria na suscetibilidade térmica, ou seja, deixando-os menos vulneráveis a mudanças de temperatura (MORALES *et al.*, 2004).

### 2.1.1 Tipos de ligantes asfálticos

Cimentos asfálticos de petróleo (CAP), Asfalto modificado por polímero (AMP), Emulsão asfáltica (EAP), Asfalto diluído (ADP), Asfalto Espuma e Agentes rejuvenescedores (AR e ARE) são alguns dos tipos de ligantes asfálticos que podem ser encontrados (BERNUCCI *et al.*, 2008). Conforme Santos (2012) o ADP, EAP, AMP e o CAP são utilizados em pavimentos não rígidos, os demais para impermeabilizações. A presente pesquisa se atém ao Cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70, bem como ao Asfalto modificado por polímero (AMP) 55/75 modificado com polímero elastômero de SBS (estireno-butadieno-estireno).

Além das informações supracitadas sobre o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), temos que é bastante empregado em revestimento asfálticos e na construção civil, pois proporciona resultados satisfatórios devido às suas características de elevada resistência

aos ácidos inorgânicos, sais e álcalis, como também por ser flexível, aglutinante e servindo na impermeabilização. É adesivo e termoplástico. Na pavimentação asfáltica, é utilizado em misturas a quente, como pré-misturado, concreto asfáltico e outros. (NOGUEIRA, 2008). E ainda segundo Bernucci *et al.* (2008), possui propriedade de termoviscoelasticidade, sendo fortemente influenciado pela temperatura em serviço, velocidade, tempo e ao carregamento imposto, bem como é solúvel em benzeno, bissulfeto de carbono e tricloroetileno.

O asfalto modificado com polímero (AMP) surge no intuito de conferir desempenho satisfatório para os pavimentos, por atenuar os possíveis defeitos como trincas por fadiga e térmicas, assim, colaborando com o aumento da vida útil e, por conseguinte, minimizando os custos com manutenção (FERNANDES, 2009). De acordo com Shell (2003) citado por Bernucci *et al.*, (2008) os benefícios dos ligantes modificado por elastômeros são: deformação permanente, trincas térmicas, trincas por fadiga e envelhecimento.

E ainda por Bernucci *et al.*, (2008) em relação às diversas classificações dos AMP, temos o copolímero SBS (estireno-butadieno-estireno) que é conhecido como elastômeros termoplásticos, ou seja, apresenta comportamento elástico em baixas temperaturas ou próximas a temperatura de serviço, entretanto, amolecem e reduzem suas viscosidades em elevadas temperaturas, conferindo comportamento termoplástico. A sua adição ao ligante, faz com que tenha menor sensibilidade ao envelhecimento a curto prazo em relação ao ponto de amolecimento e à penetração retida (DOMINGOS & FAXINA 2013; SOBREIRO 2014). E ainda em Sobreiro (2014), constatou-se antes do envelhecimento a longo prazo, resultados do ponto de amolecimento maiores do que os obtidos com ligantes convencionais.

Ainda conforme Fernandes (2009), para comercialização, segue a Tabela 1 das especificações para os ligantes brasileiros modificados por polímeros SBS, conforme instituído pela Resolução Normativa ANP n. 31/2007.

**Tabela 1** - Especificações para os ligantes brasileiros modificados por polímeros SBS

| Características   | Unidades | Limites |         |         |         | Métodos      |        |
|---|----------|---------|---------|---------|---------|--------------|--------|
|   |          | 50/65   | 55/75   | 60/85   | 65/90   | ABNT/<br>NBR | ASTM   |
| Penetração (100 g, 5 s, 25 °C)                            | 0,1 mm   | 45–70   | 45–70   | 40–70   | 40–70   | 6576         | D 5    |
| Ponto de amolecimento, mín                                | °C       | 50      | 55      | 60      | 65      | 6560         | D 36   |
| Viscosidade Brookfield                                    | cP       |         |         |         |         | 15184        | D 4402 |
| a 135 °C, spindle 21, 20 rpm, máx                         |          | 1500    | 3000    | 3000    | 3000    |              |        |
| a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx                         |          | 1000    | 2000    | 2000    | 2000    |              |        |
| a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx                        |          | 500     | 1000    | 1000    | 1000    |              |        |
| Ponto de fulgor, mín                                      | °C       | 235     | 235     | 235     | 235     | 11341        | D 92   |
| Ensaio de Separação de Fase, máx                          | °C       | 5       | 5       | 5       | 5       | 15166        | D 7173 |
| Recuperação Elástica a 25 °C, 20 cm, mín                  | %        | 65      | 75      | 85      | 90      | 15086        | D 6084 |
| Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 mín          |          |         |         |         |         |              |        |
| Varição em massa, máx                                     | % massa  | 1       | 1       | 1       | 1       | 15235        | D 2872 |
| Varição do ponto de amolecimento, máx                     | °C       | -3 a +6 | -5 a +7 | -5 a +7 | -5 a +7 | 6560         | D 36   |
| Porcentagem de Penetração original, mín                   | %        | 60      | 60      | 60      | 60      | 6576         | D 5    |
| Porcentagem de Recuperação Elástica Original a 25 °C, mín | %        | 80      | 80      | 80      | 80      | 15086        | D 6084 |

FONTE: Bernucci *et al.*, (2008)

### 2.1.2 Caracterização dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP)

De acordo com Agência Nacional de Petróleo (ANP) através da Resolução 019/2005, foi determinado novas especificações para o emprego dos ligantes na pavimentação, que tem como principal objetivo determinar padrões para qualidade do material e sua classificação.

Assim, as especificações correntes no país, classifica os ligantes convencionais por meio da penetração de uma agulha padrão, como também menciona faixas limites para outras propriedades (ANP, 2005). Além da nova especificação da ANP, o DNIT, através da Norma 095/2006 (Cimentos Asfálticos de Petróleo - Especificação do Material), classifica o ligante asfáltico em CAP 30-45, CAP 50/70, CAP 85/100, CAP 150/200 em conformidade com sua procedência.

A Tabela 2 elucida a nova especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP), os indicadores numéricos são medidas de penetração a temperatura de 25°C, dividido em quatro grupos diferentes, comparando os valores obtidos nos ensaios em

temperatura de usinagem e a 25°C previamente estabelecido, conforme Bernucci *et al.* (2008) apud Carlesso (2014).

**Tabela 2** - Nova especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP)

| CARACTERÍSTICAS                                  | UNIDADES | LIMITES        |                |                |                | MÉTODOS   |        |
|--|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|--------|
|  |          | CAP 30 45      | CAP 50 70      | CAP 85 100     | CAP 150 200    | ABNT      | ASTM   |
| Penetração (100 g, 5s, 25°C)                     | 0,1mm    | 30 45          | 50 70          | 85 100         | 150 200        | NBR 6576  | D 5    |
| Ponto de amolecimento, mín                       | °C       | 52             | 46             | 43             | 37             | NBR 6560  | D 36   |
| Viscosidade SayboltFurol                         | s        |                |                |                |                | NBR 14950 | E 102  |
| a 135 °C, mín                                    |          | 192            | 141            | 110            | 80             |           |        |
| a 150 °C, mín                                    |          | 90             | 50             | 43             | 36             |           |        |
| a 177 °C   |          | 40 150         | 30 150         | 15 60          | 15 60          |           |        |
| OU   |          |                |                |                |                |           |        |
| Viscosidade Brookfield                           | cP       |                |                |                |                | NBR 15184 | D 4402 |
| a 135°C, SP                                      |          | 374            | 274            | 214            | 155            |           |        |
| 21, 20 rpm, mín                                  |          |                |                |                |                |           |        |
| a 150 °C, SP                                     |          | 203            | 112            | 97             | 81             |           |        |
| 21, mín.   |          |                |                |                |                |           |        |
| a 177 °C, SP 21                                  |          | 76 285         | 57 285         | 28 114         | 28 114         |           |        |
| Índice de susceptibilidade térmica (1)           |          | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) |           |        |
| Ponto de fulgor mín                              | °C       | 235            | 235            | 235            | 235            | NBR 11341 | D 92   |
| Solubilidade em tricloroetileno, mín             | % massa  | 99,5           | 99,5           | 99,5           | 99,5           | NBR 14855 | D 2042 |
| Ductilidade a 25° C, mín                         | cm       | 60             | 60             | 100            | 100            | NBR 6293  | D 113  |
| Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min |          |                |                |                |                |           | D 2872 |
| Variação em massa, máx (2)                       | % massa  | 0,5            | 0,5            | 0,5            | 0,5            |           |        |
| Ductilidade a 25° C, mín                         | cm       | 10             | 20             | 50             | 50             | NBR 6293  | D 113  |
| Aumento do ponto de amolecimento, máx            | °C       | 8              | 8              | 8              | 8              | NBR 6560  | D 36   |
| Penetração retida, mín (3)                       | %        | 60             | 55             | 55             | 50             | NBR       | D 5    |

FONTE: Bernucci *et al.*, (2008)

Os ensaios de caracterização dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) citado pela ANP são: Penetração, viscosidade, ponto de fulgor, massa específica, durabilidade, solubilidade, ponto de amolecimento e por fim a ductilidade.

Além dos ensaios de caracterização, a resolução da ANP já considera ensaios de acordo com o Programa Estratégico de Pesquisas Rodoviárias SHRP (1994), que por consequência, originou uma metodologia designada SUPERPAVE (Superior Performance Pavements), portanto, considerando um dos seus ensaios, o de viscosidade Brookfield e o de envelhecimento RTFOT (Rolling Thin Filme Oven Test) (SILVA, 2011).

A finalidade do programa seria aumentar a vida útil dos pavimentos asfálticos, bem como reduzir custos de manutenção. Devido ao programa SHRP, foi possível desenvolver especificações técnicas para escolha de CAPs (PG, MSCR, LAS), como



também das misturas asfálticas (Flow Number, Módulo de Resiliência) (MARINHO FILHO, 2017). Por causa das falhas nos pavimentos flexíveis como trincamento por fadiga, trincamento térmico e deformações permanentes, que fez-se surgir esses ensaios, no intuito de controlar ou extinguir essas falhas (SILVA, 2011).

Segundo Mothé (2009), essa nova metodologia SUPERPAVE, devem ser feitos ensaios reológicos para determinação do desempenho em serviço. Entre os equipamentos utilizados está o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), classificado como propriedade reológica fundamental, não sendo empírico.

Conforme Portugal (2016), no que diz respeito às propriedades reológicas que determinam os ligantes asfálticos, podem ser classificadas como: propriedades reológicas empíricas e fundamentais. A primeira corresponde às medidas de resiliência, viscosidade Saybolt-Furol, penetração, ponto de amolecimento, ductilidade e retorno elástico. Enquanto que a segunda são viscosidade Brookfield, viscosidade aparente, viscosidade capilar e cinemática, módulo complexo, ângulo de fase, módulo de armazenamento e de dissipação, viscosidade complexa, que são determinadas no DSR.

A reologia é entendida como o estudo da deformabilidade dos materiais, considerando as variáveis o tempo de um carregamento, bem como da temperatura. As propriedades reológicas são muito importantes devido ao fato de que afetam o comportamento mecânico das misturas asfálticas, influenciando o desempenho dos pavimentos asfálticos. Em razão disso, os ligantes asfálticos com propriedades reológicas semelhantes às condições de carregamento e clima de uma determinada região, irão fazer com que as misturas asfálticas tenham um melhor desempenho quando submetidas a essas ações (JUNIOR, 2008).

