



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

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE  
LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR MONTMORILONITA  
NÃO ORGANOFILIZADA**

**THIAGO DE ARAÚJO ARTUR**

Orientadores: Carina Silvani  
Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE-PB  
DEZEMBRO/2018

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE  
LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR MONTMORILONITA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CAMPINA GRANDE-PB**

**13/DEZEMBRO/2018**

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

**THIAGO DE ARAÚJO ARTUR**

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: Geotécnica.

Sub-área: Pavimentação.

Orientadores: Prof. Dr<sup>a</sup> Carina Silvani  
PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

13/DEZEMBRO/2018

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**THIAGO DE ARAÚJO ARTUR**

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE LIGANTES  
ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR MONTMORILONITA NÃO  
ORGANOFILIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 13/12/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:

---

Prof. Dr<sup>a</sup> Carina Silvani  
Orientadora

Departamento de Engenharia Civil  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Universidade Federal de Campina Grande

---

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

Departamento de Engenharia Civil  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Universidade Federal de Campina Grande

---

Prof. Msc. Paulo Germano Tavares M. Filho  
Membro interno

Doutorando em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Campina Grande

---

Christian Rafael Ziegler  
Membro Interno

Departamento de Engenharia Civil  
Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental  
Universidade Federal de Campina Grande

---

Érika Vitória de Negreiros Duarte  
Examinador Externo

Mestre em Engenharia Civil e Ambiental  
Universidade Federal de Campina Grande

**DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho tão importante na  
minha vida a Deus.*

*Dedico também à minha avó, Nilcéa,  
minha mãe, Rosimary, meu pai, Neto e todos  
os meus amigos por todo incentivo,  
aprendizado e experiências vividas.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à DEUS, que me deu todo o incentivo, sabedoria e discernimento para todas as escolhas que eu fiz na vida e que me trouxeram até aqui.

À minha família, em especial a minha avó, Nilcéa, por todo cuidado, atenção e investimento concedido a mim ao longo de toda a minha vida, à minha mãe, Rosimary, por ter me criado da melhor maneira possível e me ensinado alguns dos valores que carrego comigo, ao meu pai, Neto, por toda a assistência prestada e conselhos passados, ao meu tio Paulo, que se fez sempre presente me ajudando em diversos momentos, às minhas tias Niomar e Nileide que me receberam tão bem em suas casas no curto período de tempo que passei com elas, além de tantos outros familiares que me apoiaram e me incentivaram a conquistar meus objetivos.

Aos melhores amigos que a UFCG poderia me dar, Alana, Dhrielly, Higor, Jéssica e Stella pelo fortalecimento da nossa amizade ao longo desse tempo, pelos inúmeros trabalhos e projetos feitos em grupo, saídas e discussões, tornando nossa vivência um aprendizado incrível de maneira que eu me tornasse uma pessoa mais íntegra, honesta e sincera.

Aos meus amigos Jean, Maria Alinne, Mariana e Túlio por sempre estarem comigo em todos os momentos, sejam eles bons ou ruins, me incentivando, apoiando, discordando e compartilhando experiências inesquecíveis.

À Christian (vulgo Alemão), Conrado, Daniel e Fabiano, além dos laboratoristas Ildinho e Jadilson, minha gratidão pela parceria e ajuda na realização dos ensaios ao longo desse tempo.

À todo o pessoal do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG, dentre alunos de graduação, mestrandos, doutorandos, professores e terceirizados pela simpatia, ajuda e colaboração na pesquisa.

À orientadora Prof<sup>a</sup>. PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, pelos mais variados conhecimentos adquiridos durante a graduação, pelo belíssimo trabalho de orientação me dando a devida atenção nos momentos em que precisei, sempre disposta a sanar dúvidas e tornar a pesquisa de mais fácil compreensão.

**EPÍGRAFE**

*“Feeling my way through the darkness  
Guided by a beating heart  
I can’t tell where the journey will end  
But I know where to start...”  
Avicii “in memoriam”*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Representação esquemática dos componentes dos asfaltos .....	5
<b>Figura 2:</b> Modelo de micelas de Yen.....	6
<b>Figura 3:</b> Representação esquemática do ligante asfáltico de comportamento Sol e Gel.....	7
<b>Figura 4:</b> Modelo de estrutura do asfalto proposto pelo SHRP.....	8
<b>Figura 5:</b> Esquema de refino do petróleo para obtenção do asfalto produzido em um estágio.....	9
<b>Figura 6:</b> Esquema de refino do petróleo para obtenção do asfalto produzido em dois estágios de destilação.....	10
<b>Figura 7:</b> Exemplos de ângulos de fase de dois tipos de asfalto.....	17
<b>Figura 8:</b> Esquema representativo do fenômeno de cargas cíclicas obtido no DSR.....	18
<b>Figura 9:</b> Estrutura de duas lamelas da montmorilonita.....	20
<b>Figura 10:</b> Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.....	23
<b>Figura 11:</b> Estufa RTFOT à esquerda e recipiente para o ligante à direita.....	27
<b>Figura 12:</b> Exemplo de equipamento utilizado no ensaio de penetração.....	24
<b>Figura 13:</b> Viscosímetro rotacional Brookfield.....	25
<b>Figura 14:</b> Equipamento para medida do ponto de amolecimento do ligante, conjunto anel e bola, termômetro e béquer.....	26
<b>Figura 15:</b> Ilustração do reômetro de cisalhamento dinâmico.....	28
<b>Figura 16:</b> Tensões e Deformações durante o ensaio de MSCR durante cada ciclo.....	29
<b>Figura 17:</b> Incremento de deformação no ensaio LAS.....	31
<b>Figura 18:</b> Perda de massa das amostras.....	33
<b>Figura 19:</b> Ensaio de penetração.....	33
<b>Figura 20:</b> Penetração retida de cada teor de ligante.....	35
<b>Figura 21:</b> Ensaio de amolecimento para os ligantes em estudo.....	36
<b>Figura 22:</b> Variação do ponto de amolecimento de cada ligante.....	36
<b>Figura 23:</b> Viscosidade antes do envelhecimento a curto prazo (RTFOT) de cada teor de ligante. ....	37

<b>Figura 24:</b> Viscosidade antes do envelhecimento a curto prazo (RTFOT) de cada teor de ligante de acordo com o aumento da temperatura. ....	38
<b>Figura 25:</b> Viscosidade após o envelhecimento a curto prazo (RTFOT) de cada teor de ligante. ....	39
<b>Figura 26:</b> Viscosidade após envelhecimento a curto prazo (RTFOT) de cada teor de ligante de acordo com o aumento da temperatura.....	40
<b>Figura 27:</b> Temperatura máxima de utilização de cada ligante. ....	42
<b>Figura 28:</b> Módulo complexo $G^*$ (KPa) em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos ligantes antes do envelhecimento. ....	43
<b>Figura 29:</b> Módulo complexo $G^*$ (KPa) em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos ligantes após envelhecimento. ....	44
<b>Figura 30:</b> Parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ (KPa) em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos ligantes antes do envelhecimento. ....	45
<b>Figura 31:</b> Parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ (KPa) em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos ligantes após envelhecimento. ....	45
<b>Figura 32:</b> Compliância não-recuperável, Jnr, sob carregamento de 100 e 3200 Pa dos ligantes asfálticos.....	46
<b>Figura 33:</b> Diferença entre as compliâncias não-recuperáveis a 100 Pa e 3200 Pa. ....	47
<b>Figura 34:</b> Porcentagem de recuperação R dos ligantes asfálticos. ....	48
<b>Figura 35:</b> Parâmetro “A” obtido no LAS.....	49
<b>Figura 36:</b> Parâmetro “B” obtido no LAS. ....	49
<b>Figura 37:</b> Relação entre os parâmetros “A” e “B” .....	50

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1:</b> Efeitos da adição de SBS nas propriedades físicas de um CAP.....	11
<b>Tabela 2:</b> Especificação vigente dos ligantes por penetração .....	13
<b>Tabela 3:</b> Parte da especificação SHRP dos Ligantes Asfálticos adequada às temperaturas no Brasil.....	15
<b>Tabela 4:</b> Normas relativas aos ensaios realizados na pesquisa.....	22
<b>Tabela 5:</b> Classificação quanto ao valor de Jnr pela AASHTO M320.....	30
<b>Tabela 6:</b> Índices de envelhecimento obtidos através do ensaio de viscosidade rotacional para temperatura de 135°C.....	40
<b>Tabela 7:</b> Índices de envelhecimento obtidos através do ensaio de viscosidade rotacional para temperatura de 150°C.....	41
<b>Tabela 8:</b> Índices de envelhecimento obtidos através do ensaio de viscosidade rotacional para temperatura de 177°C.....	41
<b>Tabela 9:</b> Ensaio de PG para o ligante CAP 50/70 puro antes do envelhecimento a curto prazo.....	42
<b>Tabela 10:</b> Estimativa de vida de fadiga dos ligantes.....	51

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$G^*$	Módulo complexo de cisalhamento
$\tau_{\text{máx}}$	Tensão de cisalhamento aplicada
$\gamma_{\text{máx}}$	Deformação devido à tensão de cisalhamento
$\omega$	Frequência angular
$\delta$	Ângulo de fase
$\Delta t$	Tempo de defasagem
%	Porcentagem
$G'$	Componente elástica recuperável
$G''$	Componente viscosa não recuperável
$\sigma_0^2$	Tensão aplicada durante o ciclo de carregamento
$W_c$	Trabalho dissipado por ciclo de carregamento
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ANP	Agência Nacional de Petróleo
APA	Aumento do Ponto de Amolecimento
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
IE	Índice de Envelhecimento
LAS	Linear Amplitude Sweep
MMT	Montmorilonita
MSCR	Multiple Stress Creep Recovery
NBR	Norma Brasileira
PAV	Vaso de Pressão de Envelhecimento
PE	Polietileno
PG	Grau de Desempenho
PR	Penetração Retida
RCRT	Repeated Creep and Recovery Test

REDUC	Refinaria Duque de Caxias
RTFOT	Estufa de Película Delgada Rotacional
RV	Viscosímetro Rotacional
SBR	Borracha Estireno Butadieno
SBS	Copolímero de Estireno e Butadieno
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements

## RESUMO

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligante asfáltico. A degradação do pavimento inicia-se assim que este entra em serviço e os veículos começam a circular pela superfície. Esta degradação é ainda afetada pela ação dos agentes atmosféricos (chuva, vento, radiação solar), que podem induzir deteriorações no pavimento. Tendo em vista a possibilidade de surgimento de várias patologias no pavimento, o estudo das suas propriedades físicas e reológicas tem cada vez mais intrigado os pesquisadores da área, principalmente quando estes ligantes são modificados por polímeros, como copolímero de estireno butadieno-estireno (SBS). Eles exibem maior resistência ao afundamento e à deformação térmica, reduz os danos por fadiga e ainda diminui a suscetibilidade térmica. Já a principal vantagem do uso da montmorilonita (MMT) na pavimentação está em construir pavimentos mais resistentes à deformação e à quebra por fadiga, aumentando sua rigidez e sua resistência ao envelhecimento. Esta pesquisa tem como principal objetivo estudar as propriedades reológicas do CAP 50/70 modificado por montmorilonita. Para isto, foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, como também ensaios utilizando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, como PG, MSCR e LAS, a fim de se obter uma análise mais representativa do comportamento reológico do CAP 50/70 modificado com montmorilonita antes e após o envelhecimento a curto prazo e compará-lo tanto com o CAP 50/70 quanto ao ligante modificado por SBS. Os resultados indicaram que os ligantes modificados por MMT são mais resistentes ao envelhecimento oxidativo, mais rígidos, possuem uma menor integridade inicial diante do acúmulo de danos e são menos resistentes à deformação quando comparado ao CAP 50/70 puro. Comparado ao asfalto modificado por polímero (AMP) 55/75 SBS, os ligantes incorporados com MMT são menos resistentes à deformação permanente, menos suscetíveis à variação de tensão, menos resistentes ao dano acumulado, menos sensíveis ao aumento da amplitude de deformações e ao envelhecimento oxidativo.

**Palavras-chave:** deformação; temperatura; rigidez; envelhecimento.

## ABSTRACT

Asphalt pavements are those where the coating is composed of a mixture consisting basically of aggregates and asphalt binder. The degradation of the pavement starts as soon as it goes into service and the vehicles begin to circulate on the surface. This degradation is still affected by the action of atmospheric agents (rain, wind, solar radiation), which can induce deterioration in the pavement. The study of its physical and rheological properties has increasingly intrigued researchers in the field, especially when these binders are modified by polymers such as styrene butadiene-styrene (SBS) copolymer. They exhibit greater resistance to sinking and thermal deformation, reduce fatigue damage, and further decrease thermal susceptibility. The main advantage of using montmorillonite (MMT) in paving is to build pavements that are more resistant to deformation and fatigue cracking, increasing its rigidity and resistance to aging. This research has as main objective to study the rheological properties of the CAP 50/70 modified by montmorillonite. For this purpose, penetration, softening point and rotational viscosity tests were performed, as well as tests using the Dynamic Shear Rheometer, such as PG, MSCR and LAS, in order to obtain a more representative analysis of the rheological behavior of the CAP 50 / 70 modified with montmorillonite before and after short-term aging and to compare it with both the CAP 50/70 and the SBS modified binder. The results indicated that MMT-modified binders are more resistant to oxidative aging, more rigid, have lower initial integrity in the presence of damage accumulation and are less resistant to deformation when compared to pure CAP 50/70. Compared to polymer modified asphalt (AMP) 55/75 SBS, the binders incorporated with MMT are less resistant to permanent deformation, less susceptible to voltage variation, less resistant to accumulated damage, less sensitive to increased strain amplitude and aging oxidative.