## 2.2 Nanomodificadores de ligantes asfálticos

De acordo com Mothé (2009), os ligantes asfálticos são modificados quando recebem a adição de algum material que modifique suas propriedades, seja de origem sintética, natural ou polimérica.

O aumento do carregamento nos pavimentos, bem como o clima e o crescimento da frota de veículos nas rodovias, faz com que demandem estudos de materiais, cuja aplicação seja satisfatória para minimizar os danos originados por essas mudanças na malha rodoviária, deixando os pavimentos mais resistentes e menos dispendioso. A adição de materiais podem conferir melhorias nas propriedades dos cimentos asfálticos (JUNIOR, 2008).

Melhorias, tais como elevar a resistência contra a deformação permanente, minimizar o aparecimento de trincas térmicas e por fadiga, ampliar sua adesividade, atenuar o envelhecimento, bem como melhorias em suas propriedades reológicas e mecânicas (SANTOS, 2012).

Segundo Pereira *et al.*, (2011) apud Carlesso (2014), em 2002 foi criada o Projeto GMA1-2002-72160 “NANOCOMEX”, no intuito de relatar o potencial das aplicações da Nanotecnologia na Construção Civil, assim, sendo o ponto de partida para pesquisas de nanomateriais voltadas para a Pavimentação Rodoviária. Portanto, de acordo com Yang e Tighe (2013), as nanoargilas adicionadas às misturas asfálticas aumentaram a viscosidade do ligante, como também aumentaram a resistência por fadiga do pavimento asfáltico.

Na mesma direção, Fang *et al.*, (2013) expõe que os ligantes modificados por nanomateriais apresentam resultados satisfatórios de aderência, susceptibilidade térmica, como também durabilidade e resistência ao envelhecimento. Conforme Carlesso (2014), pesquisas recentes com nanomateriais utilizam as nanoargilas, nanoemulsões e microemulsões, polímero EVA com nanoargila, entre outros.

Os resultados positivos da aplicação de nanomateriais em ligantes asfálticos, proporcionaram melhorias quanto à resistência ao envelhecimento, deformação permanente, danos por umidade, bem como trincas por fadiga. Dessa forma, alguns nanomodificadores são destaques em estudos, tais como nanoargilas, nanotubo de carbono e nanosílica (MELO, 2014).

### 2.2.1 Argila e Argilominerais

Em princípio, as argilas podem ser conceituadas como materiais de origem natural, aparência terrosa e com granulação fina, que ao serem misturadas com a água, apresentam plasticidade. É um material constituído de argilominerais, que são silicatos de alumínio hidratado e ou magnésio, bem como as argilas podem apresentar em sua constituição outros minerais, matéria orgânica, sais solúveis em água e partículas de outros materiais (MELO, 2014). Segundo a ABNT NBR 6502, classificam as argilas como solo com partículas de dimensões inferiores a 0,002 mm.

De acordo com Vazzoler (2017), as argilominerais são subdivididas em duas classes gerais:

- Silicatos cristalinos com estrutura lamelar (camadas), comumente conhecidas como filossilicatos.
- Silicatos com estrutura fibrosa.

A primeira classe, os filossilicatos, são relevantes para a preparação das argilas organofílicas por causa de suas lamelas, também são divididos em dois grupos/famílias, tais como camadas 1:1 e 2:1, correspondendo respectivamente a dimórficos e trimórficos. Os argilominerais são classificados em duas classes gerais, que são divididas em oito grupos, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3** - Argilominerais e sua classificação

| Classe/família                           | Grupo            | Camada de octaedros | Argilomineral                                     | Espaçamento basal (nm)                             |
|--|------------------|---------------------|---|--|
| Estrutura lamelar/<br>difórmicos<br>1:1  | Caulinita        | Dioctaédrica        | Nacrita<br>Caulinita<br>Haloisita                 | 0,7  |
|  | Serpentina       | Trioctaédrica       | Antigorita<br>Crisotila<br>Amesita<br>Cronstedita |  |
| Estrutura lamelar/<br>trifórmicos<br>2:1 | Esmectita        | Dioctaédrica        | Beidelita<br>Nontronita<br>Montmorilonita         | 1,3 - 1,5<br>(hidratada) e<br>1,0<br>(desidratada) |
|  |                  | Trioctaédrica       | Saponita<br>Hectorita                             |  |
|  | Vermiculita      | Dioctaédrica        | Vermiculita                                       | 1,4<br>(hidratada) e<br>0,9<br>(desidratada)       |
|  |                  | Trioctaédrica       | Vermiculita                                       |  |
|  | Mica             | Dioctaédrica        | Muscovita-Ilita<br>Flogopita                      | 1,0  |
|  |                  | Trioctaédrica       | Biotita-Lediquita<br>Lepidolita                   |  |
|  | Talco-Pirofilita | Dioctaédrica        | Pirofilita  | 0,9  |
|  |                  | Trioctaédrica       | Talco   |  |
|  | Clorita          | Dioctaédrica        | Dombassita  | 1,4  |
|  |                  | Trioctaédrica       | Clinocloro<br>Chamosita                           |  |
| Estrutura fibrosa 2:1                    | Paligorsquita    | Trioctaédrica       | Paligorsquita                                     | -  |
|  | Sepiolita        | Trioctaédrica       | Sepiolita   | -  |

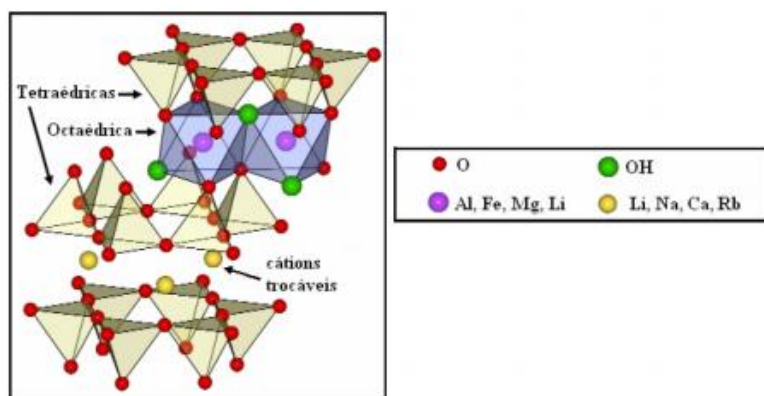
FONTE: Bernucci *et al.* (2008)

### 2.2.2 Bentonitas (*Argila montmorilonita, organofílica ou hidrofóbica*)

A argila montmorilonita é do grupo das esmectitas com estrutura formada por duas lâminas tetraédricas de sílica, em sua parte central possui uma lâmina octaédrica de alumina, sendo ambas unidas por átomos de oxigênio, conforme a Figura 4 (BISCHOFF, 2012).

A montmorilonita (MMT) por possuir partículas de argilominerais no estado coloidal, possui a característica de absorver água e moléculas orgânicas, sendo assim, adquirindo comportamento expansivo. Devido a sua alta área específica, normalmente maiores que 60 m<sup>2</sup>/g, como também a introdução de partículas orgânicas ou cátions trocáveis, fazem com que esse tipo de argila tenha diversas aplicações (MELO, 2014).

Figura 4 - Estrutura cristalina da bentonita



FONTE: Melo (2014)

De acordo com Melo (2014), para que a montmorilonita seja viável na consecução de nanocompósitos, é preciso modificá-la, aumentando sua afinidade por materiais orgânicos, isto é, deixando-a organofílica.

As argilas esmectitas podem passar por modificações, tais como a ácida, sódica e a organofilização. Por essa última, entende-se como a incorporação de substâncias orgânicas em dispersões aquosas com a argilas esmectitas (VAZZOLER, 2017).

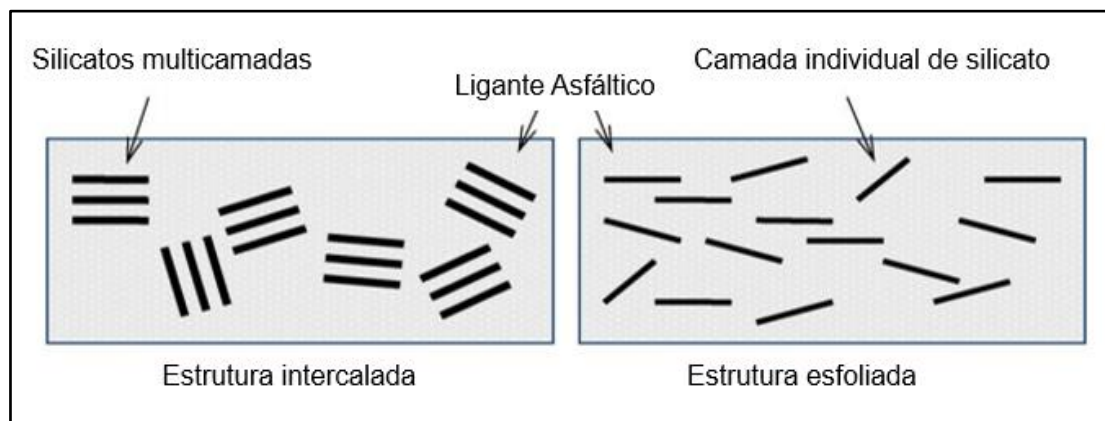
Essas substâncias orgânicas são inseridas entre as camadas estruturais da argila, que possuem atração química com a estrutura cristalina da montmorilonita, portanto, ocasionando comportamento expansivo entre essas camadas, fazendo com que tenha uma perda considerável de sua propriedade hidrofílica, assim sendo, resultando em um comportamento hidrofóbico. A montmorilonita ao se transformar em organofílica (modificada ou hidrofóbica), fica mais estável e reduz a deterioração, simultaneamente com a melhoria da resistência mecânica ao ser adicionada em material de origem orgânica (SANTOS, 2012).

### 2.2.3 Estudos da aplicação de nanoargilas aos ligantes asfálticos

Segundo Santos (2012), os primeiros estudos relatados sobre MMT ((Montmorilonita pura) e OMMT (Argila Montmorilonita modificada, organofílica ou

hidrofóbica) aplicados aos ligantes asfálticos são da pesquisa de Yu *et al.* (2006). A pesquisa concluiu que a adição de argila pura (MMT -Montmorillonite) originou uma estrutura intercalada, ilustrada na primeira parte da Figura 5, enquanto que a incorporação da argila modificada (OMMT - Organommodified Montmorillonite) formou uma estrutura esfoliada, correspondente a segunda parte da figura. O principal motivo para esse resultado é que a argila pura MMT possui uma estrutura com camadas hidrofílicas sem muito espaço entre elas; ao passo que a argila organofílica, como foi modificada, resultou em maiores espaçamentos, permitindo a remoção das camadas quando submetida ao processo de mistura, assim, originando a estrutura esfoliada, portanto, sua estrutura proporciona a OMMT condições benéficas para a incorporação do ligante asfáltico.