**Key words:** deformation; temperature; rigidity; aging.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1.	JUSTIFICATIVA .....	2
1.2.	OBJETIVOS .....	2
1.2.1.	Objetivo Geral.....	2
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	3
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO .....	3
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1.	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP).....	4
2.2.	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	4
2.3.	LIGANTES MODIFICADOS POR POLÍMEROS.....	10
2.4.	CARACTERIZAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS .....	11
2.4.1.	Especificações convencionais .....	12
2.4.2.	Especificação SUPERPAVE .....	14
2.5.	ARGILA MONTMORILONITA .....	18
2.6.	ESTUDOS SOBRE ASFALTO MODIFICADO POR MONTMORILONITA .....	20
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1.	MATERIAIS.....	22
3.2.	MÉTODOS .....	22
3.2.1.	Caracterização Física .....	23
3.2.1.1.	Estufa de filme fino rotativo (RTFOT).....	23
3.2.1.2.	Ensaio de penetração .....	24
3.2.1.3.	Ensaio de viscosidade rotacional .....	25
3.2.1.4.	Ensaio de ponto de amolecimento .....	26
3.2.2.	Caracterização Reológica.....	27
3.2.2.1.	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).....	27
3.2.2.2.	Grau de desempenho (PG).....	28
3.2.2.3.	Ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)...	28
3.2.2.4.	Varredura linear de amplitude de deformação (LAS).....	30
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>32</b>

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	32
4.1.1. Perda de Massa .....	32
4.1.2. Ensaio de Penetração .....	33
4.1.3. Ensaio do ponto de amolecimento .....	35
4.1.4. Ensaio de viscosidade .....	37
4.1.4.1. Antes do envelhecimento a curto prazo (RTFOT).....	37
4.1.4.2. Envelhecimento a curto prazo (RTFOT) .....	38
4.1.4.3. Índice de envelhecimento .....	40
4.2. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA .....	41
4.2.1. Grau de desempenho (PG).....	41
4.2.2. Ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) .....	46
4.2.3. Varredura linear de amplitude (LAS) .....	48
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS</b>	
<b>FUTURAS .....</b>	<b>52</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	52
5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	53
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Buscando compreender a atual política de transporte no Brasil, tornou-se necessário destacar que o transporte rodoviário foi e ainda é um ponto estratégico nos planos setoriais de governo. No período pós 1956, a rodovia assumiu a posição de matriz de transporte principal e recebeu grande parte dos recursos disponíveis para expansão da sua infraestrutura. Em 2008, houve uma leve retração da malha rodoviária não pavimentada. No entanto, a malha rodoviária pavimentada apresentou um leve crescimento (PEREIRA, 2011).

O transporte rodoviário no Brasil é a principal forma de escoamento da produção e de deslocamento de passageiros. Segundo dados do Geipot (Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes) no ano de 2001 cerca de 95% dos passageiros (1,3 bilhão de pessoas) e 60% da carga foram transportados por nossas rodovias. A malha rodoviária é a segunda maior do mundo, com mais de 1,6 milhão de quilômetros, embora menos de 10% esteja pavimentada.

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligante asfáltico. Este revestimento é a camada superior destinada a resistir diretamente as ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de conforto e segurança. As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas ao trincamento por fadiga dessa camada. Parte dos problemas relacionados à deformação permanente e outros defeitos pode ser atribuída ao revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A degradação do pavimento inicia-se assim que este entra em serviço e os veículos começam a circular pela superfície. Esta degradação é ainda afetada pela ação dos agentes atmosféricos (chuva, vento, radiação solar), que podem induzir deteriorações no pavimento (JIMÉNEZ, 2014).

Tendo em vista a possibilidade de surgimento de várias patologias no pavimento, o estudo das suas propriedades físicas e reológicas tem cada vez mais intrigado os pesquisadores da área, principalmente quando estes ligantes são modificados por polímeros, tais como copolímero de estireno butadieno-estireno (SBS), polietileno (PE), dentre outros (MOTHÉ, 2009). Segundo Yildirim (2007), um pavimento modificado por polímeros exhibe maior resistência ao afundamento de trilha de roda e à deformação térmica, reduz os danos por fadiga e ainda diminui a suscetibilidade térmica. Um dos

objetivos do estudo reológico é avaliar o comportamento dos materiais asfálticos e poder relacionar essas propriedades reológicas para minimizar os principais efeitos de tensão e deformação.

Do ponto de vista da melhoria da propriedade dos materiais, uma revolução vem acontecendo na ciência e na tecnologia dos materiais em escala nanométrica. Com o surgimento desta nova classe de materiais, pesquisas têm investigado a utilização dessas cargas nanométricas em diversas matrizes a fim de produzir nano compósitos e propiciar a melhoria das propriedades da matriz. Os nano compósitos são uma nova classe de materiais, nos quais ao menos uma das dimensões das partículas dispersas se encontra na escala nanométrica (RAY *et al.*, 2003).

As principais vantagens do uso de nanotecnologia em pavimentação consiste em construir pavimentos mais resistentes à deformação, à trincas por fadiga, à trincas por temperatura e à ação da água. Além disso, a modificação de asfalto com nano materiais e/ou em escala nanométrica normalmente não requer o uso de instrumentos sofisticados. Fazer uso de um moinho coloidal ou de um misturador mecânico para melhorar a dispersão é normalmente suficiente para realizar a modificação com nano materiais, sendo esse o equipamento que se emprega tradicionalmente para modificar asfalto com polímero (SANTOS, 2012).

## 1.1. JUSTIFICATIVA

O estudo do comportamento de ligantes asfálticos torna-se interessante devido à relação existente entre qualidade do pavimento e desempenho do ligante. A utilização de asfalto com agentes modificadores como os polímeros e as nano argilas pode resultar na redução de custos na manutenção do pavimento como também uma diminuição no consumo de energia.

Sendo assim, é importante caracterizar os ligantes asfálticos a fim de se obter uma maior compreensão de suas propriedades físicas e reológicas e a partir dos resultados obtidos, analisar qual ligante desempenhará uma melhor função de acordo com o tipo de pavimento e local onde ele será executado.

## 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.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

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

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

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 deste estudo.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados ao ligante asfáltico, sua composição química e processo de produção, além da caracterização dos ligantes asfálticos e análise de suas propriedades quando modificados por polímero SBS e argila montmorilonita.

Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.

Resultados e Discussões – São apresentados os resultados obtidos com a modificação do cimento asfáltico de petróleo por montmorilonita.

Considerações Finais e Sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações acerca dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuras sobre o assunto abordado.

Por fim, estão as Referências, onde são listadas as pesquisas utilizadas como fonte para produção desta pesquisa e os apêndices com todos os resultados obtidos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

O *Manual de asfalto* (IA, 1989 versão em português, 2001) lista mais de 100 das principais aplicações desse material, desde a agricultura até a indústria. O uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos também. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Balbo (2007) o ligante asfáltico possui boa aderência aos agregados, além de apresentar propriedades impermeabilizantes, tornando seu uso bastante comum nas diversas obras da engenharia civil. É um material que apresenta flexibilidade, relativa durabilidade e grande resistência à maior parte dos ácidos, sais e álcalis, além de ser insolúvel em água.

O ligante utilizado em pavimentação tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoelástico e pouco reativo. A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível a velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço. O comportamento termoviscoelástico é mais comumente assumido do que o termoviscoelástico, com suficiente aproximação do real comportamento do material. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Esse material apresenta uma grande variedade de tipos, dependendo da composição do petróleo, que pode variar de acordo com a fonte. O cimento asfáltico pode ser produzido de diversas maneiras, em função do tipo de petróleo já que sua composição varia bastante, especialmente no que diz respeito aos teores de frações destiláveis e resíduo de vácuo (LUCENA, 2005).

### 2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Segundo Leite (1999) os ligantes apresentam em sua constituição de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) e 90 a 95% de hidrocarbonetos. Os ligantes asfálticos brasileiros têm teor

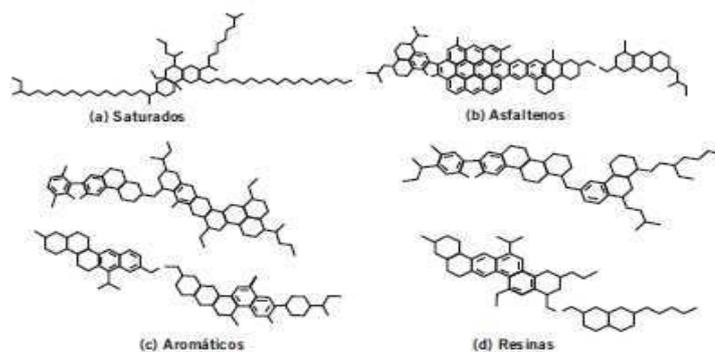
baixo de metais e enxofre, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos tem alto teor de enxofre.

A composição química é bastante complexa sendo que o número de átomos de carbono por molécula varia de 20 a 120. A composição química tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas sua maior influência será nos processos de incorporação de agentes modificadores tais como os polímeros (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Shell (2003) uma análise elementar dos ligantes manufacturados pode apresentar as seguintes proporções de componentes: carbono de 82 a 88%; hidrogênio de 8 a 11%; enxofre de 0 a 6%; oxigênio de 0 a 1,5% e nitrogênio de 0 a 1%. Sua composição pode variar de acordo com a fonte do petróleo, com as modificações induzidas nos processos de refino e durante o envelhecimento na usinagem e em serviço.

A composição química também varia com o tipo de fracionamento a que se submete o ligante asfáltico, sendo o método mais moderno atualmente empregado, normalizado pela ASTM D 4124-01, aquele que separa as seguintes frações: saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos. Os asfaltenos são separados primeiro por precipitação com adição de n-heptano, e os outros constituintes, englobados na designação genérica de maltenos, são solúveis no n-heptano e separados por cromatografia de adsorção. Na Europa utiliza-se método similar conhecido como SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos), sendo a separação dos constituintes realizada por cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama (LEITE, 1999; SHELL, 2003). A Figura 1 mostra a representação esquemática desses componentes do ligante (SHELL, 2003).

**Figura 1:** Representação esquemática dos componentes dos asfaltos.



FONTE: Shell (2003)

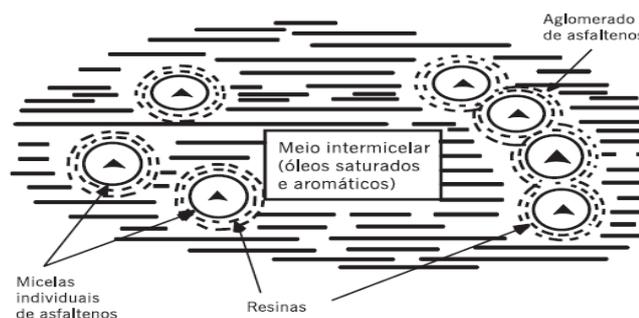
Segundo Shell (2003) os asfaltenos são compostos polares e polarizáveis aglomerados formados por associações intermoleculares, constituídos de hidrogênios e carbonos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas, sendo sólidos amorfos pretos ou marrons. A quantidade de asfaltenos, portanto, tem efeito considerável nas características reológicas do ligante: quanto maior o seu percentual, mais duro e mais viscoso será o ligante asfáltico, embora se deva considerar ainda a sua forma, sendo maior o efeito sobre a reologia quanto mais esférica for a partícula. Em geral os asfaltenos constituem de 5 a 25% do ligante.

As resinas são solúveis em n-heptano. São compostos de hidrogênio e carbono, com pequena proporção de oxigênio, enxofre e nitrogênio. São sólidos ou semi-sólidos marrom-escuros, sendo de natureza polar e fortemente adesiva. As proporções de resinas e asfaltenos governam o comportamento como solução (Sol) ou como gelatina (Gel) do CAP (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Balbo (2007) a proporção de asfaltenos e maltenos nos ligantes pode variar em função da exposição deles ao gás oxigênio e à luminosidade, de ambientes com temperaturas elevadas, além do tipo de agregado pétreo ao qual se associam. Todas essas variações causarão alterações, portanto, nas propriedades físicas, ocasionando seu envelhecimento.

Segundo Girdler (1965) o ligante é tradicionalmente considerado uma dispersão coloidal de asfaltenos em saturados e aromáticos, conhecidos genericamente por maltenos, imersos em resinas, que são como micelas diretas ou reversas, ou seja, grupos polares orientados para fora ou para o centro. O modelo de Yen ou modelo de micelas (YEN, 1991) está representado na Figura 2. Uma micela é um aglomerado de moléculas em uma solução coloidal. Um coloide é uma mistura que consiste de grandes moléculas simples, dispersas em uma segunda substância (LEITE, 1999; HUNTER, 2004).

**Figura 2:** Modelo de micelas de Yen.

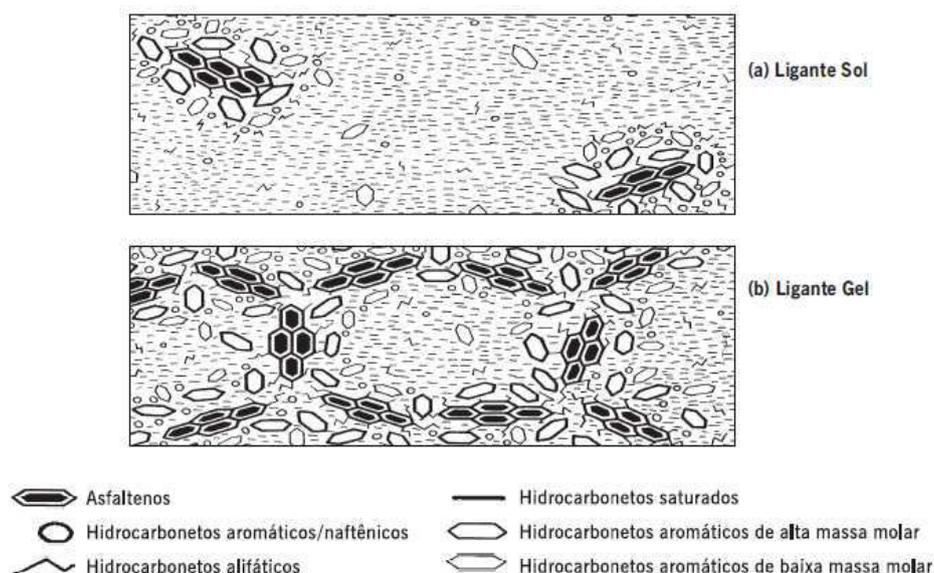


**FONTE:** Yen (1991)

Em presença de quantidade suficiente de resinas e aromáticos, os asfaltenos formam micelas com boa mobilidade e resultam em ligantes conhecidos como Sol. Porém, se as frações não estão bem balanceadas, há formação de estruturas de pacotes de micelas com vazios internos que resultam em ligantes de comportamento conhecido como Gel, sendo um exemplo desse tipo os ligantes oxidados utilizados em impermeabilizações. Esse comportamento Gel pode ser minimizado com o aumento de temperatura (LEITE, 1999; SHELL, 2003). A Figura 3 ilustra a representação esquemática dos comportamentos Sol e Gel.

Os ligantes do tipo Sol apresentam maior suscetibilidade térmica por terem óleos intermicelares muito aromáticos, o que os torna mais moles, menos resistentes a aplicação direta das cargas, porém mais suscetíveis a um pleno retorno a posição original após a aplicação da carga. Já os ligantes do tipo Gel são mais resistentes a aplicação das cargas e menos suscetíveis ao retorno, consequentemente são mais propensos ao trincamento prematuro. Entretanto, essas e todas as demais propriedades variam muito com a temperatura, por isso a característica de suscetibilidade térmica de cada ligante é de extrema importância para o comportamento futuro do pavimento (RAMOS, 1995 apud BERNUCCI *et al.*, 2010).

**Figura 3:** Representação esquemática do ligante asfáltico de comportamento Sol e Gel.



**FONTE:** Shell (2003)

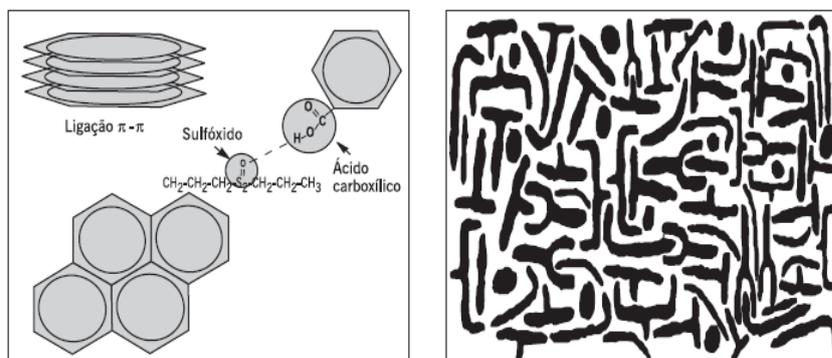
A proporção de cada fração desses quatro componentes dos ligantes varia de acordo com o óleo de origem e com o processo de produção, e depois de aplicado nas obras há variação ao longo do tempo, sendo que em geral o conteúdo de asfaltenos proporcionalmente aumenta, o de resinas mais ou menos se mantém e o de aromáticos decresce, mantendo-se pouco variável o teor de saturados (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Shell (2003) diz que por mais que a composição química possa ser relacionada com as propriedades físicas dos vários componentes dos ligantes, observa-se que estes podem apresentar propriedades físicas idênticas mesmo que eles apresentem composições químicas diferentes, desde que sejam derivados de óleos distintos. Portanto, é impossível definir componentes individuais mínimos em termos químicos como garantia de comportamento adequado de um ligante do ponto de vista de desempenho na pavimentação.

Muitos pesquisadores têm tentado mostrar a existência de micelas de asfaltenos usando técnicas de cromatografia por exclusão de tamanho, microscópio eletrônico e ressonância nuclear magnética, e em muitos casos o modelo de representação da estrutura do ligante como micela não se mostra coerente com os resultados obtidos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Novas proposições de modelo estrutural do ligante têm surgido, tal como o proposto pelo SHRP (Strategic Highway Research Program) ilustrado na Figura 4. Foram evidenciados, por meio de técnicas de análise de espectroscopia infravermelha e cromatografia de troca de íons (IEC), numerosos tipos possíveis de interação entre moléculas dos ligantes, incluindo pontes de hidrogênio, ligações  $\pi$ - $\pi$ , forças de Van der Waals e atrações polares (BERNUCCI *et al.*, 2010).

**Figura 4:** Modelo de estrutura do asfalto proposto pelo SHRP.



**FONTE:** Leite (2003)

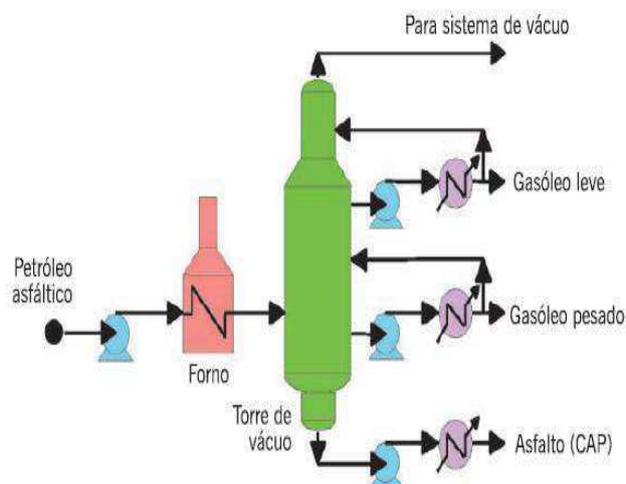
Bernucci *et al.* (2010) dizem que o programa SHRP identificou a presença de substâncias anfóteras nos ligantes, ou seja, que contém grupamentos ácidos e básicos juntos, que vão controlar a viscosidade do ligante. O modelo estrutural do programa SHRP não considera válido o conceito de asfaltenos e classifica os compostos constituintes em polares e não polares.

Diferentes processos para obtenção dos ligantes são empregados, em função dos seus teores encontrados nos crus. Se o teor é elevado, o ligante é extraído por simples destilação a vácuo (um estágio); quando o teor é médio, a destilação ocorre sob pressão atmosférica e a vácuo (dois estágios); nos crus leves com baixo teor de ligante presente, além da destilação atmosférica e à vácuo, é necessária a desasfaltação a propano (três estágios). Nos casos de crus com médio a baixo teor de ligantes, o produto resultante apresenta elevada viscosidade (BALBO, 2007).

As Figuras 5 e 6, elaboradas originalmente por Tonial e Bastos (1995) da Petrobrás, mostram os possíveis processos utilizados para a produção de ligantes, por dois dos métodos citados acima.

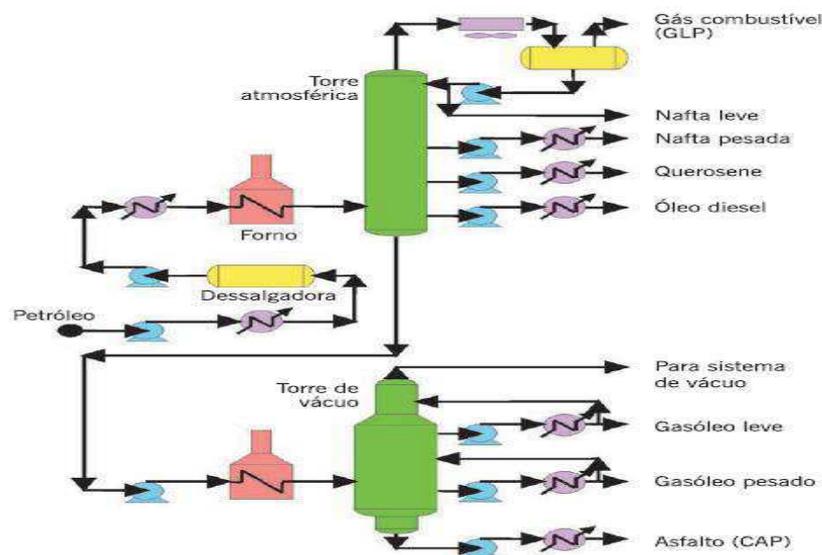
As refinarias têm colunas ou torres de destilação que são divididas em intervalos por faixa de temperatura de obtenção dos vários cortes do petróleo antes de se obter o ligante. Daí, muitas vezes ser denominado “resíduo” do petróleo, embora não seja considerado um material sem características adequadas ao uso (BERNUCCI *et al.*, 2010).

**Figura 5:** Esquema de refino do petróleo para obtenção do asfalto produzido em um estágio.



**FONTE:** Tonial e Bastos (1995)

**Figura 6:** Esquema de refino do petróleo para obtenção do asfalto produzido em dois estágios de destilação.



FONTE: Tonial e Bastos (1995)

### 2.3. LIGANTES MODIFICADOS POR POLÍMEROS

Com o aumento do volume de tráfego, os ligantes necessitam de um melhor desempenho e uma melhor resistência para evitar o aparecimento de patologias nos pavimentos, como por exemplo, trincamento por fadiga, fissuras, exsudação, dentre outros. Dessa forma, esses materiais vêm passando por uma mudança nas suas características físicas e/ou químicas, através da adição de um modificador, seja ele extensor (enxofre, lignina), oxidante (compostos de manganês), antioxidante (sais de cálcio, carbonatos, fenóis, cálcio) ou polimérico (elastômeros, plastômeros e fibras). (AZEVEDO,2017; BRINGEL, 2007)

Para que a modificação do ligante seja viável técnica e economicamente, é necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização, misture-se adequadamente com o ligante, melhore suas características de fluidez a altas temperaturas, sem que fique muito viscoso para a mistura e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço a baixas temperaturas (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Com isso, em busca de novas alternativas, vários pesquisadores têm estudado a incorporação de polímeros ao ligante, e vem observando que a mistura dá a ele, uma qualidade superior, melhorando seu comportamento elástico e contribuindo para uma maior resistência à deformação permanente e as trincas por fadiga, além de contribuir

para uma melhor adesão entre agregado e ligante e melhorar sua resistência ao envelhecimento. Entre os principais polímeros empregados estão o SBR (borracha estireno butadieno), SBS (copolímero de estireno e butadieno), além da borracha de pneu moído (SILVA, 2017).

O copolímero SBS é o material mais empregado, pois faz com que um ligante, em temperaturas muito baixas, resulte menos rígido, aumentando assim sua ductilidade, evitando sua ruptura frágil quando empregado em climas temperados. Já nos climas quentes, quando ocorrem aumentos de temperatura nas misturas asfálticas, ultrapassando o ponto de amolecimento de um ligante, o SBS mantém-se sólido, conseguindo, assim, reter o aumento de fluxo viscoso no ligante (BALBO, 2007).

Na Tabela 1 são apresentadas as características de um CAP-20 original e outros modificados com diferentes proporções introduzidas de SBS. Observa-se que a introdução desse copolímero no ligante proporciona um aumento da recuperação elástica, da consistência, viscosidade e também do seu ponto de amolecimento.

**Tabela 1:** Efeitos da adição de SBS nas propriedades físicas de um CAP.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>CAP-20</b>	<b>CAP-20 + 4% SBS</b>	<b>CAP-20 + 6% SBS</b>
<b>Recuperação elástica (%)</b>	11	80	90
<b>Penetração a 25°C (0,1 mm)</b>	59	74	75
<b>Ponto de fulgor (°C)</b>	358	320	310
<b>Viscosidade Saybolt-Furol a 165°C</b>	47	100	168
<b>Viscosidade absoluta a 60°C (Poise)</b>	2.211	5.784	54.563
<b>Ponto de amolecimento (°C)</b>	51	60	73

FONTE: DNER (1998)

#### 2.4. CARACTERIZAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ensaios clássicos de caracterização e especificação de ligantes asfálticos puros consistem na determinação da penetração à 25°C, norma brasileira DNIT-ME 155/2010, determinação da temperatura de amolecimento anel e bola, norma brasileira DNIT-ME

131/2010 e na determinação da viscosidade rotacional, norma brasileira NBR-15184/2007 (SILVA, 2005).

Para a caracterização de ligantes asfálticos há a existência de dois tipos de especificações quanto às suas propriedades reológicas, as quais veremos a seguir.

#### 2.4.1. Especificações convencionais

Para se especificar um determinado ligante como adequado para pavimentação, a maioria dos países utiliza medidas simples de características físicas, pela facilidade de execução nos laboratórios de obras. As duas principais características utilizadas são: a “dureza”, medida através da penetração de uma agulha padrão na amostra de ligante, e a resistência ao fluxo, medida através de ensaios de viscosidade. Foram acrescentados outros critérios nas especificações ao longo dos anos que tentam avaliar indiretamente como o ligante vai se comportar nas obras de pavimentação (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Na Tabela 2, são indicadas as características dos ligantes fabricados no Brasil, considerada sua classificação por penetração (em vigor) (BALBO, 2007).

**Tabela 2:** Especificação vigente dos ligantes por penetração.

CARACTERÍSTICAS	UN.	TIPOS DE CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO				MÉTODO ABNT
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576
Ponto de amolecimento mínimo	°C	52	46	43	37	NBR 6560
Ductilidade a 25°C mínima	mm	600	600	1.000	1.000	NBR 6293
<b>Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C:</b>						
Penetração retida mínima	%	60	55	55	50	NBR 6293
Varição em massa máxima	%	0,5	0,5	0,5	0,5	
Ductilidade a 25°C mínima	mm	100	200	500	500	
Aumento máximo do ponto de amolecimento	°C	8	8	8	8	
Índice de suscetibilidade térmica	-	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7	-
Ponto de fulgor mínimo	°C	235	235	235	235	NBR 11341
Solubilidade mínima em tricloroetileno	%	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855
<b>Viscosidade Saybolt-Furol mínima a:</b>						
135°C	s	192	141	110	80	NBR 14950
150°C		90	50	43	36	
177°C		40	30	15	15	
<b>Viscosidade Brookfield mínima a:</b>						
135°C, SP 21, 20 rpm	cP	374	274	214	155	NBR 15184
150°C, SP 21		203	112	97	81	
177°C, SP 21		76	57	28	28	

FONTE: ANP (2005)

#### 2.4.2. Especificação SUPERPAVE

O Strategic Highway Research Program (SHRP) foi estabelecido em 1987, para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas. Essas novas especificações passaram a ser conhecidas como SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*) e apresentam mudanças significativas nos procedimentos de ensaio de ligantes e misturas asfálticas, visto que privilegia a avaliação das propriedades reológicas por ensaios mais representativos do que os convencionais, baseados em critérios relacionados ao desempenho em serviço, ou seja, no clima e tráfego de onde se deseja aplicar o material (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Lucena (2005) as especificações americanas de ligantes asfálticos, assim como as brasileiras, eram baseadas nos ensaios de penetração a 25°C e de viscosidade a 60°C. Com a metodologia SUPERPAVE, estes ensaios passam a ser utilizados para controlar ou eliminar três tipos de falhas em pavimentos: deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico.