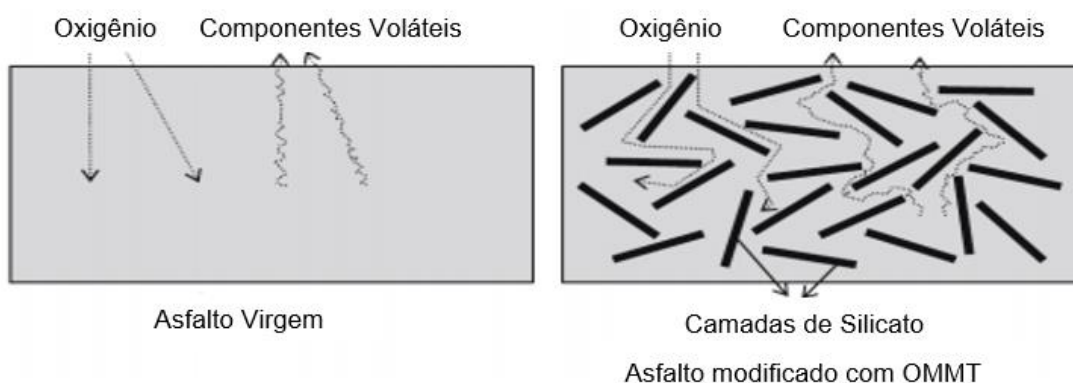
**Figura 5** - Tipos de estruturas de camadas de silicatos do ligante asfáltico modificado



**FONTE:** Adaptado de Yu *et al.* (2006) apud Santos (2012)

Posteriormente, Yu *et al.*, (2009) utilizou 3% de OMMT no ligante asfáltico, no sentido de avaliar os resultados após o envelhecimento, relacionado às propriedades do asfalto, portanto, concluindo que a adição da nanoargila no asfalto contribuiu para o retardamento do envelhecimento. Resultou em maior resistência à oxidação, pelo fato de sua estrutura ser esfoliada. A Figura 6 ilustra a ação da oxidação do ligante asfáltico puro comparado ao modificado, percebe-se a importância das camadas individuais de silicato no asfalto modificado ao dificultar a entrada de oxigênio, bem como a saída dos componentes voláteis.

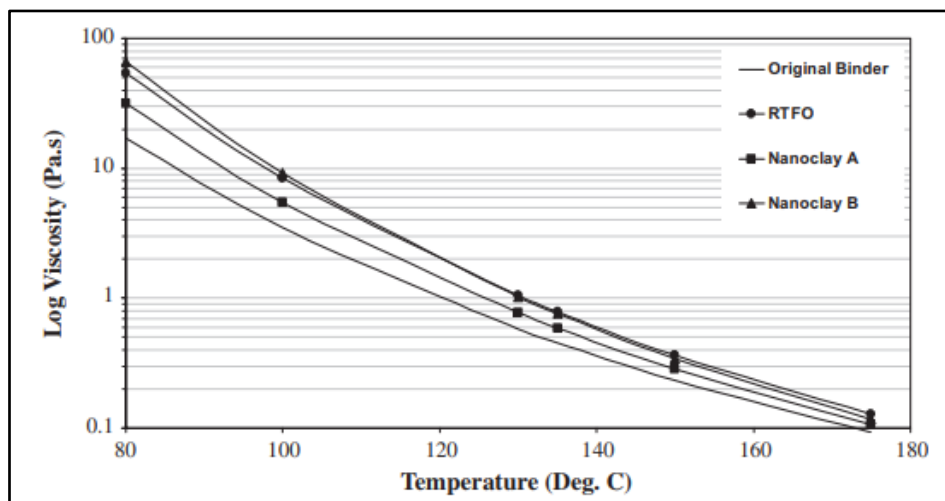
**Figura 6** Comparação do Asfalto Virgem com o Nanomodificado em relação ao envelhecimento



**FONTE:** Adaptado de Yu *et al.* (2009)

Conforme You *et al.*, (2011) apud por Carlesso (2017), duas nanoargilas montmorilonitas foram apresentadas apenas como componentes A e B, adicionadas com teores de 2% e 4% ao ligante PG 64-28, assim, no sentido de estudar a sua influência no comportamento reológico do ligante. A Figura 7 ilustra a adição de teor 2% de nanoargila A ou B ao ligante asfáltico puro conferiram aumento da viscosidade do material, percebe-se também que o nanomodificador B se assemelha ao encontrado para o ligante puro após o envelhecimento em curto prazo no RTFO.

**Figura 7** - Viscosidade rotacional para ligante original, ligante RTFO, Nanoargila A e ligante de asfalto modificado Nanoargila B

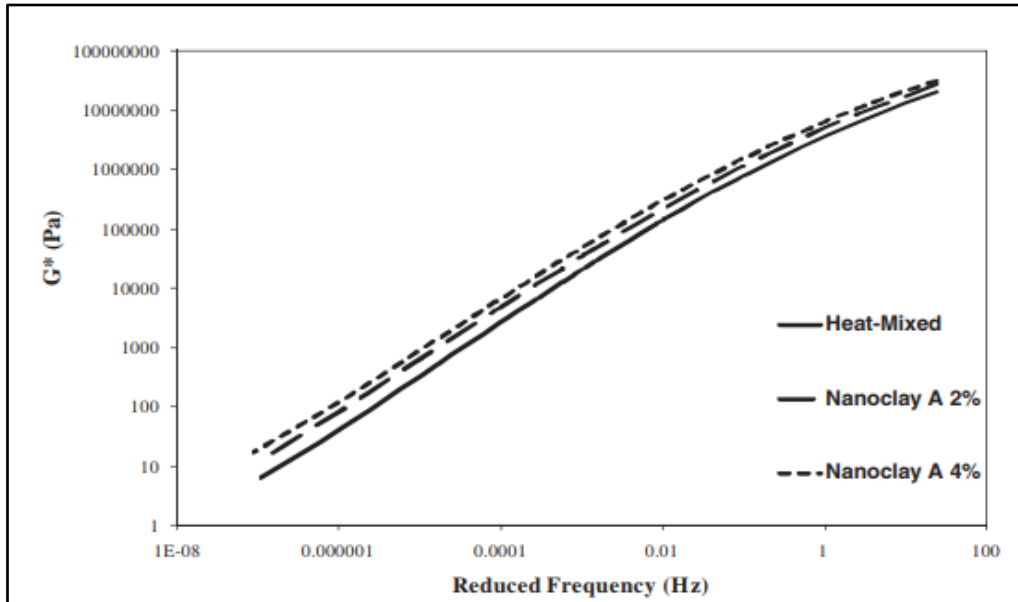


**FONTE:** You *et al.* (2011)

Ainda prosseguindo ao estudo, a adição dessas nanoargilas proporcionaram melhorias no módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*(Pa)$ ), conferindo maior rigidez ao ligante modificado. Na Figura 8, a aplicação da nanoargila A em teores de 2% e 4%, resulta em um acréscimo do módulo de cisalhamento dinâmico comparado ao ligante

puro, como também pode concluir que o aumento da frequência de carregamento resulta em pequenas variações do módulo.

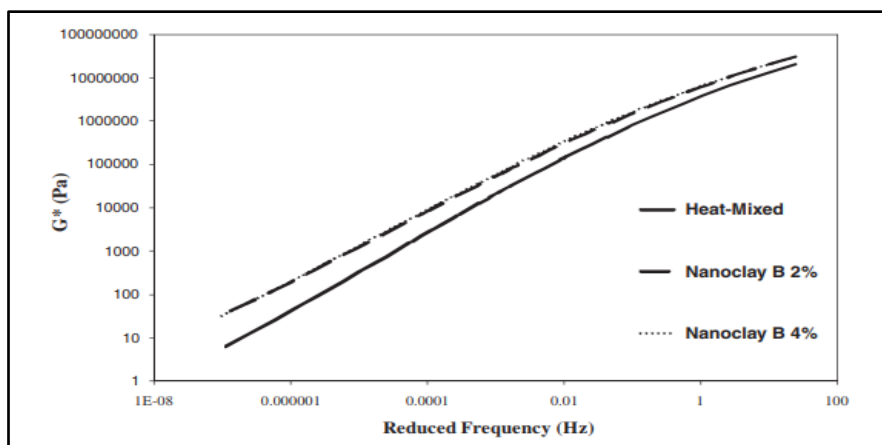
**Figura 8** - Módulos complexos de cisalhamento DSR ( $G^*$ ) no asfalto original, adição de 2% e 4% de nanoargila A ao ligante asfáltico



**FONTE:** You *et al.* (2011)

De acordo com a Figura 9, foi adicionado nanoargila B em teores de 2% e 4%, resulta em um acréscimo do módulo de cisalhamento dinâmico comparado ao ligante puro, porém, não houve variação no módulo ao aumentar o teor de nanoargila B, como também pode concluir que o aumento da frequência de carregamento resulta em pequenas variações do módulo comparado às baixas frequências.

**Figura 9** - Módulos complexos de cisalhamento DSR ( $G^*$ ) no asfalto original, adição de 2% e 4% de nanoargila B ao ligante asfáltico



**FONTE:** You *et al.* (2011)

Essa pesquisa concluiu que a aplicação da nanoargila A obteve uma resistência à trincas maior em comparação com ao ligante puro e à nanoargila B. A nanoargila B teve melhorias mais pronunciadas ao elevar a viscosidade e módulo complexo do que a nanoargila A.

Já em Farias et al., (2016) citado por Filho (2017), também foi estudado o efeito das nanoargilas como modificador do ligante asfáltico de petróleo, a Cloisite 20A e montmorilonita, no intuito de modificar o CAP 50/70, como também associando a nanoargila com SBS ao CAP. O teor adicionado foi de 4% em amostras arranjadas da seguinte forma:

- Ligante convencional;
- Ligante modificado com 4% de montmorilonita;
- Ligante modificado com 4% de Cloisite 20A;
- Ligante modificado com 4% de SBS;
- Ligante modificado com 4% de SBS com 4% de montmorilonita;
- Ligante modificado com 4% de SBS com 4% de Cloisite 20A.

Para os ensaios empíricos, as respectivas amostras, foram obtidos resultados satisfatórios quanto ao aumento da viscosidade e do ponto de amolecimento, como também a uma redução da penetração, entretanto, a amostra de ligante modificado com 4% de SBS associado a 4% de montmorilonita apresentou resultados mais notáveis em relação aos demais.

Em relação aos ensaios reológicos, todas as amostras, exceto a de ligante modificado com 4% de montmorilonita, apresentaram resultados otimistas quanto à recuperação elástica, aumento do módulo complexo e redução do ângulo de fase, significando melhoria à elasticidade e a resistência à deformação permanente. O grau de desempenho (PG) do ligante asfáltico modificado por SBS com nanoargila também mostrou resultados satisfatórios na prevenção de grandes deformações no pavimento asfáltico. O ligante asfáltico modificado apenas por montmorilonita e o Cloisita 20A apresentaram comportamento parecidos com o do ligante convencional, entretanto, a argila Cloisita 20A proporcionou melhorias na estabilidade ao armazenar o ligante asfáltico modificado com SBS em altas temperaturas.