As especificações são válidas tanto para ligante puro quanto para modificado e estão mostradas na Tabela 3.

**Tabela 3:** Parte da especificação SHRP dos Ligantes Asfálticos adequada às temperaturas no Brasil.

<b>Grau de desempenho</b>	<b>PG 64</b>	<b>PG 70</b>	<b>PG 76</b>	<b>PG 82</b>
<b>Temperatura, °C</b>	-10 -16 -22	10 -16 -22	10 -16 -22	10 -16 -22
<b>Ligante original:</b>				
<b>Viscosidade Brookfield (&lt; 3000 cP), °C</b>	135			
<b>Ponto de fulgor, °C</b>	230			
<b>Cisalhamento dinâmico: 10 ras/s, G*/senδ (&gt; 1,0 kPa), °C</b>	64	70	76	82
<b>Após o RTFOT:</b>				
<b>Variação em massa, %</b>	< 1	< 1	< 1	< 1
<b>Cisalhamento dinâmico: 10 ras/s, G*/senδ (&gt; 2,2 kPa), °C</b>	64	70	76	82
<b>Após o RTFOT/PAV:</b>				
<b>Cisalhamento dinâmico: 10 ras/s, G*/senδ (&lt; 5,0 MPa), °C</b>	31 28 25	34 31 28	37 34 31	40 37 34
<b>Fluência (BBR) @ 60 s, °C</b>				
<b>Coef. Angular, m (&gt; 0,3)</b>	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12
<b>Módulo rigidez, S (&lt; 300 MPa)</b>				
<b>Alongamento na ruptura, °C</b>				
<b>&gt;1,0 % @ 1,0mm/min.</b>	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12

FONTE: ASTM D6373 (1999)

São utilizados para este fim os seguintes equipamentos, descritos sucintamente na sequência (BERNUCCI *et al.*, 2010):

- Reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR (ASTM D 7175/2004);
- Viscosímetro rotacional – RV (ASTM D 4402/2002);
- Reômetro de fluência em viga – BBR (ASTM D 6648/2001);
- Prensa de tração direta – DDT (ASTM D 6723/2002);
- Estufa de película delgada rotacional – RTFOT (ASTM 2872/1997);
- Vaso de pressão de envelhecimento – PAV (ASTM 6521/2000).

Segundo Bernucci *et al.* (2010) e Lucena (2005) o reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer* – DSR) é usado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante. Por meio desse ensaio, mede-se o módulo complexo de cisalhamento  $G^*$  e o ângulo de fase  $\delta$ , submetendo uma pequena quantidade de ligante a tensões de cisalhamento oscilatórias, entre duas placas paralelas. O ângulo  $\delta$  avalia a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o processo de cisalhamento. Um alto módulo complexo de cisalhamento  $G^*$  representará maior rigidez, enquanto que um menor ângulo de fase  $\delta$  representará uma maior resposta elástica, portanto, recuperável. O módulo complexo e o ângulo de fase podem ser definidos segundo as Equações 1 e 2, abaixo:

$$G^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\delta = \omega \cdot \Delta t \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$G^*$  = módulo complexo de cisalhamento, Pa;

$\tau_{m\acute{a}x}$  = máxima tensão de cisalhamento aplicada, Pa;

$\gamma_{m\acute{a}x}$  = máxima deformação;

$\delta$  = ângulo de fase;

$\omega$  = frequência angular, 1/s;

$\Delta$  = tempo de defasagem, s.

Segundo Lucena (2005)  $G^*$  é formado por duas componentes:  $G'$  (recuperável) e  $G''$  (não recuperável).  $G'$  e  $G''$  podem ser calculados segundo as equações 3 e 4 abaixo, respectivamente.

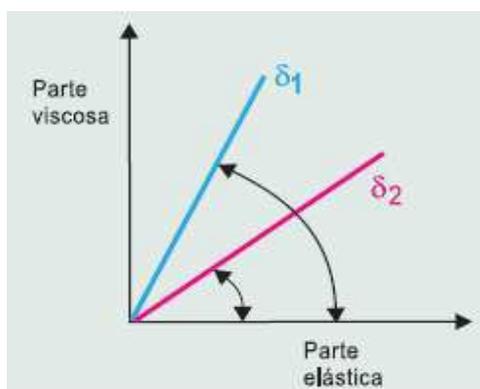
$$G' = |G^*| \cos\delta \quad (\text{Equação 3})$$

$$G'' = |G^*| \sin\delta \quad (\text{Equação 4})$$

Para materiais completamente elásticos, não existe atraso entre a tensão cisalhante aplicada e a deformação cisalhante obtida, sendo  $\delta$  igual a  $0^\circ$ . Para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente defasada e  $\delta$  vale  $90^\circ$ . Materiais viscoelásticos, tais como os ligantes asfálticos, possuem ângulo de fase variando entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , dependendo da natureza do ligante e da temperatura de ensaio. (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A Figura 7 representa um exemplo de ângulo de fase para ligantes distintos à uma mesma temperatura como também para um mesmo ligante a duas diferentes temperaturas.

**Figura 7:** Exemplos de ângulos de fase de dois tipos de asfalto.



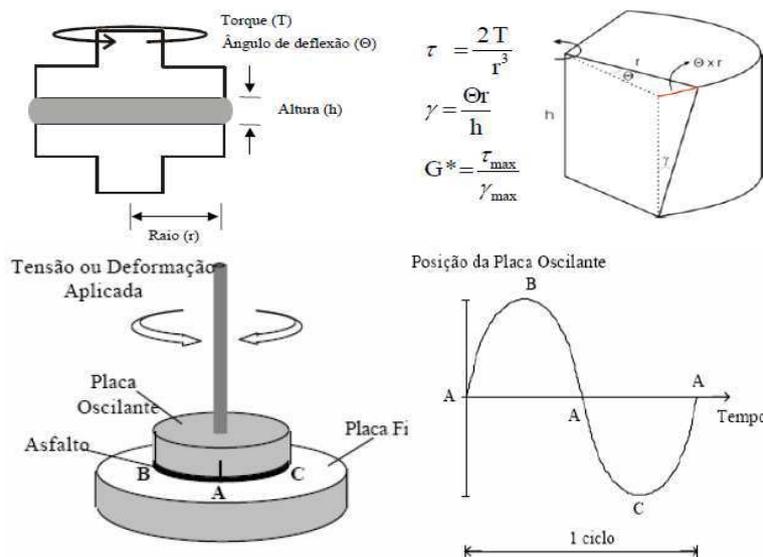
FONTE: Bernucci *et al* (2010)

Na determinação do parâmetro para controle de deformação permanente, os pesquisadores do projeto SHRP (1994) consideram o fenômeno de cargas cíclicas (Figura 8). A cada ciclo de carga está sendo realizado um trabalho para deformar a superfície asfáltica. Parte deste trabalho é recuperado e parte dissipado na forma de deformação permanente e calor. A fim de minimizar as deformações permanentes, a quantidade de trabalho dissipado durante cada ciclo deve ser reduzida. Matematicamente, o trabalho dissipado por ciclo de carregamento (à tensão constante) ( $W_c$ ) é dado pela Equação 5 (LUCENA, 2005).

$$W_c = \pi \sigma_0^2 [1/(G^*/\text{sen}\delta)] \quad (\text{Equação 5})$$

Em que  $\sigma_0^2$  é a tensão aplicada durante o ciclo de carregamento. Portanto, o trabalho dissipado é inversamente proporcional à  $G^*/\text{sen}\delta$ . Esse parâmetro foi selecionado como um dos requisitos da especificação SUPERPAVE para ligantes asfálticos ligada a resistência à deformação permanente.

**Figura 8:** Esquema representativo do fenômeno de cargas cíclicas obtido no DSR.



FONTE: Bernucci (2008)

A especificação de ligante SHRP usa o parâmetro  $G^*/\sin \delta$  para temperaturas altas ( $>46^\circ\text{C}$ ) e  $G^*\sin \delta$  para temperaturas intermediárias (entre  $7^\circ\text{C}$  e  $34^\circ\text{C}$ ) como forma de controlar a rigidez do ligante (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Controlando a rigidez a altas temperaturas, a especificação de ligante assegura que o material forneça resistência ao cisalhamento global da mistura em termos de deformação a altas temperaturas. Da mesma forma, a especificação assegura que o ligante não contribua para o trincamento por fadiga, controlando sua rigidez a temperaturas intermediárias (BERNUCCI *et al.*, 2010).

O PG dos ligantes é representado, por exemplo, por PG 64-22. O primeiro número 64 significa que o ligante possui propriedades físicas adequadas até  $64^\circ\text{C}$ , temperatura mais elevada esperada no pavimento, correspondente ao clima da região. Da mesma forma, o segundo número (-22) significa que o ligante possui propriedades físicas adequadas no pavimento até temperatura mínima de  $-22^\circ\text{C}$ . Além disso, devem ser feitas considerações adicionais em termos de volume de tráfego e tempo de aplicação de carga para se especificar adequadamente o ligante em cada caso (LUCENA, 2005).

## 2.5. ARGILA MONTMORILONITA

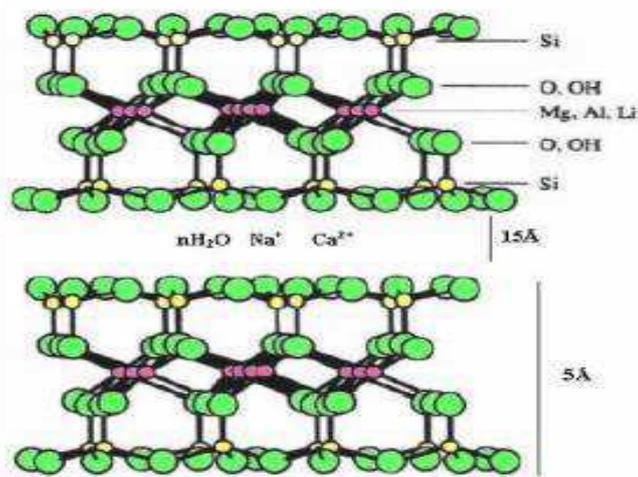
O termo bentonita foi derivado da localização do primeiro depósito comercial de uma argila plástica nos Estados Unidos. Essa argila apresenta a propriedade de

aumentar várias vezes o seu volume inicial na presença de umidade. Em 1897, Knight reportou que desde 1888 William Taylor comercializava uma argila peculiar encontrada em Fort Benton, Wyoming, EUA e propôs a denominação de taylorite, sugerindo em seguida "bentonita", uma vez que a primeira denominação já era utilizada (DARLEY e GRAY, 1988).

Montmorilonita (também anteriormente denominada de esmectita) é o argilomineral mais abundante do grupo das esmectitas, cuja fórmula química geral é dada por:  $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20} - (OH)_4$ . Possui partículas de tamanhos que podem variar de 2  $\mu\text{m}$  a tamanhos bastante pequenos como 0,1  $\mu\text{m}$  em diâmetro, com tamanho médio de 0,5  $\mu\text{m}$  e formato de placas ou lâminas. Pertence ao grupo dos filos silicatos 2:1, cujas placas são caracterizadas por estruturas constituídas por duas folhas tetraédricas de sílica com uma folha central octaédrica de alumina, que são unidas entre si por átomos de oxigênio que são comuns a ambas as folhas. As folhas apresentam continuidade nas direções dos eixos a e b e geralmente possuem orientação aproximadamente paralela nos planos (001) dos cristais, o que confere a estrutura laminada (PAIVA *et al.*, 2007).

As placas da montmorilonita apresentam perfil irregular, são muito finas, tem tendência a se agregarem no processo de secagem, e apresentam boa capacidade de delaminação quando colocada em contato com a água. O empilhamento dessas placas é regido por forças polares relativamente fracas e por forças de van der Waals, e entre essas placas existem lacunas denominadas de galerias ou camadas intermediárias ou interlamelares nas quais residem cátions trocáveis como  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Li^+$ , fixos eletrostaticamente e com a função de compensar cargas negativas geradas por substituições isomórficas que ocorrem no reticulado, como por exemplo,  $Al^{3+}$  por  $Mg^{2+}$  ou  $Fe^{2+}$ , ou  $Mg^{2+}$  por  $Li^+$  (Figura 9). Cerca de 80% dos cátions trocáveis na montmorilonita estão presentes nas galerias e 20% se encontram nas superfícies laterais (PAIVA *et al.*, 2007).

**Figura 9:** Estrutura de duas lamelas da montmorilonita.



FONTE: Arshak *et al.* (2004)

## 2.6. ESTUDOS SOBRE ASFALTO MODIFICADO POR MONTMORILONITA

Muitas pesquisas têm sido promovidas a partir da nanotecnologia, com a finalidade de desenvolver materiais poliméricos com maior grau de desempenho, sendo uma área de grande importância a de nano compósitos poliméricos, cuja matriz é um polímero e a fase dispersa apresenta-se em dimensões em escala nanométrica, fornecendo ao polímero melhores propriedades com a incorporação de baixos teores de nano cargas (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

A argila é um material abundante e de menor custo e é por esse motivo que a utilização como nano compósitos é de grande interesse. No entanto, é preciso que a argila seja organicamente modificada por um agente tensoativo, com a finalidade de promover compatibilidade com o polímero (MÉLO *et al.*, 2014).

Segundo estudos de Jahromi e Khodaii (2009) foram demonstradas mudanças benéficas nas propriedades reológicas do ligante asfáltico quando nano argilas são lhe adicionadas, como, por exemplo, aumento na rigidez e na resistência ao envelhecimento. Em se tratando de ligantes modificados por polímeros, a adição de argilas, além de possibilitar a armazenagem dos ligantes por longos períodos, como já referido, demonstrou melhorar sua rigidez e sua elasticidade (TOMÉ, 2014).

A argila MMT possui alta resistência a solventes, além da estabilidade térmica necessária aos processos de polimerização e de extrusão, fatores que levaram à sua

popularização como carga para nanocompósitos com eficácia comprovada (MIGNONI, 2008; OSMAN, 2006).

Segundo estudos de Yu *et al.* (2007) ligantes modificados com diferentes teores de montmorilonita (MMT) também apresentaram um aumento na rigidez e nas propriedades viscoelásticas.

Um estudo comparativo, utilizando o ligante puro e o modificado por 27 argilas MMT dispersas em escala manométrica, mostrou que ocorre um aumento da resistência ao envelhecimento e melhorias nas propriedades reológicas do ligante, mesmo quando pequenas quantidades de MMT foram aplicadas (JAHROMI e KHODAII, 2009).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAIS

Para realização desta pesquisa foram utilizados o ligante asfáltico convencional, 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; utilizou-se o Asfalto Modificado por Polímero (AMP) 55/75, modificado com polímero elastomérico SBS (estireno-butadieno-estireno), produzido pela empresa Stratura Asfaltos S/A, localizada no município de Maracanaú-CE e a montmorilonita fornecida pela Bentonit União Nordeste.

#### 3.2. MÉTODOS

Nesta pesquisa foram realizados os ensaios convencionais, tais como: penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional Brookfield, ensaios utilizando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, como o PG, o MSCR e o LAS, a fim de se obter uma análise mais representativa do comportamento reológico do ligante modificado com montmorilonita, como também o procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFOT).

Na Tabela 4, a seguir, estão dispostas as normas utilizadas nos ensaios para caracterização física e reológica dos ligantes asfálticos.

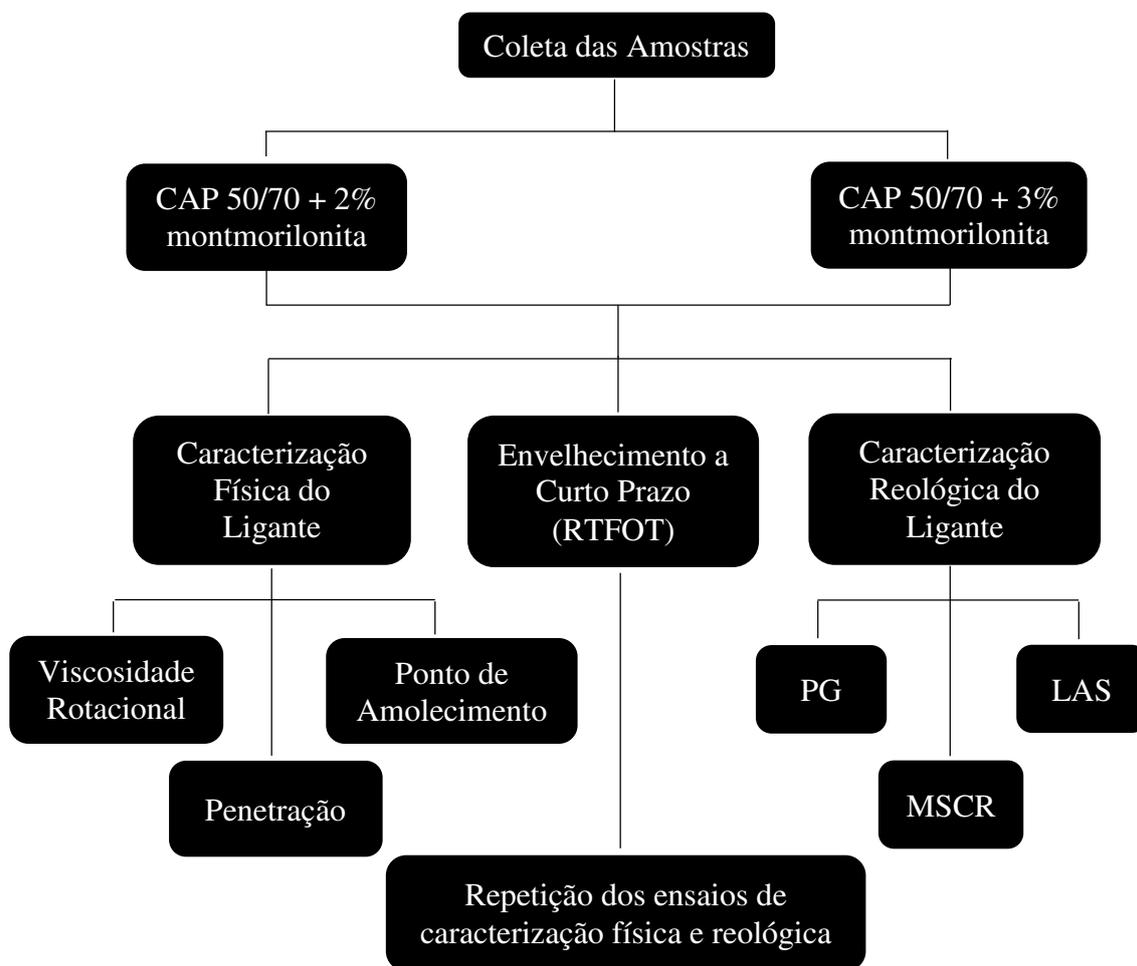
**Tabela 4:** Normas relativas aos ensaios realizados na pesquisa.

<b>Ensaio</b>	<b>Normas</b>
<b>Penetração</b>	DNIT-ME 155/2010
<b>Viscosidade Rotacional Brookfield</b>	ABNT NBR 15184/07
<b>Ponto de Amolecimento</b>	DNIT-ME 131/2010
<b>PG</b>	ASTM D6373 - 15
<b>MSCR</b>	ASTM D7405-15
<b>LAS</b>	AASHTO TP101-14

FONTE: O Autor (2018)

A metodologia utilizada para desenvolvimento desta pesquisa encontra-se no fluxograma representado na Figura 10 e segue as normas da ASTM, da AASHTO e NBR conforme ensaios descritos a seguir.

**Figura 10:** Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.



FONTE: O Autor (2018)

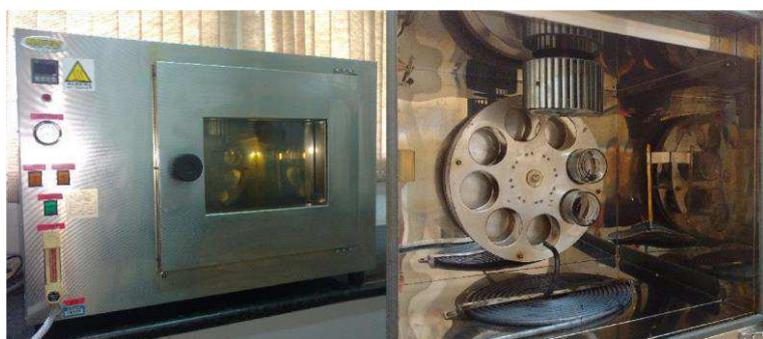
### 3.2.1. Caracterização Física

#### 3.2.1.1. Estufa de filme fino rotativo (RTFOT)

O procedimento visa representar o processo de envelhecimento sofrido pelo ligante durante seu ciclo de vida (estocagem, usinagem, aplicação e utilização), onde este sofrerá influência da sua exposição a temperatura e oxigênio. O procedimento Rolling Thin Film Oven – RTFOT é normatizado pela American Society for Testing and Materials (ASTM) – D2872.

O procedimento foi feito colocando uma amostra do ligante de 35g em um recipiente que gira dentro de uma estufa na temperatura de 163°C, sendo assim, representando a influência da temperatura na amostra, e ainda, uma abertura no recipiente permite a entrada de ar para considerar a influência do oxigênio na amostra. Este procedimento teve duração de 85 minutos e as amostras foram verificadas quanto a sua perda de massa e posterior caracterização quanto ao ponto de amolecimento, penetração e viscosidade. A Figura 11 mostra uma estufa RTFOT empregada no ensaio de envelhecimento.

**Figura 11:** Estufa RTFOT à esquerda e recipiente para o ligante à direita.



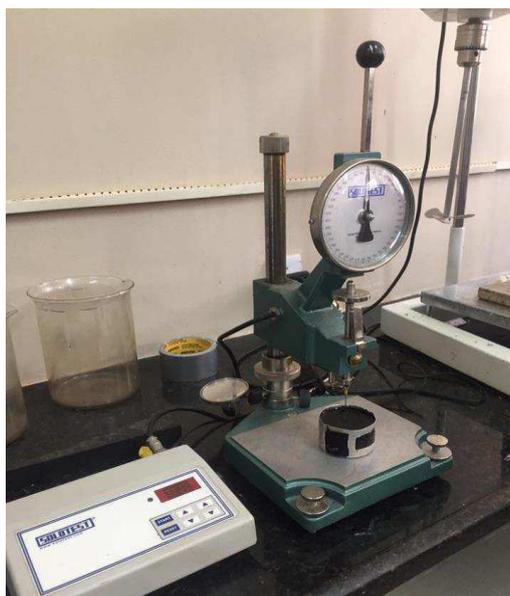
**FONTE:** O Autor (2018)

### 3.2.1.2. Ensaio de penetração

O procedimento para o ensaio de penetração foi realizado conforme a norma DNIT-ME 155/2010, onde o órgão utiliza o parâmetro obtido no ensaio para classificar o cimento asfáltico na pavimentação. A norma reguladora define que a penetração é o quanto uma agulha padrão penetra verticalmente, em décimos de milímetro, uma amostra do ligante, a partir de uma condição de carga, temperatura e tempo pré-estabelecidos.

O ensaio foi realizado determinando quanto que a agulha com massa de 100g penetrou verticalmente na amostra em um tempo de 5 segundos e temperatura ambiente de 25°C. Em cada ensaio, para a amostra de referência e com adição dos teores de 2% e 3% de montmorilonita, realizou-se no mínimo cinco medidas, ou seja, duas a mais do mínimo previsto em norma e adotou-se a média entre as mesmas. A Figura 12 mostra o penetrômetro utilizado no ensaio.

**Figura 12:** Equipamento utilizado no ensaio de penetração.



**FONTE:** O Autor (2018)

Além do ensaio em si de penetração, também foi avaliado o parâmetro de penetração retida (PR) dos ligantes, fazendo uma relação entre o valor obtido para o ligante na condição sã e em sua condição envelhecida a curto prazo obtida no procedimento RTFOT. A Equação 6 demonstra a relação para obtenção da PR.

$$PR = \frac{\text{Penetração}_{RTFOT}}{\text{Penetração}_{PURO}} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

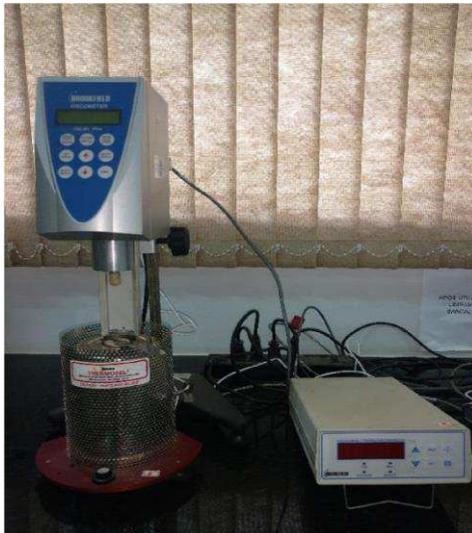
Os baixos valores de penetração retida são um indicativo de uma maior sensibilidade ao envelhecimento (CAVALCANTE, 2016). Para o DNIT 095/2006, os percentuais mínimos da penetração retida para o CAP 50/70 têm de ser da ordem de 55% e de 60% para os ligantes modificados.

### 3.2.1.3. Ensaio de viscosidade rotacional

Segundo Bernucci *et. al.* (2010), a viscosidade é uma medida da consistência do ligante asfáltico, por resistência ao escoamento. Atualmente, o viscosímetro mais empregado nos Estados Unidos e na Europa, já sendo utilizado também no Brasil, para medida da viscosidade é o chamado Brookfield (Figura 13) que permite obter a curva viscosidade-temperatura por meio da medida do comportamento do fluido a diferentes taxas de cisalhamento e a diferentes tensões de cisalhamento, obtidas por rotação de

cilindros coaxiais que ficam mergulhados na amostra em teste (ABNT NBR 15184/2007; ASTM D 4402/2002).

**Figura 13:** Viscosímetro rotacional Brookfield.



**FONTE:** O Autor (2018)

#### 3.2.1.4. Ensaio de ponto de amolecimento

Para a realização do ensaio, utilizou-se o preconizado na norma DNIT-ME 131/2010 que determina o ponto de amolecimento do ligante asfáltico a partir do método do anel e bola. No ensaio em questão, a amostra foi aquecida e colocada em um anel para suporte, este conjunto foi levado a um béquer para ser mantido em banho de água destilada. Colocou-se sobre a amostra uma esfera padronizada de aço e em seguida aqueceu o conjunto a uma velocidade constante de modo a tornar a amostra fluida e que possa ser deslocada pelo peso da esfera metálica. O ponto de amolecimento foi a temperatura lida quando a amostra foi deslocada pela esfera e tocou a placa de referência que distância do conjunto do anel em 25,4mm.