De acordo com Jahromi & Khodaii (2009) citado por Santos (2012), utilizou-se argila cloisite para estudar o comportamento nas propriedades reológicas do ligante asfáltico, constatou-se que sua aplicação retarda o envelhecimento do asfalto com auxílio



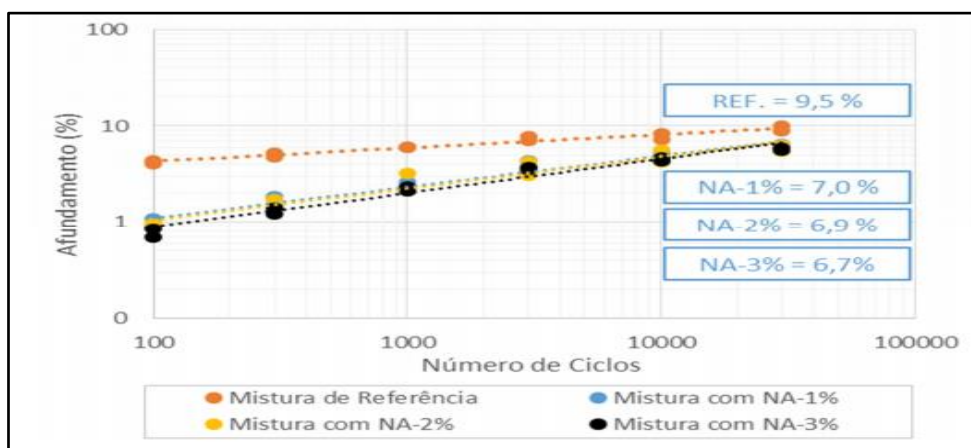
do ensaio no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, comparando ligante convencional e o modificado com nanoargila. O ligante asfáltico modificado apresentou acréscimo da rigidez e redução do ângulo de fase, bem como aumento de resistência ao envelhecimento.

Liu & Jun Jan (2010) segundo Santos (2012), em sua pesquisa, ao realizar ensaio DSR e analisar dados reológicos, obteve acréscimo do módulo complexo e redução do ângulo de fase do ligante modificado com adição de montmorilonita em comparação com o ligante convencional, portanto, por causa das características do asfalto, o estudo concluiu que a argila montmorilonita organofilizada OMMT consiste em um ótimo modificador das propriedades reológicas do ligante asfáltico.

A aplicação da nanotecnologia nos pavimentos asfálticos, em específico às nanopartículas de argilas, como modificadores dos ligantes asfálticos proporcionam melhorias satisfatórias, além de custo reduzido. Desta forma, O cimento asfáltico de petróleo 50/70 quando modificado por nanopartículas, obteve propriedades parecidas com o do ligante 55/75-E (SANTOS, 2012).

Segundo a pesquisa desenvolvida por Melo (2014), a adição de nanomateriais como os nanotubos de carbono e as nanoargilas, proporcionaram melhorias reológicas e mecânicas nas misturas asfálticas. O ligante utilizado foi o (CAP 50-70, PG 58-22), modificados por teores de 1%, 2% e 3% de nanomateriais. A Figura 10 ilustra os efeitos da nanoargila na resistência à deformação de trilha de roda, ou seja, o seu desempenho à deformação permanente das misturas modificadas se comparadas à mistura de referência (convencional).

**Figura 10** - Desempenho à deformação permanente da mistura convencional e das misturas modificadas com as nanoargilas em diferentes teores.



FONTE: Melo (2014)

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

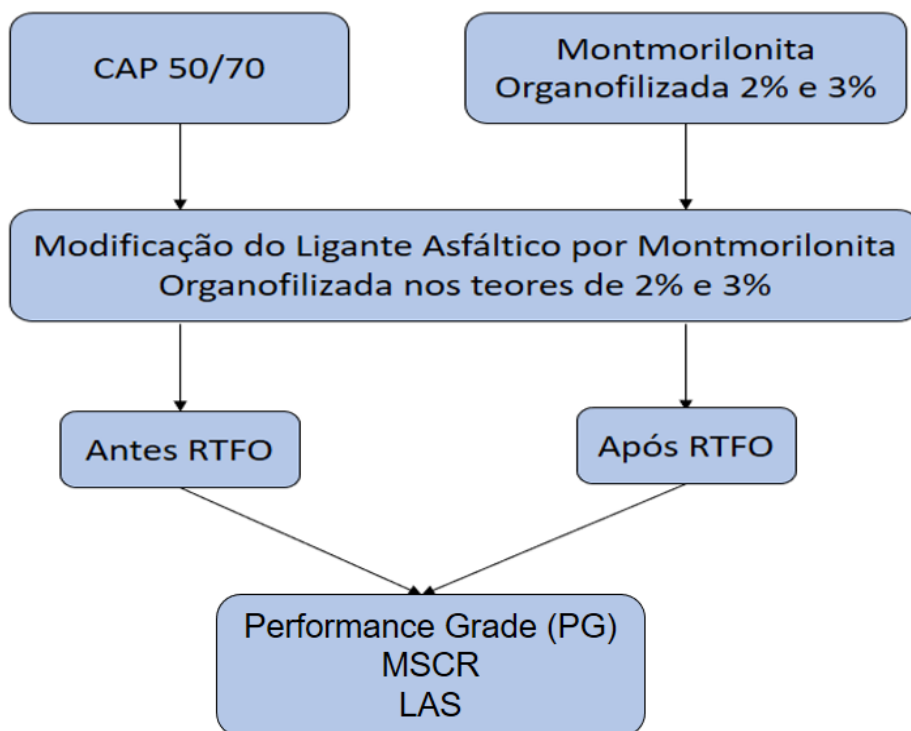
Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Asfáltico de Petróleo CAP 50/70 - obtido pelo processo de destilação do petróleo pela refinaria Duque de Caxias (REDUC), pertencente à Petrobras S/A, e distribuído, pela empresa Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda, localizada no município de Candeias-BA.
- Asfalto Modificado por Polímero (AMP) 55/75 - modificado com polímero elastoméricos de SBS (estireno-butadieno- estireno), produzido pela empresa Stratura Asfaltos S/A, localizada no município de Maracanaú-CE;
- Montmorilonita organofilizada - fornecida pela Bentonit União Nordeste.

#### 3.2 Métodos

A metodologia utilizada para desenvolvimento desta pesquisa segue as normas da ASTM e da AASHTO (Tabela 4), conforme ensaios descritos posteriormente. A presente pesquisa foi realizada de acordo com o fluxograma a seguir (Figura 11).

Figura 11 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



**Tabela 4** - Ensaio para caracterização reológica do ligante modificado

| ENSAIOS   | NORMA TÉCNICA   |
|---|-----------------|
| Determinação do grau de desempenho (PG)                       | ASTM D6373 – 15 |
| Ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) | ASTM D7405 - 15 |
| Linear Amplitude Sweep - LAS                                  | AASHTO TP101-14 |

### 3.2.1 Preparação da mistura

As misturas do ligante asfáltico convencional, CAP 50/70, a montmorilonita organofilizada foi realizada em um agitador mecânico de baixo cisalhamento, marca FISATOM modelo 722D (Figura 12). O procedimento de mistura foi executado segundo procedimentos descritos em Faxina (2006) e Souza (2012). Nestes, o ligante puro foi aquecido em estufa, a uma temperatura de 120°C e, em seguida, foi despejado 500g de ligante no agitador mecânico, onde foi aguardada a estabilização da temperatura em 135°C. Quando atingida a temperatura, teores de argila montmorilonita organofilizada proporcionais ao peso do ligante puro (2% e 3%), serão adicionados ao ligante. A rotação utilizada está pré-estabelecida em 406 rpm por um período de 20 minutos. Posteriormente, a mistura será retirada, resfriada à temperatura ambiente e, acondicionada em recipiente fechado para utilização posterior.

**Figura 12** - Agitador Mecânico, marca FISATOM, modelo 722D



### 3.2.2 RTFO (*Estufa de Filme Fino Rotativo*)

O procedimento RTFO que segue a norma ASTM D 2872-97 avalia o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico em movimento. Uma fina película de asfalto de 35g é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163°C por 85 minutos, com injeção de ar. Os efeitos do calor e do ar são determinados a partir de alterações nos valores das análises físicas como medidos antes e depois do tratamento no forno.

O procedimento possibilita a identificação de mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150 °C, verificadas por variações nas propriedades de consistência. Também pode ser usado para se determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade ou oxidação do asfalto.

### 3.2.3 MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*)

A American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) utiliza o reômetro de cisalhamento dinâmico ou DSR (Dynamic Shear Rheometer) para um ensaio conhecido como Repeated Creep and Recovery Test (RCRT), para a caracterização da resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente e recentemente foi proposto seu aperfeiçoamento e agora é conhecido como ensaio de Fluência e Recuperação Sob Tensão Múltipla (Multiple Stress Creep Recovery-MSCR).

A execução do MSCR é feita com a amostra virgem e submetida ao envelhecimento de curto prazo no RTFO. No ensaio é utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) para aplicar uma carga constante que é estabelecida pela norma ASTM D7405, cujos valores são de 100 e 3200 Pa, o tempo de execução dessa carga é determinado em 1s e 9s de repouso formando um ciclo que é repetido por 10 vezes.

### 3.2.4 PG - *Performance Grade*

Consoante Farias *et al.*, (2016) o Performance Grade (PG) serve para categorizar o betume utilizado em pavimentos de asfalto em relação ao seu desempenho em diferentes temperaturas. Dessa forma, o ensaio realizado no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), conforme recomenda os protocolos de testes da SUPERPAVE, é crucial para

avaliar a adequação em temperaturas, isto é, o comportamento viscoelástico do ligante modificado, que é influenciado pela temperatura e tempo de carregamento.

O respectivo ensaio foi executado antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), provendo dados sobre o grau de desempenho dos ligantes, isto é, determinando dados sobre a temperatura de campo, como temperatura máxima e mínima para execução desse ligante asfáltico, como também fornece parâmetros de deformabilidade e rigidez.

Conforme Filho (2017), é possível fazer uma análise, chamada índice de envelhecimento “aging index” (AI), das amostras envelhecidas a curto prazo (RTFO) que foram ensaiadas no teste de PG (Grau de Desempenho), o parâmetro utilizado nesse processo é o  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , tanto antes como após o envelhecimento. De acordo com Azahar *et al.*, (2016), esse índice indica a suscetibilidade do material ao envelhecimento, mostrando o desenvolvimento da rigidez em diferentes períodos da vida de serviço do pavimento asfáltico tratado. Esse índice é representado pela expressão matemática (1).

$$AI = \frac{(G^*/\text{SEN}(\delta) \text{ PÓS RTFO})}{(G^*/\text{SEN}(\delta) \text{ PRÉ RTFO})} \quad \text{expressão matemática (1).}$$

### 3.2.5 Linear Amplitude Sweep (LAS)

O ensaio de LAS apresenta sua metodologia conforme a AASHTO TP 101-14, objetivando a determinação da resistência ao dano de ligantes asfálticos por intermédio da aplicação de carregamentos cíclicos aplicando amplitudes de carga linearmente crescentes, ou seja, submetido a uma taxa de dano acumulado. Segundo Hintz & Bahia (2013), essa taxa acumulada pode ser uma medida de desempenho quanto à fadiga do ligante asfáltico em certas condições tanto para a estrutura do pavimento como para o tráfego.

Segundo Filho (2017), o presente ensaio é realizado em duas etapas. A primeira sendo executada a uma varredura de frequência (entre 0,2 e 30 Hz com amplitude de deformação de 0,1%) efetuado ao ligante asfáltico. Já a segunda etapa, faz-se uma varredura partindo de deformações de 0,1% até 30%, efetuando uma frequência fixa de 10 Hz.

Conforme Pamplona (2013), após a realização das duas etapas que preconiza o ensaio, são coletados leituras, para análise posterior, do comprimento das trincas originadas nas rupturas por fadiga.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme dito anteriormente, a preparação da mistura do ligante asfáltico convencional, CAP 50/70, e a montmorilonita organofilizada a 2 e 3 % foi realizado em um agitador mecânico de baixo cisalhamento. Posteriormente, separando amostras 2 % e 3% antes e após o procedimento de envelhecimento de curto prazo (RTFO), sendo assim, necessário para a realização dos ensaios de caracterização reológicos da presente pesquisa.