O resultado obtido no ensaio é a média das duas leituras de temperatura de cada conjunto de anel, sendo realizada para o ligante asfáltico de referência e o mesmo com adição dos teores de 2% e 3% de montmorilonita.

O aumento do ponto de amolecimento (APA) também foi avaliado para constatar, segundo Cavalcante (2016), que os altos valores apresentados indicam maior fragilidade do ligante ao envelhecimento. A forma de cálculo é dada pela diferença entre o ponto de

amolecimento dos ligantes em sua condição envelhecida e o ponto de amolecimento em condição pura, como mostrado na Equação 7.

$$APA = PA_{RTFOT} - PA_{PURO} \quad (\text{Equação 7})$$

O DNIT 095/2006 regulamenta um aumento máximo de 8°C no ponto de amolecimento para o CAP 50/70. A Figura 14, a seguir, apresenta os componentes para realização deste ensaio.

**Figura 14:** Equipamento para medida do ponto de amolecimento do ligante, conjunto anel e bola, termômetro e béquer.



**FONTE:** O Autor (2018)

### 3.2.2. Caracterização Reológica

#### 3.2.2.1. Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

O reômetro de cisalhamento dinâmico é utilizado na determinação de parâmetros viscoelásticos do ligante a temperaturas elevadas e intermediárias. O equipamento mede o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperaturas e frequências de carregamentos desejados. O parâmetro  $G^*$  possui uma componente elástica recuperável ( $G'$ ) e uma componente viscosa não recuperável ( $G''$ ). Em resumo, o módulo  $G^*$  pode ser relacionado com a resistência do material em diferentes velocidades de cisalhamento e o ângulo  $\delta$  fornece informação sobre a razão entre a

resposta elástica e viscosa durante o processo de cisalhamento. (MOTTA *et al.*, 1996, LIMA, 2003.) A Figura 15 ilustra um reômetro de especificações SHRP.

**Figura 15:** Ilustração do reômetro de cisalhamento dinâmico.



FONTE: O Autor (2018)

#### 3.2.2.2. Grau de desempenho (PG)

O ensaio de PG determina as temperaturas máxima e mínima em que o ligante asfáltico mantém certas propriedades reológicas de desempenho. Devido ao clima tropical no Brasil, foi identificado nesta pesquisa apenas o PG máximo para as amostras de ligante puro e modificado. A normatização do ensaio é descrita pela ASTM D6373-15. Para definição do PG de uma amostra de ligante asfáltico, é feita uma varredura em função da razão entre o módulo complexo ( $G^*$ ) e o seno do ângulo de fase ( $\text{sen}\delta$ ) para temperaturas variando em uma faixa de 6°C entre cada leitura.

O PG corresponde à faixa de temperaturas na qual os valores de  $G^*/\text{sen}\delta$  são superiores a 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo. A temperatura máxima foi obtida com o ponto de falha determinado no ensaio. Sendo assim, estes valores são capazes de garantir a adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes (BERNUCCI *et al.*, 2007).

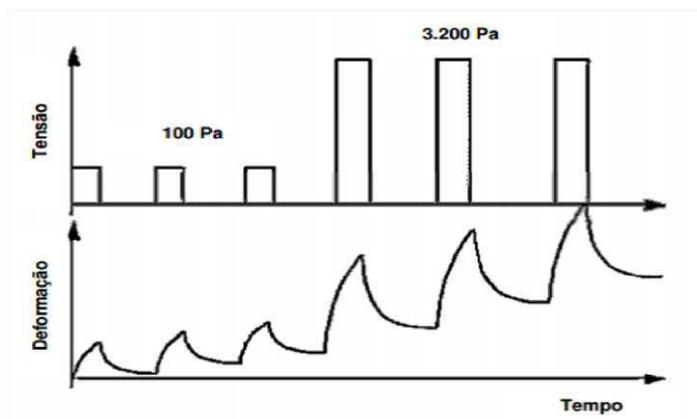
#### 3.2.2.3. Ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)

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 foi feita com a amostra submetida ao envelhecimento a curto prazo no RTFOT. No ensaio foi utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) para aplicar uma carga constante que é estabelecida pela norma ASTM D7405-15, cujos valores são de 100 e 3200 Pa, o tempo de execução dessa carga foi determinado em 1s e 9s de repouso formando um ciclo que é repetido por 10 vezes. A Figura 16 ilustra as tensões e deformações durante o ensaio MSCR.

**Figura 16:** Tensões e Deformações durante o ensaio de MSCR durante cada ciclo.



FONTE: D'Angelo e Dongré (2009)

Domingos (2011) cita que ao final destes ciclos de tensão controlada são obtidos o percentual de recuperação ( $R$ ) e a compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) através dos valores das três leituras de deformação de cada ciclo, as quais são a recuperação no início da fluência ( $E_0$ ), após a aplicação da tensão controlada ( $E_c$ ) e após o tempo de recuperação da amostra ( $E_r$ ). Estas leituras ocorrem nos tempos, 0 s, 1 s e 10 s.

De acordo com D'Angelo (2010), o  $J_{nr}$  se trata de um parâmetro para altas temperaturas obtido no MSCR. A partir dele, foi desenvolvida uma tabela baseada nos diferentes níveis de carregamento no tráfego, classificados como: padrão (*Standard*), pesado (*Heavy*), muito pesado (*Very Heavy*) e extremamente pesado (*Extremely Heavy*). Na Tabela 5 está apresentada a classificação quanto ao valor de  $J_{nr}$  segundo a AASHTO M320.

**Tabela 5:** Classificação quanto ao valor de Jnr pela AASHTO M320.

<b>Condição de envelhecimento</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Limite Máximo (<math>KPa^{-1}</math>)</b>	<b>Nível de Tráfego</b>	<b>Número de solicitações</b>
<b>Envelhecido no RTFOT</b>	Jnr a 3200 Pa na temperatura de PG	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
		2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
		1,0	Muito Pesado (V)	> 30 milhões
		0,5	Extremamente Pesado (E)	> 100 milhões

FONTE: Pamplona (2013)

Segundo o Asphalt Institute (2010), a diferença percentual do Jnr a 100 Pa e a 3200 Pa não deve exceder 75%, a fim de assegurar que o ligante asfáltico não seja excessivamente sensível a variação no nível de tensão.

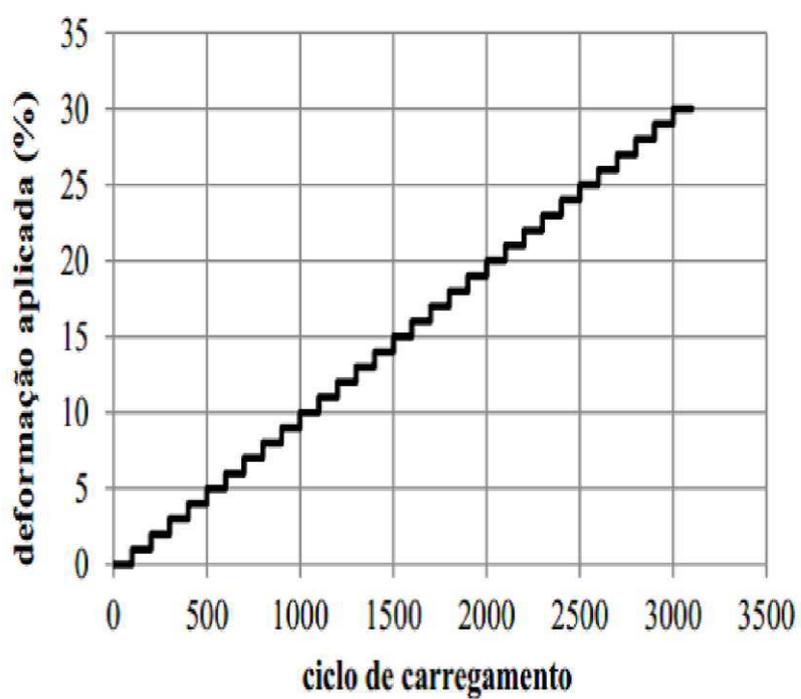
#### 3.2.2.4. Varredura linear de amplitude de deformação (LAS)

Este ensaio é regido pela norma AASHTO TP101-14 e consiste num método acelerado para avaliar o desempenho à fadiga do ligante asfáltico na temperatura intermediária do pavimento. O equipamento utilizado foi um reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer. O ensaio foi realizado em amostras envelhecidas em RTFOT e dividiu-se em duas etapas:

- Varredura de frequência, em que a amostra foi submetida a um carregamento de cisalhamento em um nível de amplitude de 0,1% e a frequência foi de 0,1 a 30 Hz;
- Amplitudes nas quais a amostra foi sujeita a carga de cisalhamento a um nível de frequência constante de 10 Hz e o nível de amplitude foi variado de 0,1 a 30%.

Após estas etapas são feitas leituras do comprimento das trincas ocasionadas nas rupturas por fadiga para posterior análise (PAMPLONA, 2013). A Figura 17 ilustra o incremento de deformação durante o ensaio LAS.

**Figura 17:** Incremento de deformação no ensaio LAS.



FONTE: Pamplona (2013)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

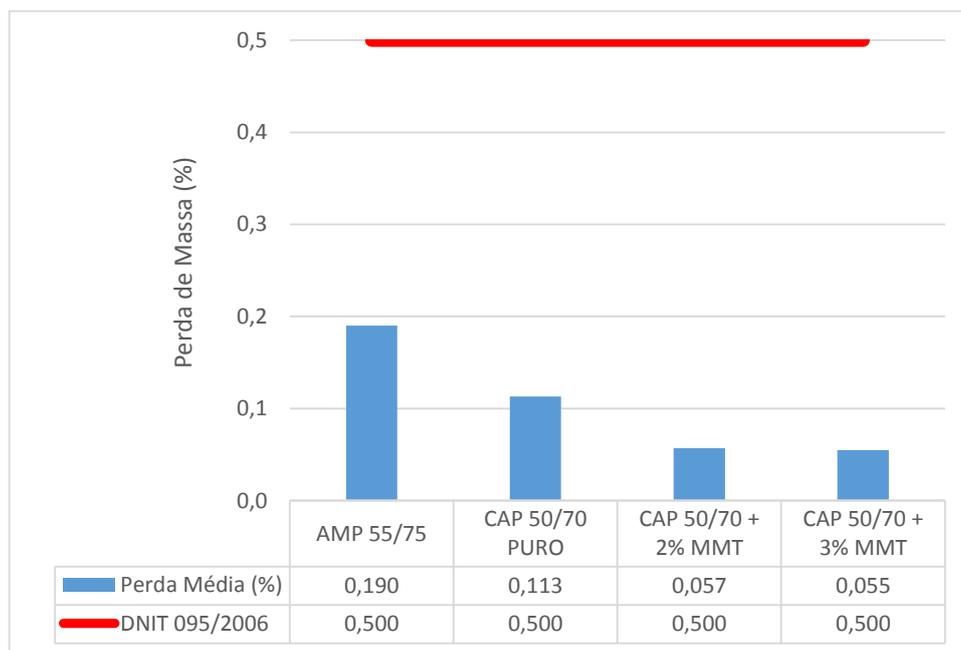
Os resultados referentes à esta pesquisa servirão de discussão acerca do que foi obtido nos ensaios realizados para a caracterização física e reológica do ligante modificado com montmorilonita nos teores de 2% e 3%, nas condições antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFOT) quando comparados ao CAP 50/70 puro e ao AMP 55/75.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

#### 4.1.1. Perda de Massa

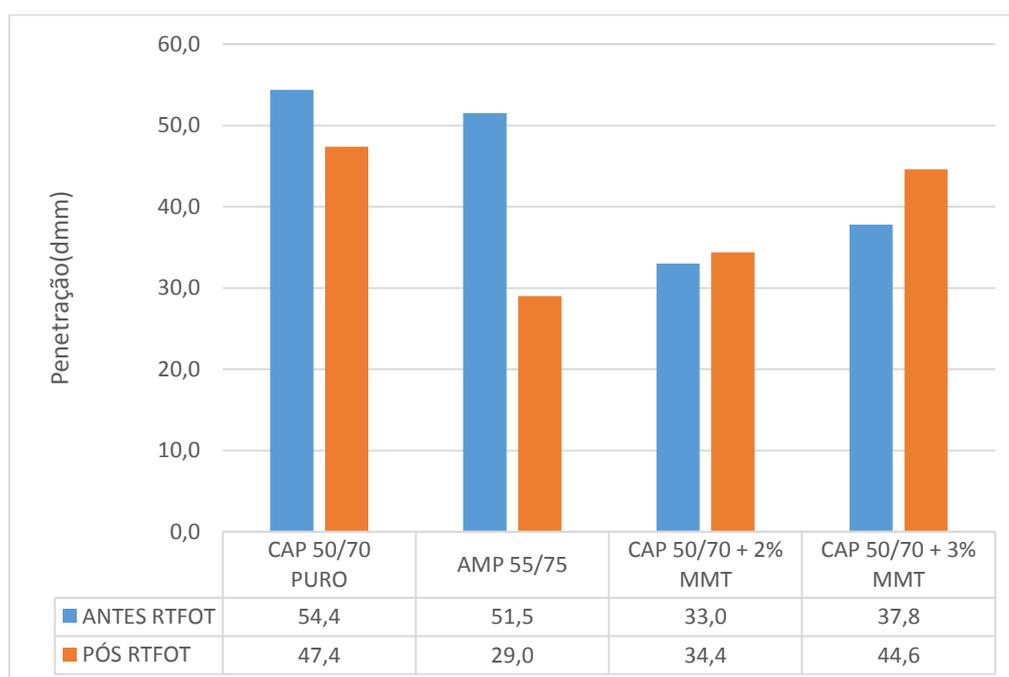
Em relação a perda de massa após o procedimento RTFOT, a Figura 18 apresenta os resultados para os dois teores submetidos ao envelhecimento, bem como os resultados do ligante puro e modificado por polímero SBS. É possível observar que a adição de um agente modificador ao ligante proporcionou uma variação de massa inferior ao que foi observado tanto no ligante puro quanto no modificado por polímero. As amostras modificadas se mostraram menos propensas a perda de massa dado o aumento do teor da nano argila na sua composição, como se pode observar na Figura 18, apresentando uma taxa de variação de 0,055% a 0,057% e a menor perda sendo a do CAP 50/70 com 3% de montmorilonita. Isso se deve ao fato de que essa amostra de ligante possui uma menor oxidação dado o acréscimo da montmorilonita.

Todos os ligantes modificados se mostraram coerentes com o que está prescrito pela norma DNIT 095/2006, em que o CAP 50/70 deve possuir uma variação de perda de massa inferior a 0,5% sendo melhor ilustrado na Figura 18.

**Figura 18:** Perda de massa das amostras.

#### 4.1.2. Ensaio de Penetração

Os resultados mostrados na Figura 19 mostram as médias dos valores de penetração obtidas, para o CAP puro, AMP 55/75 e modificado por montmorilonita em condições antes e após o envelhecimento. É possível também observar os valores de penetração retida, em porcentagem, para cada tipo de ligante.

**Figura 19:** Ensaio de penetração.

Observa-se que antes do envelhecimento a curto prazo o ligante modificado por argila apresentou valores menores de penetração em comparação com o CAP 50/70 puro e o AMP 55/75. Entretanto, após o envelhecimento, pôde-se observar uma nova configuração. O AMP 55/75 passou a ter o menor valor de penetração dentre os ligantes e a penetração do CAP 50/70 puro também diminuiu, porém, ainda foi maior que a dos ligantes modificados por montmorilonita.

Com relação às amostras ensaiadas após o envelhecimento a curto prazo, as penetrações do ligante modificado por argila apresentaram tendência semelhante de aumento de valor da penetração, porém, com o envelhecimento sabe-se que o ligante se mostra mais rígido, ocasionando assim uma diminuição dos valores de penetração, o que não ocorreu com os teores de 2% e 3% de MMT. Uma das justificativas seria o fato do ensaio ser empírico, não nos trazendo resultados tão confiáveis, como também falha do operador, e ainda, a realização do ensaio em temperaturas distintas, ocasionando interferência direta em seus resultados.

O que se pode observar também é que a adição de um teor de 3% ocasiona um aumento na penetração quando comparado ao teor de 2%, tanto antes quanto após o envelhecimento, fato que demonstra que a adição de uma maior quantidade de montmorilonita proporciona uma menor rigidez ao ligante na mistura.

A maior penetração constatada foi observada no CAP 50/70 puro, em um valor médio de 54,4 dmm que está dentro o limite estabelecido na norma DNIT 095/2006-EM que apresenta valores de 50 a 70 decímetros de milímetros a 25°C.

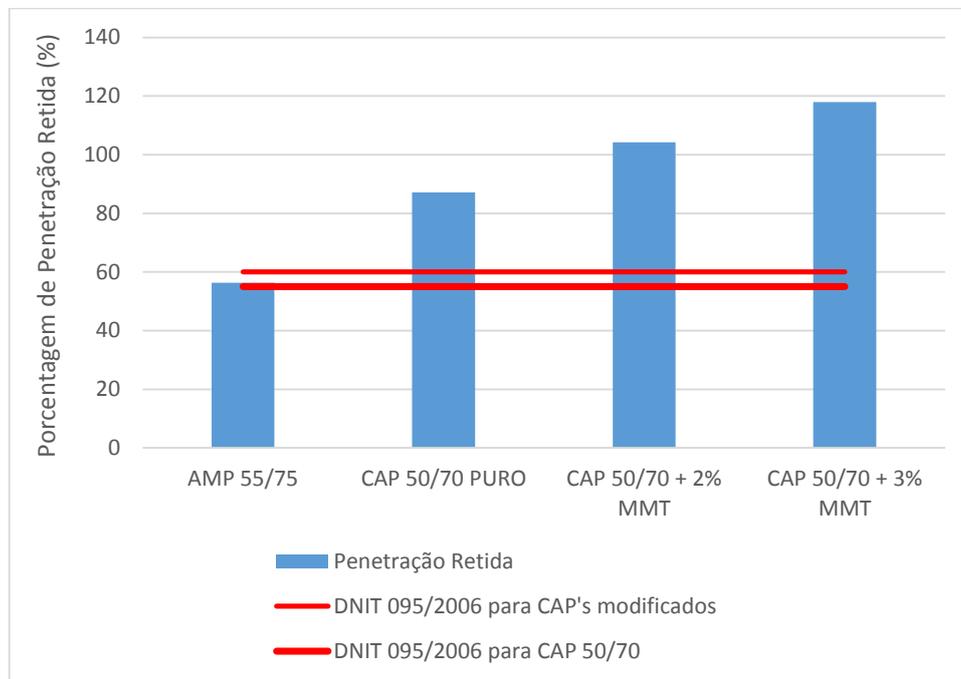
Pode-se observar uma redução da penetração para o AMP 55/75 comparado ao ligante puro, indicando assim um aumento na rigidez do material devido à incorporação do polímero.

Portanto, com os valores de penetração dos ligantes antes e após o envelhecimento, os resultados da penetração retida se mostraram de 56,31% para o AMP 55/75, de 104,24% para o CAP 50/70 + 2% de MMT e de 117,99% para o CAP 50/70 + 3% de MMT, estando apenas o AMP 55/75 abaixo do limite mínimo preconizado por norma de 60%. Para o CAP 50/70 tivemos uma penetração retida de 87,13%, acima do mínimo previsto pela norma, de 55%.

Sabe-se que a penetração retida se mostra como um indicador dos ligantes asfálticos ao RTFOT, indicando assim que o AMP 55/75 é o mais sensível ao

envelhecimento por apresentar o menor valor de penetração retida. A Figura 20 ilustra as penetrações retidas em comparação com o preconizado em norma.

**Figura 20:** Penetração retida de cada teor de ligante.



Portanto, os resultados demonstram que com relação à penetração, a adição da montmorilonita em teores crescentes proporciona maiores valores de penetração, tornando o ligante menos sensível ao envelhecimento, expresso em maiores valores de penetração retida.

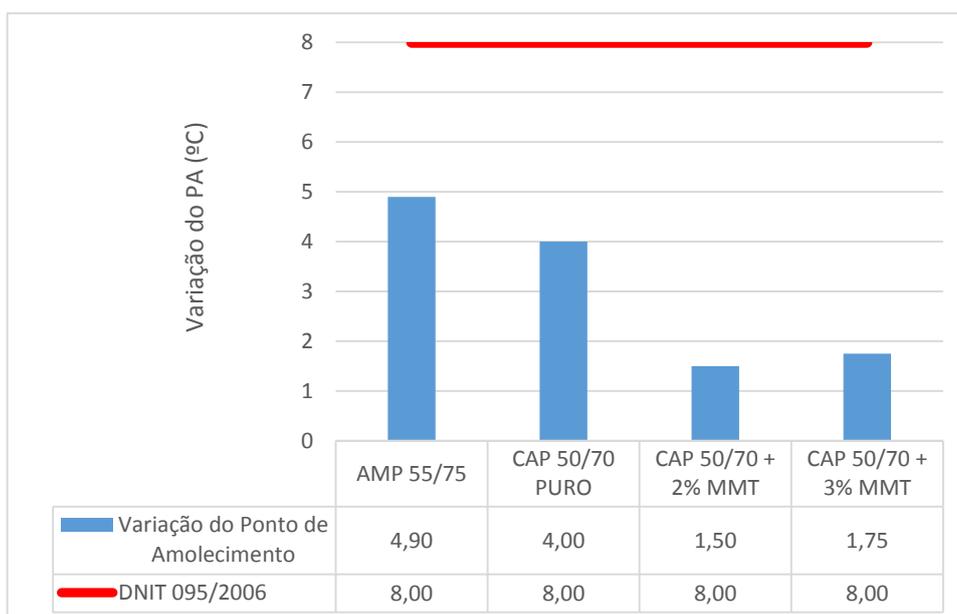
#### 4.1.3. Ensaio do ponto de amolecimento

Os resultados do ensaio de ponto de amolecimento referentes ao ligante puro e modificado por SBS e MMT, e ainda, nas condições antes e após o envelhecimento são ilustrados na Figura 21. O ligante que apresentou o menor valor de ponto de amolecimento foi o CAP 50/70 puro, sendo o AMP 55/75 o que apresentou o maior, antes e após o envelhecimento a curto prazo.

Os resultados mostram uma tendência de diminuição do ponto de amolecimento com a incorporação de um teor maior de argila, antes e após RTFOT. Este fato corrobora o que foi observado no ensaio de penetração, em que a adição de 1% a mais de argila na composição do ligante o torna menos rígido.

**Figura 21:** Ensaio de amolecimento para os ligantes em estudo.

E ainda, considerando a variação do ponto de amolecimento dado o processo de envelhecimento a curto prazo, a norma DNIT 095/2006-ME prescreve um aumento máximo de 8°C para o CAP 50/70. Sendo assim, todos os ligantes atendem ao que a norma prevê, apresentando um aumento de temperatura de 4,9°C; 4,0°C; 1,5°C e 1,75°C, respectivamente. A Figura 22 ilustra a comparação entre os valores e o previsto pela norma.

**Figura 22:** Variação do ponto de amolecimento de cada ligante.

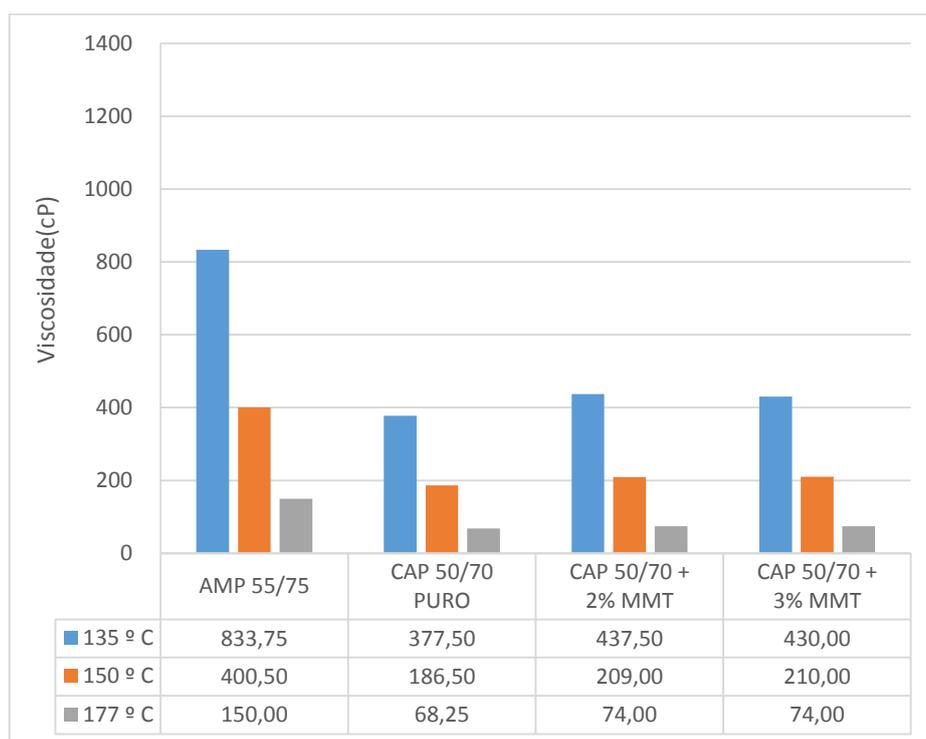
Valores elevados de variação do PA indicam uma sensibilidade maior do ligante ao envelhecimento a curto prazo, logo o AMP 55/75 é o que possui maior variação, corroborando com os resultados que se obteve para a penetração.

#### 4.1.4. Ensaio de viscosidade

##### 4.1.4.1. Antes do envelhecimento a curto prazo (RTFOT)

Os resultados obtidos através da viscosidade rotacional Brookfield são representados em centiPoise (cP) e foram obtidos a partir da média das amostras, realizadas para as três temperaturas que a norma preconiza (135°C, 150°C e 177°C). A Figura 23 ilustra os resultados obtidos para o ensaio realizado antes do envelhecimento.

**Figura 23:** Viscosidade antes do envelhecimento a curto prazo (RTFOT) de cada teor de ligante.

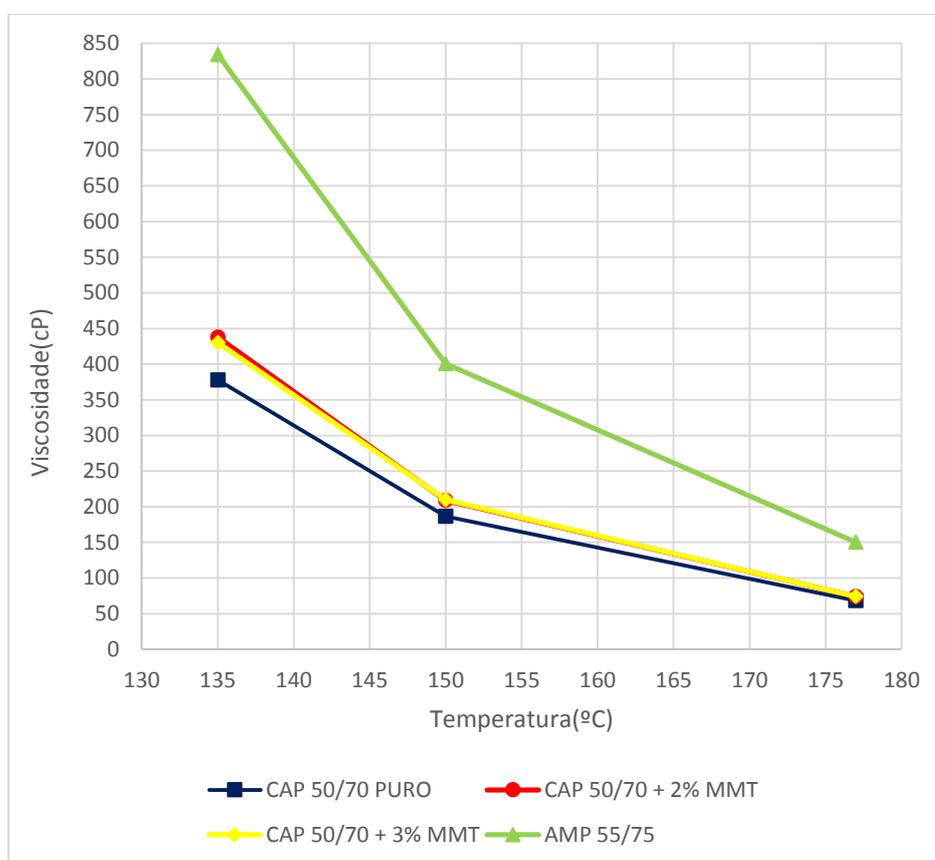


A adição da MMT proporcionou o aumento das viscosidades nos dois teores em relação ao ligante puro, porém esses valores foram inferiores aos obtidos para o AMP 55/75. Uma observação relevante se deve ao fato de que os valores de viscosidade para os teores de 2% e 3% se mantiveram praticamente constantes, ou seja, a adição de 1% a

mais de montmorilonita não influencia na consistência do ligante antes do processo de envelhecimento.