### 4.1 Performance Grade (PG)

A Figura 13 apresenta os dados obtidos do ligantes asfáltico puro ao realizar o ensaio de PG no reômetro. A Figura 14 representa os dados encontrados para o ligante puro envelhecido a curto prazo. A Figura 15 representa os dados obtidos para AMP 55/75, antes do envelhecimento a curto prazo.

**Figura 13** - Dados do ensaio Performance Grade (PG) para ligante asfáltico puro

Test: Original Binder  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

**RESULTS**

|   | Angular Freq.<br>rad/s | Temp.<br>°C | Osc. Stress<br>Pa | % Strain | Delta<br>degrees | G*<br>kPa | G*/sin(delta)<br>kPa | Pass/Fail |
|---|------------------------|-------------|-------------------|----------|------------------|-----------|----------------------|-----------|
| 1 | 10.0                   | 46.0        | 3.66              | 12.2     | 84.4             | 30.1      | 30.2                 | Pass      |
| 2 | 10.0                   | 52.0        | 1.33              | 12.0     | 86.2             | 11.1      | 11.1                 | Pass      |
| 3 | 10.0                   | 58.0        | 0.52              | 12.0     | 87.6             | 4.36      | 4.36                 | Pass      |
| 4 | 10.0                   | 64.0        | 0.22              | 12.0     | 88.5             | 1.85      | 1.85                 | Pass      |
| 5 | 10.0                   | 70.0        | 0.10              | 12.0     | 89.2             | 0.844     | 0.844                | Fail      |

**Figura 14** - Dados do ensaio Performance Grade (PG) para ligante asfáltico puro envelhecido a curto prazo (RTFO)

Test: RTFO Residue  
 Geometry Diameter: 25.0 mm  
 Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

**RESULTS**

|   | Angular Freq.<br>rad/s | Temp.<br>°C | Osc. Stress<br>Pa | % Strain | Delta<br>degrees | G*<br>kPa | G*/sin(delta)<br>kPa | Pass/Fail |
|---|------------------------|-------------|-------------------|----------|------------------|-----------|----------------------|-----------|
| 1 | 10.0                   | 46.0        | 6.61              | 10.0     | 80.3             | 66.0      | 66.9                 | Pass      |
| 2 | 10.0                   | 52.0        | 2.40              | 9.9      | 83.0             | 24.2      | 24.4                 | Pass      |
| 3 | 10.0                   | 58.0        | 0.94              | 10.0     | 85.2             | 9.43      | 9.46                 | Pass      |
| 4 | 10.0                   | 64.0        | 0.39              | 10.0     | 86.8             | 3.89      | 3.90                 | Pass      |
| 5 | 10.0                   | 70.0        | 0.17              | 10.1     | 88.0             | 1.71      | 1.71                 | Fail      |

**Figura 15** - Dados do ensaio Performance Grade (PG) para ligante asfáltico 55/75

Test: Original Binder  
 Geometry Diameter: 25.00 mm  
 Gap: 1000 µm  
 Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

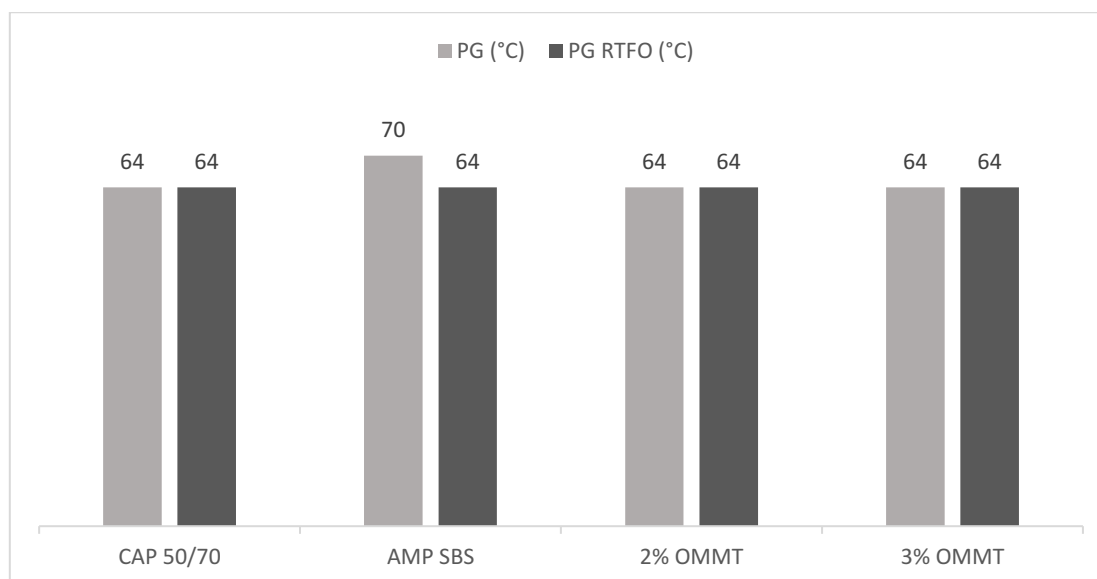
**RESULTS**

|   | Angular Freq.<br>rad/s | Temp.<br>°C | Oec. Stress<br>Pa | % Strain | Delta<br>degrees | G*<br>kPa | G*/sin(delta)<br>kPa | Pass/Fail |
|---|------------------------|-------------|-------------------|----------|------------------|-----------|----------------------|-----------|
| 1 | 10.0                   | 46.0        | 2.78              | 12.1     | 75.1             | 23.0      | 23.6                 | Pass      |
| 2 | 10.0                   | 52.0        | 1.14              | 12.0     | 75.1             | 9.44      | 9.77                 | Pass      |
| 3 | 10.0                   | 58.0        | 0.51              | 12.0     | 75.2             | 4.27      | 4.42                 | Pass      |
| 4 | 10.0                   | 64.0        | 0.25              | 12.0     | 75.5             | 2.10      | 2.17                 | Pass      |
| 5 | 10.0                   | 70.0        | 0.13              | 12.1     | 75.8             | 1.09      | 1.13                 | Pass      |
| 6 | 10.0                   | 76.0        | 0.07              | 12.1     | 76.2             | 0.586     | 0.604                | Fail      |

O Performance Grade (PG) para ligante asfáltico 55/75 envelhecido a curto prazo (RTFO) é de 64 (°C).

A seguir, na Figura 16, estão representados as temperaturas máximas provenientes do ensaio, tanto antes como após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), considerando os critérios de parada, propriamente dito.

**Figura 16** - Temperaturas máximas de Performance Grade (PG) para os ligantes asfálticos em estudo



É evidenciado, em primeira análise que o CAP 50/70 continuou com a mesma temperatura máxima de PG, tanto antes como após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), dessa forma, sofrendo menos efeito da oxidação diante a essas elevadas temperaturas de aplicação.

Nota-se que para a adição de 2% e 3% de Montmorilonita Organofilizada ao CAP 50/70, não houve alterações nas temperaturas máximas de PG antes e após o

envelhecimento a curto prazo (RTFO), concluindo que não há alterações significativas nas propriedades do ligante para os níveis de 2% e 3%, ou seja, mantendo a temperatura de PG constante, isto é, resistentes ao efeito oxidativo, mantendo as propriedades de deformabilidade e rigidez diante a elevadas temperaturas. O PG do CAP 55/75 sofre uma redução de temperatura, assim, indicando que fica vulnerável ao efeito da oxidação, mas após RTFO, o AMP SBS é igual ao do ligante puro, como também dos ligantes modificados.

As Figuras 17 e 18 relacionam o módulo complexo ( $G^*$ ) com a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) antes e após envelhecimento a curto prazo, vale salientar que não foi feita a análise pós RTFO do AMP SBS. Na Figura 17, o resultado obtido mostra que o parâmetro de rigidez sofreu uma leve queda com a adição dos teores de Montmorilonita Organofilizada, dessa forma, evidenciando uma redução da rigidez do ligante asfáltico quando comparado com o CAP 50/70 puro, entretanto, os ligantes modificados em teores de 2% e 3% apresentaram maior rigidez quando comparado com o AMP SBS.

A Figura 18, que ilustra os resultados obtidos para os ligantes, que foram submetidos ao processo de envelhecimento a curto prazo, o ligante modificado nos teores de 2% e 3% tornaram-se consideravelmente menos rígido se comparado com o CAP 50/70 puro de referência. Os ligantes modificados apresentam praticamente nenhuma diferença de rigidez entre ambos os teores, havendo apenas um leve aumento da rigidez dos dois se comparado antes do RTFO.



Figura 17 - Relação Módulo Complexo (G\*) e Temperatura (°C) dos ligantes em estudo

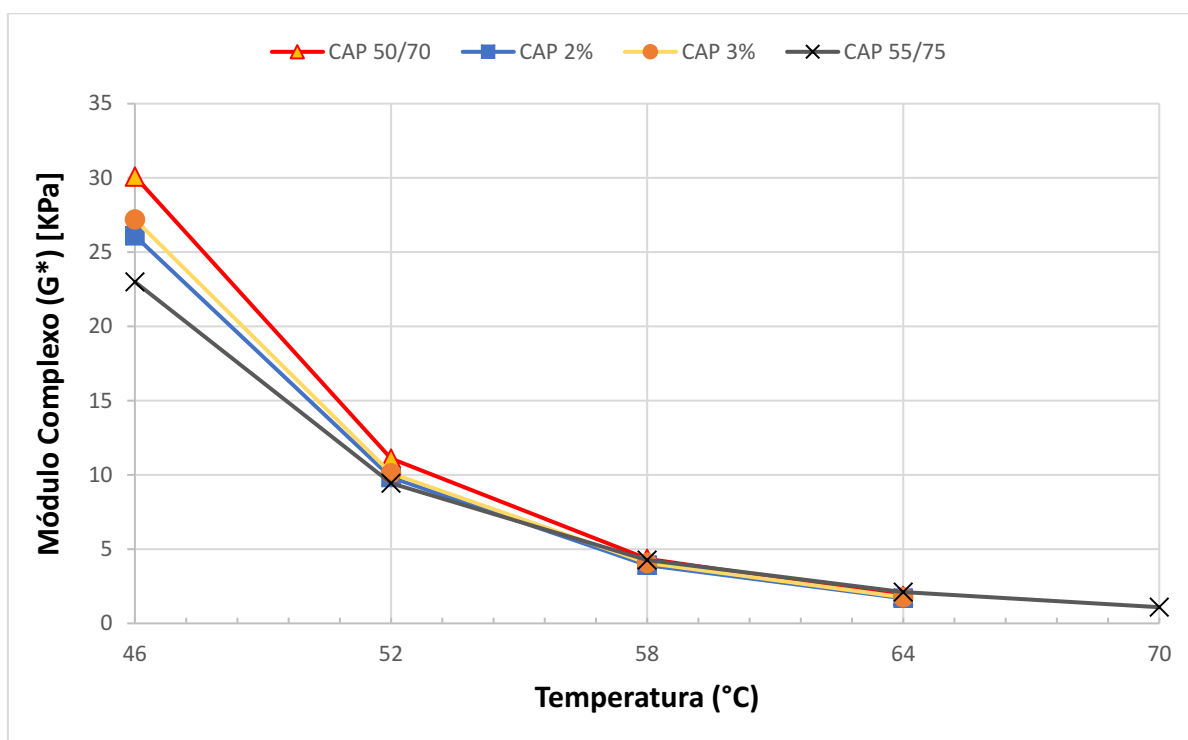
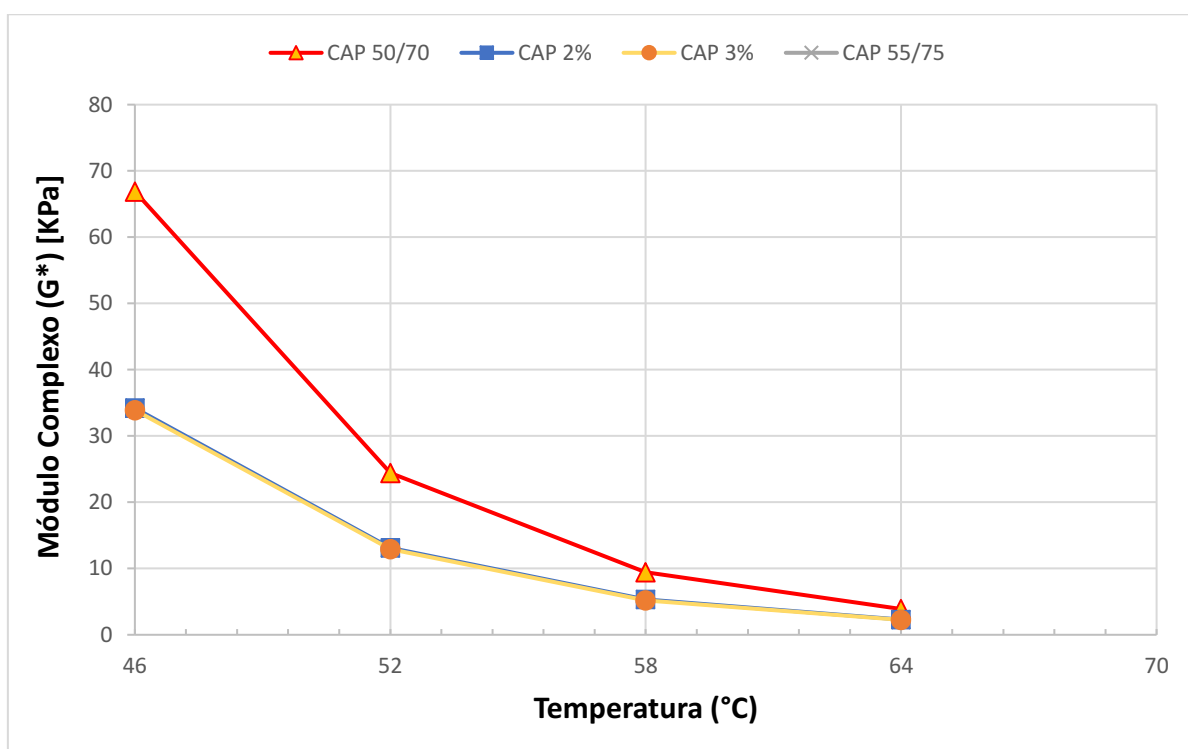


Figura 18 - Relação Módulo Complexo (G\*) e Temperatura (°C) dos ligantes em estudo após RTFO.

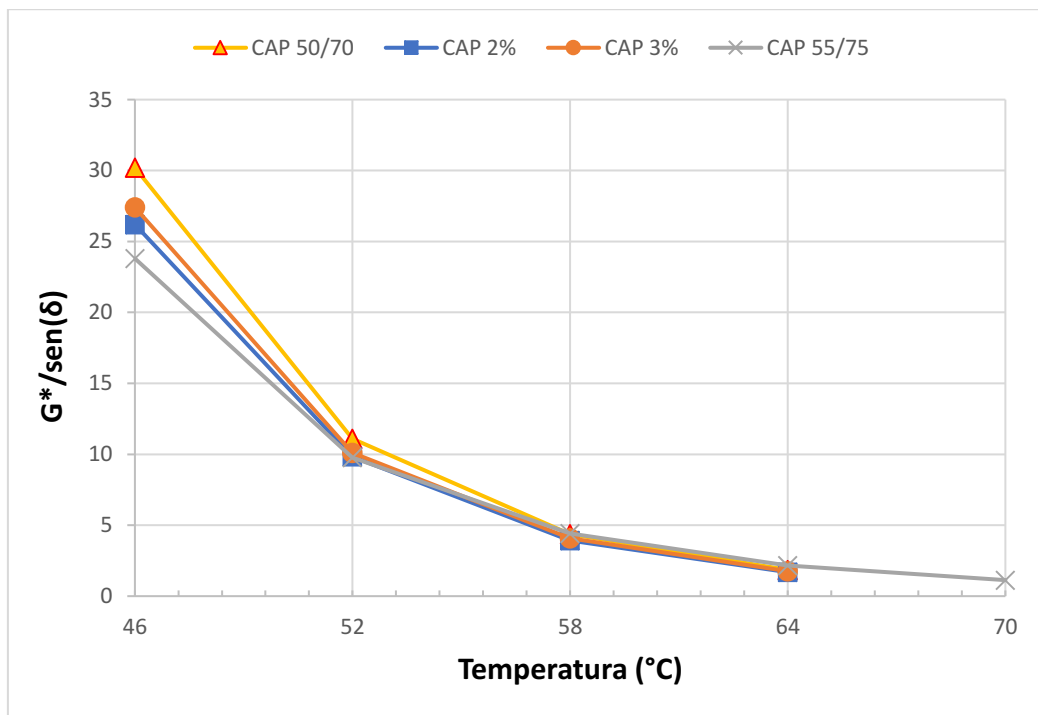


Ao analisar o primeiro gráfico do módulo complexo antes do envelhecimento a curto prazo (RTFO), a temperatura de 46 °C mostra que o ligante puro apresenta valores superiores aos demais em estudo, com ordem de grandeza de 30 kPa, esse valor vai sendo reduzido à medida que há aumento da temperatura, assim, aproximando-se dos valores

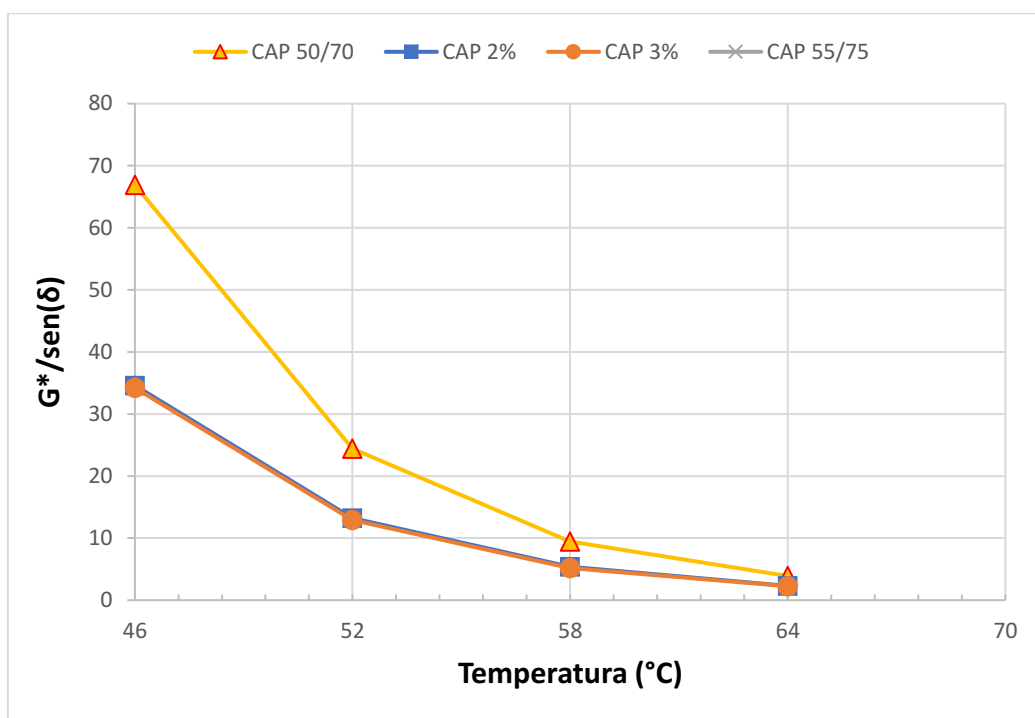
obtidos para os ligantes modificados, apresentando valores praticamente iguais à partir da temperatura de 58 °C. Em relação ao CAP 55/75, os ligantes modificados inicialmente apresentam maior rigidez, no entanto, à partir de 52 °C, os valores são praticamente idênticos, em contrapartida o CAP 55/75 apresenta valores de módulo complexo até 70 °C, tendo uma maior temperatura de aplicação se comparado com os ligantes modificados.

Em conformidade com a análise do  $G^*$ , faz-se também a análise da variação do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , representados pelas Figuras 19 e 20, tanto antes como após o envelhecimento a curto prazo (RTFO).

**Figura 19** - Relação  $G^*/\text{sen}(\delta)$  e Temperatura (°C) dos ligantes em estudo



**Figura 20** - Relação  $G^*/\text{sen}(\delta)$  e Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos ligantes em estudo após RTFO.



Comparando os ligantes modificados nos teores de 2% e 3% entre si, fixando uma temperatura de  $52^{\circ}\text{C}$ , tem-se a seguinte Tabela 5, para ligantes modificados antes do RTFO. A comparação entre os ligantes modificados, indica que houve um leve aumento do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  ao sair de 2 % e aplicar 3 %, evidenciando que o ligante 3% torna-se menos deformável, portanto, a diferença da adição dos teores não é discrepante, possuem valores muito próximos de deformação permanente.

**Tabela 5** - Comparação ligante modificados antes do RTFO

| T( $52^{\circ}\text{C}$ ) |      |        |
|---------------------------|------|--------|
| CAP 50/70 + 2%            | 9,84 | +2,64% |
| CAP 50/70 + 3%            | 10,1 |        |

Realizando a análise comparando o CAP puro com os ligantes modificados, percebe-se que houve uma redução de 12,8 % do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  quando comparado o CAP 50/70 puro com o mesmo ligante modificado com 2 %, ou seja, indicando que o ligante se torna mais deformável quando modificado, conforme ilustra a Tabela 6. Para o teor de 3%, houve também uma redução do parâmetro, só que menor que o anterior, indicando que tornou o ligante mais deformável, conforme representado na tabela 7.

**Tabela 6** - Comparação ligante de referência com ligante modificado em 2%

| T(52 °C)       |      |        |
|----------------|------|--------|
| CAP 50/70      | 11,1 | -12,8% |
| CAP 50/70 + 2% | 9,84 |        |

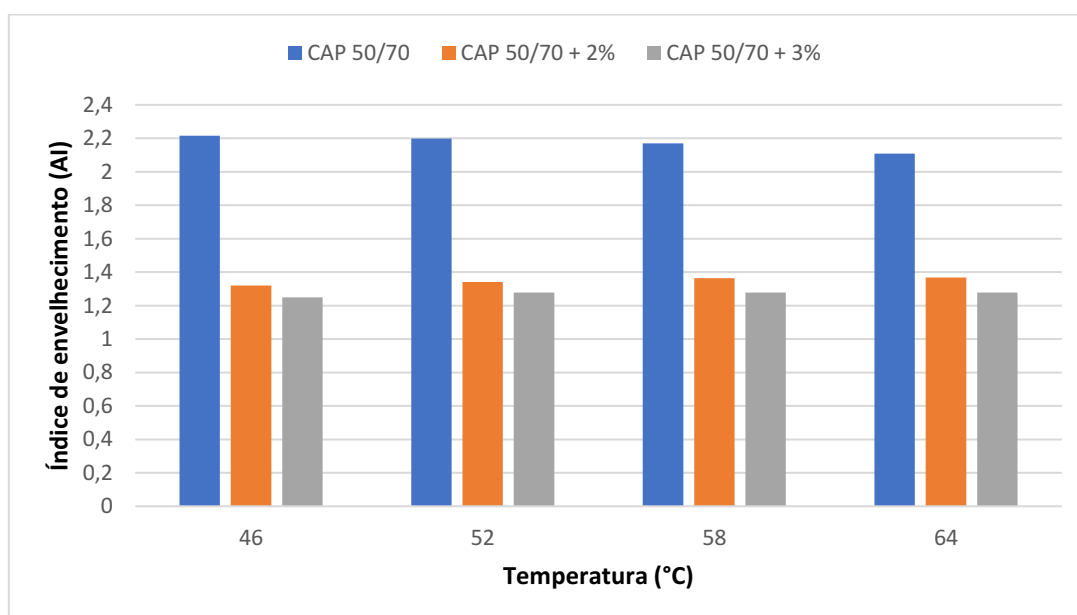
**Tabela 7** - Comparação ligante de referência com ligante modificado em 3%

| T(52 °C)       |      |       |
|----------------|------|-------|
| CAP 50/70      | 11,1 | -9,9% |
| CAP 50/70 + 3% | 10,1 |       |

Observa-se que quanto maior a adição dos teores, menos deformável será o ligante, se aproximando do ligante de referência, entretanto, esses dois teores ficaram mais deformáveis quando comparados com o ligante puro de referência.

A Figura 21 representa os valores de índice de envelhecimento (AI) dos ligantes para cada temperatura de PG. De acordo com os resultados obtidos, nota-se que o CAP 50/70 puro possui valores maiores de (AI), evidenciando que esse material está mais susceptível à oxidação, em contrapartida os ligantes modificados com teores de 2% e 3% apresentam uma prevenção ou atenuação desse efeito oxidativo, por possuírem valores inferiores de (AI).

**Figura 21** - Índices de envelhecimento (AI) para o CAP 50/70 puro e modificados



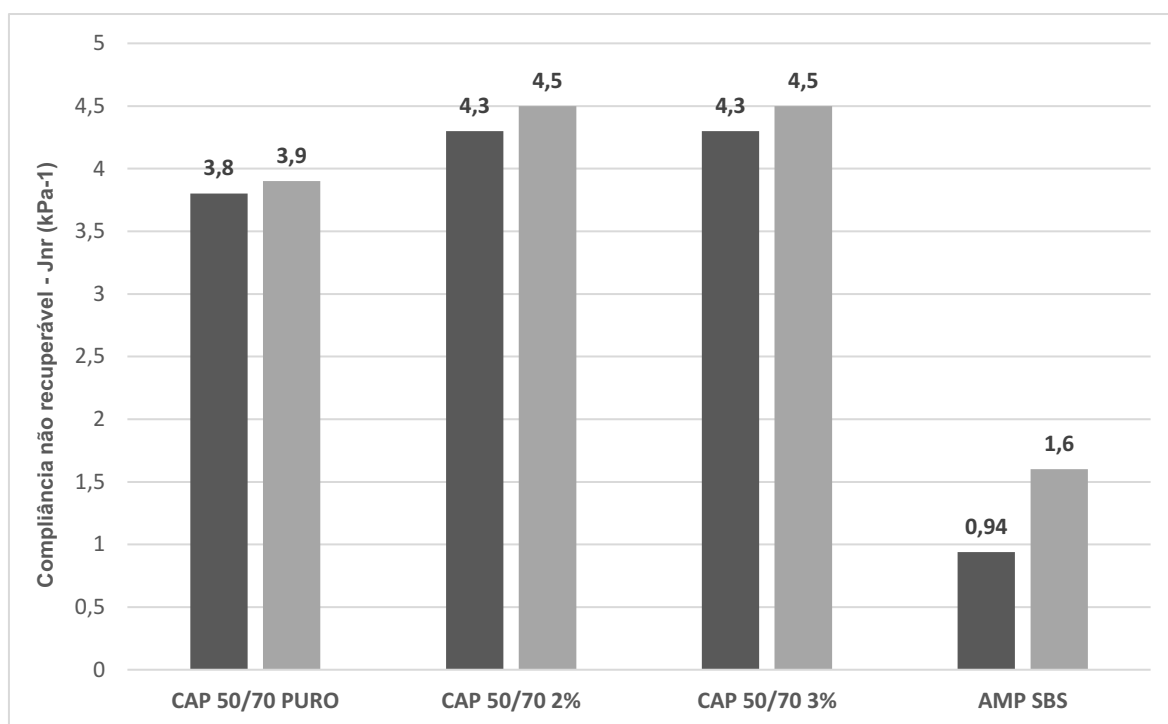
Ao analisar para determinada temperatura de PG, seja 58°C para análise, percebe-se que o CAP 50/70 puro apresenta valor (AI) de 2,17 em relação a 1,36 e 1,28 para os

teores de 2% e 3%, respectivamente. Do ligante de referência para os teores de 2% e 3%, representa redução de 37,3% e 41% do valor índice de envelhecimento, respectivamente. Conforme Santos (2012), essa resistência à oxidação, ou seja, ao envelhecimento, pode ser motivada pelo fato de que a Montmorilonita ao se transformar em organofílica (modificada ou hidrofóbica), fica mais estável e reduz a deterioração. Ainda segundo a conclusão de Yu *et al.* (2009), a introdução de argila modificada forma uma estrutura esfoliada, no que contribui para o retardamento do envelhecimento, elevando sua resistência a ação da oxidação, pois a adição desses teores forma camadas no ligante asfáltico, dificultando a saída dos componentes voláteis e a entrada de oxigênio.

#### 4.2 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

A Figura 22 representa o valor da compliância não recuperável (Jnr), perante às aplicações de tensões propriamente ditas.

Figura 22 - Compliância não recuperáveis para todos os ligantes em estudo



Quanto maior forem os valores de Jnr, significa que o ligante possui elevada suscetibilidade à deformação permanente, em contrapartida, menores valores significam que o ligante possui maior resistência a esse efeito. Dessa forma, ao analisar a Figura 22, nota-se que os ligantes modificados obtiveram maiores valores de compliância não

recuperável, quando comparados aos ligantes de referência, assim, evidenciando um indicador negativo para a modificação do ligante asfáltico puro com os teores de 2% e 3%, isto é, apresentam maior suscetibilidade à deformação permanente. O AMP SBS apresenta valores menores, apresentando maior resistência a esse efeito, é um dos detalhes do motivo de ser o ligante amplamente mais usado em serviço.

Conforme a AASHTO M320 (2016), a classificação para o tipo de tráfego é dividida de acordo com limites:

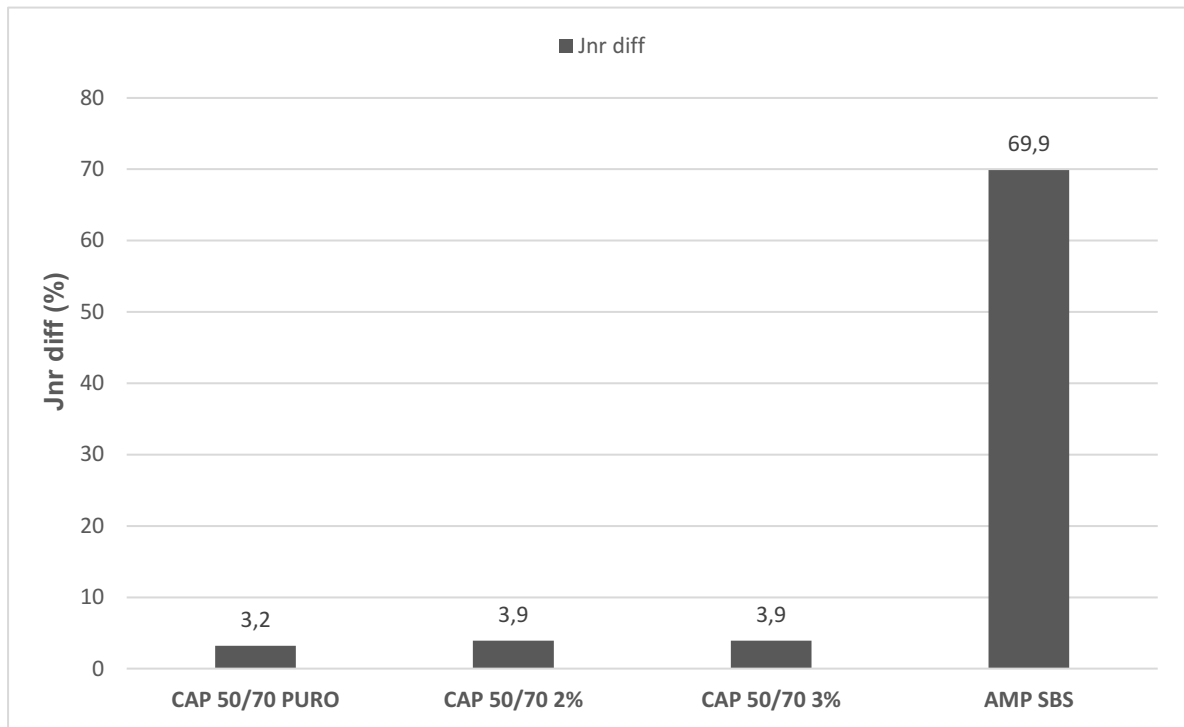
- Tráfego Padrão: Jnr entre os limites de  $2,0 \text{ kPa}^{-1}$  e  $4\text{kPa}^{-1}$ ;
- Tráfego Pesado: Jnr entre  $1 \text{ kPa}^{-1}$  e  $2 \text{ kPa}^{-1}$ ;
- Tráfego Muito Pesado: Jnr entre  $0,5 \text{ kPa}^{-1}$  e  $1 \text{ kPa}^{-1}$ ;
- Tráfego Extremo: Jnr entre  $0,25 \text{ kPa}^{-1}$  e  $0,5 \text{ kPa}^{-1}$ .

De acordo com a classificação dita anteriormente, pode-se analisar a Figura 22. O CAP 50/70 puro possui Jnr entre  $2,0 \text{ kPa}^{-1}$  e  $4\text{kPa}^{-1}$ , sendo classificado como tráfego padrão.

Os ligantes modificados apresentam valores de Jnr superiores ao valor máximo de  $4\text{kPa}^{-1}$  determinado pela Norma, não se enquadrando em nenhum tipo de tráfego, dessa forma, esses ligantes apresentam maior susceptibilidade a deformações. O ocorrido é motivado da realização do ensaio na temperatura de  $64 \text{ }^\circ\text{C}$ , uma vez que deixa o ligante mais fluido, como também o deixa mais deformável, o que foi corroborado no ensaio de PG da presente pesquisa. Por fim, o AMP SBS está classificado como tráfego pesado, mais um motivo de seu frequente uso comercial.

No ensaio MSCR também é obtido outro parâmetro, chamado Jnr diferencial. A Figura 23 elucida esses resultados para cada ligante em estudo.

**Figura 23** - Jnr diferencial para os ligantes de referência e para os modificados



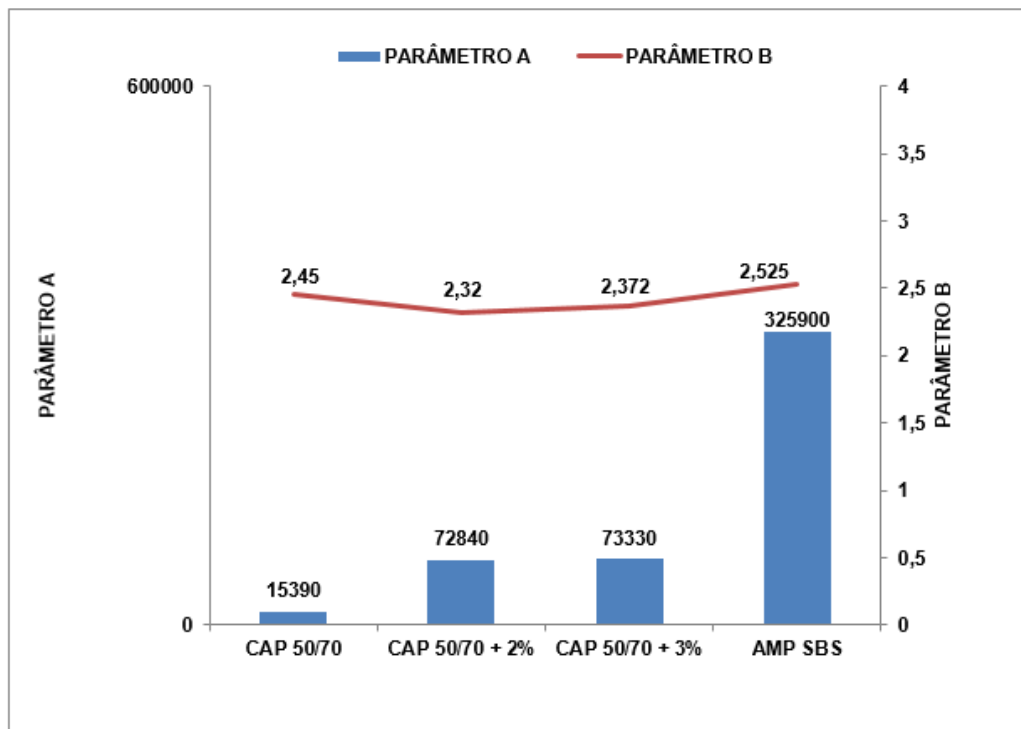
Conforme a AASHTO MP-19 (2010), a diferença entre Jnr submetido a tensões de 100 Pa e 3200 Pa (Jnr diff), no sentido de analisar a sensibilidade à diferença de tensões do material perante elevadas temperaturas, o Jnr diff deve ser menor que 75% para garantir que as propriedades do ligante não sejam muito sensíveis às essas diferenças bruscas de tensões.

Levando em consideração o que a norma preconiza, pode-se concluir que os ligantes da presente pesquisa estão dentro desse limite, isto é, são adequados para a pavimentação por serem menos sensíveis às variações de tensões. Ao analisar os resultados apresentados na Figura 23, percebe-se que houve um leve aumento do Jnr diff, conferindo aos ligantes modificados um aumento da sensibilidade a tensões inesperadas que podem ocorrer na superfície do pavimento asfáltico, entretanto, como é inferior a 75% determinando pela norma, assim, não prejudica o desempenho do ligante. O AMP SBS possui o maior valor de Jnr diff, mesmo sendo inferior ao limite de 75%, esse ligante é mais sensível às variações de carregamento inesperados.

### 4.3 Linear Amplitude Sweep (LAS)

Os parâmetros A e B na resistência ao dano determinadas através do ensaio da Varredura Linear de Amplitude (LAS) para os ligantes de referência e modificados estão apresentados na Figura 24.

Figura 24 - Parâmetros A e B para os ligantes de referência e modificados



O parâmetro A, é a relação à variação da integridade do material pertinente ao dano acumulado, assim, quanto maior for o valor de A, mais a amostra sustentou a sua integridade inicial. Já o parâmetro B é um sinal da sensibilidade do ligante ao acréscimo do nível de deformações, isto é, maiores valores de B, significa maior suscetibilidade do ligante à variação da amplitude de deformações devido à temperatura (MARINHO FILHO, 2017).

A análise para o parâmetro A, a adição dos teores confere acréscimo no parâmetro quando comparados com o ligante CAP 50/70. O ligante que obteve maior valor foi o modificado em 3 %, representando um aumento de 376% em relação ao ligante puro. A diferença entre os teores de 2% e 3% são quase nulas. Dessa forma, percebe-se que a adição de Argila Montmorilonita Organofilizada atua em benefício da deformabilidade do ligantes asfáltico, isto é, mantendo maior integridade inicial se comparado com o ligante de referência.



Relativo ao parâmetro B, houve decréscimo nos ligantes modificados quando comparados com o ligante puro, assim, significando uma redução da sensibilidade à variação do nível de deformação diante mudanças térmicas. A diferença entre os valores do parâmetro B para os ligantes modificados são quase nulos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1 Considerações Finais

Após os estudos referentes à adição da montmorilonita organofilizada nos teores de 2 e 3% ao ligante asfáltico convencional, chegou-se às seguintes considerações:

- os ligantes modificados com MMT apresentam valores menores de módulo complexo, tornando-os menos rígidos que o ligante convencional.

- O grau de desempenho dos ligantes com MMT é o mesmo devido ao aumento da resistência ao envelhecimento oxidativo. Há a mesma resistência à deformação permanente do teor de 3% comparado ao de 2%, porém a compilância não-recuperável destes ligantes é maior, ou seja, eles são menos resistentes à deformação permanente do que o ligante convencional.

- Os ligantes modificados com montmorilonita possuem maior integridade inicial do ligante asfáltico diante do acúmulo de danos em relação ao parâmetro “A”.

➤ Comparando o CAP + MMT ao CAP + SBS:

- O CAP 55/75 é o mais resistente à deformação permanente e possui maior suscetibilidade à deformação do que os teores de 2% e 3% de montmorilonita.

- O modificado por SBS é o que apresenta a maior melhoria na integridade comparado ao ligante virgem. Em relação ao parâmetro “B”, ao comparar o CAP + SBS ao CAP + MMT percebe-se que o aumento da sensibilidade desse ligante à variação do nível de deformações é devido à adição do polímero. O CAP 55/75 possui uma maior resistência ao dano acumulado, todavia se mostra mais sensível ao aumento da amplitude de deformações. Os ligantes modificados apresentaram menor sensibilidade se comparado com o de referência e o CAP 55/75.

## 5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

- Avaliar as propriedades químicas do ligante modificado por montmorilonita organofilizada nos teores utilizados neste estudo;
- Analisar a viabilidade de utilização do ligante asfáltico modificado por montmorilonita organofilizada com Genamin para produção de misturas asfálticas.

## REFERÊNCIAS

ANP: Agência Nacional do Petróleo. Asfalto. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2/asfalto>>. Acesso em: 10 de maio 2018.

AASHTO (2014) TP101: **Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. American Association of Stante Highway and Transportation Officials, Washington D. C., EUA.

CNT: Confederação Nacional do Transporte. Boletim estatístico (2016). Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 09 de maio 2018.

CNT: Confederação Nacional do Transporte. Estudo Transporte Rodoviário – Desempenho do Setor, Infraestrutura e Investimentos (2016). Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Estudo/transporte-rodoviario-desempenho>>. Acesso em: 09 de maio 2018.

CNT: Confederação Nacional do Transporte. Relatório gerencial (2017). Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatório-gerencial>>. Acesso em: 09 de maio 2018.

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, 2008. 501p.

CARLESSO, Gabriela C. **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 em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 105 fls, 2014.

**DNER:** DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Cimentos Asfálticos de Pavimentação: DNER -EM 204/95. Rio de Janeiro, 7p.

**DNIT:** Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, EM 095 - Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Especificação de Material. Rio de Janeiro, 2006.

FANG, Changqing et al. **Nanomaterials Applied in Asphalt Modification: A Review.** *Journal Of Materials Science & Technology*, v. 29, n. 7, p.589-594, 2013.

FERNANDES, Mônica R. S. **Efeitos de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS.** Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 118 fls, 2009.

HINTZ, C.; BAHIA, H. **Simplification of Linear Amplitude Sweep Test and Specification** Parameter. *Transportation Research*. V. 2370, p. 10-16. 2013.

IMPERPAV Projetos e consultoria - Estudo comparativo: CAP 30-45 e CAP 50-70 Sua utilização em revestimentos asfálticos. Relatório Técnico. Editora ABCR, 2008.

JUNIOR, Tadeu de Cezaro. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 130fls, 2008.

LESUER, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and interface Science* V. 145. p.42-82.

MARINHO FILHO, Paulo G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, 153 fls, 2017.

MELO, João V. S. de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 414 fls, 2014.

MORALES, M. G. et al. (2004). **Effect of testing geometry on measuring fatigue of asphalt binders and mastics.** Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No.9, p.746-752.

**NBR 7208:** Materiais betuminosos para emprego em pavimentação. Rio de Janeiro, 1990.

NOGUEIRA, Mônica G. **Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, 168 fls, 2008.

Nuñez, Javier Yesid. **Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte), Universidade de São Paulo, 139fls, 2013.

PAMPLONA, Thais F. **Efeitos da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, 166 fls, 2013.

PEREIRA, Paulo A. A.; FREITAS, Elisabete F. de; NASCIMENTO, José H. O. **Nanotecnologia: Saiba mais sobre o seu uso na funcionalização de materiais asfálticos.** Asfalto em Revista, Rio de Janeiro, p.22-25, mai/jun 2011.

PORTUGAL, Antonio C. X. **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, 126 fls, 2016.

**Resolução ANP nº31/2007**. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>> Acesso em 17 de maio 2018.

**Resolução ANP Nº 19, 17 de março de 2005**. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resolanp/2005/julho&item=ranp-19--2005>>. Acesso em: 17 de maio 2018.

**Resolução ANP nº2 de 14/01/2005**. Disponível em: <<https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibelinck.php?numlink=1-6-34-2005-01-14-2>>. Acesso em: 10 de maio 2018.

Santos, Karine Pereira dos. **Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas como modificador em cimentos asfálticos de petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, 105fls, 2012.

Silva, João P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade de Brasília, 145fls, 2011.

SOBREIRO, Fernanda P. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS**. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, 346 fls, 2014.

SOUZA, M.V.R. **Efeitos de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, 147fls, 2010.

VAZZOLER, Fabrícia dos S. D. **Preparação e caracterização de argilas organofílicas e sua aplicação na adsorção de atrazina em água**. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Espírito Santo, 82 fls, 2017.

YANG, Jun; TIGHE; Susan. **A review of advances of Nanotechnology in asphalt mixtures**. *Journal Of Materials Science & Technology*, v. 96, n. 6, p.1269-1276, 2013.

YOU, Z. et al. **Nanoclay-modified asphalt materials: preparation and characterization**. *Construction and building materials*, v. 25, p. 1072- 1078, 2011.

YU, J.; ZENG, X.; WU, S.; WANG, L.; LIU, G. - **Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts**, Elsevier, *Materials Science and Engineering A*, 447, pp. 233-238, 2006.

YU, J.; FENG, P.; ZHANG, H.; WU, S. - **Effects of organo-motmorillonite on aging properties of asphalt**, Elsevier, *Construction and Building Materials*, pp. 2636 – 2640, 2009.