Em relação ao que preconiza a norma do DNIT 095/2006 para a viscosidade rotacional Brookfield, todos os teores estão de acordo com os valores mínimos e máximos previstos para as três temperaturas de referência. A Figura 24 ilustra as curvas de viscosidade do CAP 50/70 puro e modificado por MMT, além do AMP 55/75 antes do RTFOT.

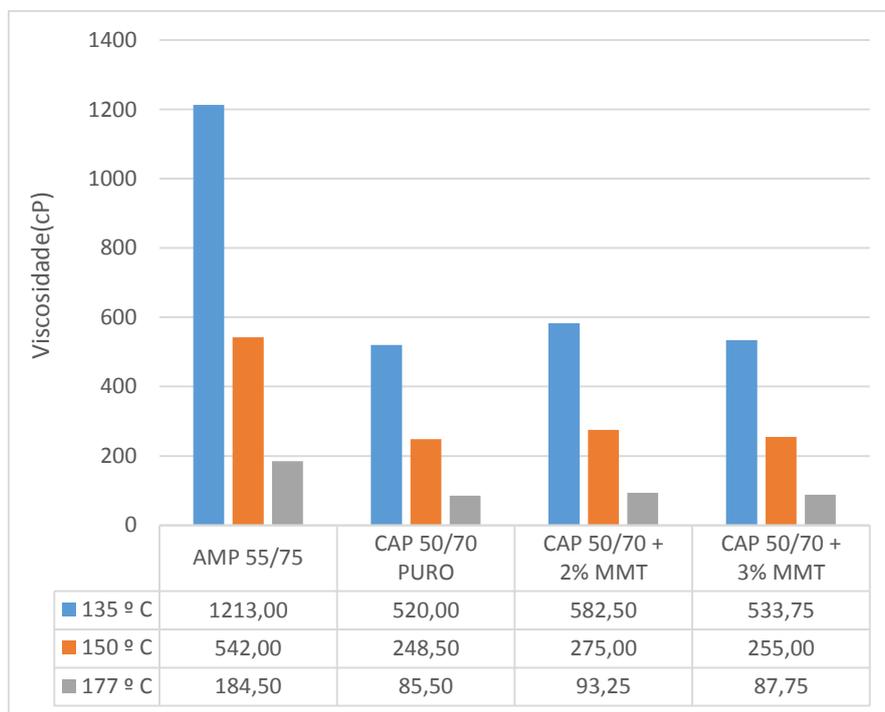
**Figura 24:** Viscosidade antes do envelhecimento a curto prazo (RTFOT) de cada teor de ligante de acordo com o aumento da temperatura.



#### 4.1.4.2. Envelhecimento a curto prazo (RTFOT)

A Figura 25 ilustra os resultados obtidos para o CAP puro e modificado após o envelhecimento.

**Figura 25:** Viscosidade após o envelhecimento a curto prazo (RTFOT) de cada teor de ligante.



Após o envelhecimento do ligante puro e modificado, pôde-se notar o mesmo padrão de acréscimo das viscosidades com a adição dos teores de MMT em detrimento do CAP 50/70 puro. É possível notar também o aumento dos valores de viscosidade que o procedimento de envelhecimento causa nos ligantes.

Observou-se também que o teor de 2% de MMT apresentou viscosidades maiores que o teor de 3%, ou seja, a incorporação da argila aparenta provocar a diminuição da resistência ao movimento e aumentar sua capacidade de fluir.

Logo, 2% de MMT seria o teor melhor incorporado ao ligante para ser utilizado nos pavimentos asfálticos depois do CAP 55/75 que, por ser modificado por polímero, possui inúmeras qualidades e desempenha suas funções muito bem. A Figura 26 ilustra as curvas de viscosidade do CAP 50/70 puro e modificado por MMT, além do AMP 55/75 após o RTFOT.

**Figura 26:** Viscosidade após envelhecimento a curto prazo (RTFOT) de cada teor de ligante de acordo com o aumento da temperatura.



#### 4.1.4.3. Índice de envelhecimento

Em posse dos resultados das viscosidades antes e após o RTFOT, determinou-se o Índice de Envelhecimento (IE) obtido como a relação entre as viscosidades. Os resultados estão representados na Tabela 6 com relação à temperatura de 135°C na Tabela 7 com relação à temperatura de 150°C e na Tabela 8 com relação à temperatura de 177°C.

**Tabela 6:** Índices de envelhecimento obtidos através do ensaio de viscosidade rotacional para temperatura de 135°C.

<b>ENSAIO DE VISCOSIDADE – TEMPERATURA DE 135°C</b>			
<b>TEORES</b>	<b>ANTES RTFOT (cP)</b>	<b>APÓS RTFOT (cP)</b>	<b>IE</b>
<b>AMP 55/75</b>	833,75	1213,00	1,45
<b>CAP 50/70 PURO</b>	377,50	520,00	1,38
<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	437,50	582,50	1,33
<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>	430,00	533,75	1,24

**Tabela 7:** Índices de envelhecimento obtidos através do ensaio de viscosidade rotacional para temperatura de 150°C.

<b>ENSAIO DE VISCOSIDADE – TEMPERATURA DE 150°C</b>			
<b>TEORES</b>	<b>ANTES RTFOT (cP)</b>	<b>APÓS RTFOT (cP)</b>	<b>IE</b>
<b>AMP 55/75</b>	400,5	542,0	1,35
<b>CAP 50/70 PURO</b>	186,5	248,5	1,33
<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	209,0	275,0	1,32
<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>	210,0	255,0	1,21

**Tabela 8:** Índices de envelhecimento obtidos através do ensaio de viscosidade rotacional para temperatura de 177°C.

<b>ENSAIO DE VISCOSIDADE – TEMPERATURA DE 177°C</b>			
<b>TEORES</b>	<b>ANTES RTFOT (cP)</b>	<b>APÓS RTFOT (cP)</b>	<b>IE</b>
<b>AMP 55/75</b>	150,00	184,50	1,23
<b>CAP 50/70 PURO</b>	68,25	85,50	1,25
<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	74,00	93,25	1,26
<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>	74,00	87,75	1,19

Os resultados mostraram que para as três temperaturas os teores de 2% e 3% obtiveram índices de envelhecimento menores que o índice do CAP 50/70 puro, com exceção do teor de 2% na temperatura de 177°C, apresentando um centésimo acima ao valor de referência, que pode ser explicado por variações das condições do ensaio. Portanto, os teores apresentam assim, uma menor suscetibilidade ao envelhecimento, sendo a adição de 3% a que representa a maior resistência ao envelhecimento.

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

### 4.2.1. Grau de desempenho (PG)

O ensaio de PG foi realizado antes e após o envelhecimento a curto prazo e é um ensaio que nos fornece dados acerca da temperatura máxima em que o ligante asfáltico pode ser utilizado, além de parâmetros de deformabilidade e rigidez. Na Tabela 9, a seguir, temos os resultados fornecidos pelo DSR para o CAP 50/70 puro antes do

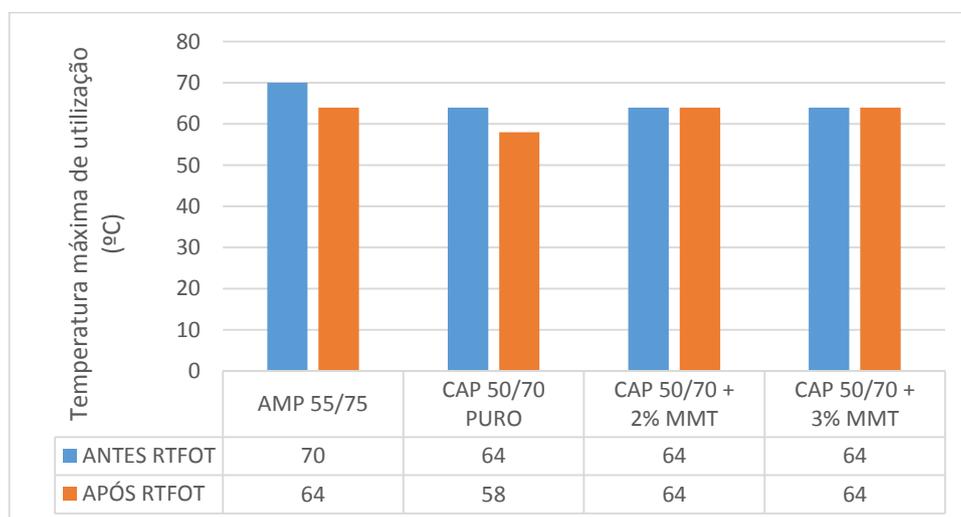
RTFOT de maneira a exemplificar as informações que podemos obter a partir deste ensaio.

**Tabela 9:** Ensaio de PG para o ligante CAP 50/70 puro antes do envelhecimento a curto prazo.

ENSAIO DE PG – CAP 50/70 PURO								
	Angular Freq. (rad/s)	Temp. (°C)	Osc. Stress (Pa)	% Strain	Delta degrees	G* (KPa)	G*/sinδ (KPa)	Pass/Fail
<b>1</b>	10.0	46	2.31	12.1	83.3	19.1	19.2	PASS
<b>2</b>	10.0	52	0.89	12.0	85.1	7.37	7.39	PASS
<b>3</b>	10.0	58	0.37	12.1	86.6	3.08	3.09	PASS
<b>4</b>	10.0	64	0.16	12.0	87.6	1.37	1.37	PASS
<b>5</b>	10.0	70	0.08	12.0	88.2	0.642	0.642	FAIL

Conforme resultados obtidos verifica-se alguns parâmetros, tais como: Módulo Complexo ( $G^*$ ), que se relaciona à rigidez do ligante, o ângulo delta ( $\delta$ ) relacionado à elasticidade e  $G^*/\sin(\delta)$  que reflete a deformabilidade do ligante asfáltico. Todavia, seu objetivo principal é delimitar a faixa de temperatura de uso mínima e máxima de utilização do ligante. O equipamento para a obtenção das temperaturas mínimas estava indisponível no laboratório, assim analisou-se apenas as temperaturas máximas. A Figura 27 ilustra as temperaturas máximas de utilização do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo (RTFOT) obtidas no ensaio.

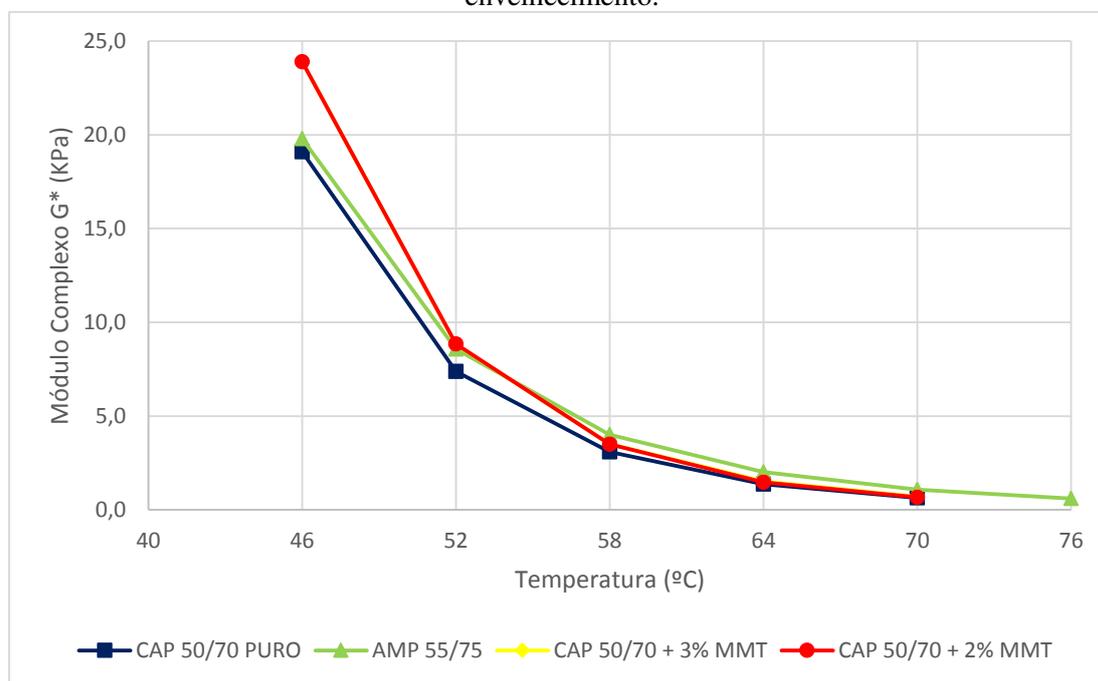
**Figura 27:** Temperatura máxima de utilização de cada ligante.



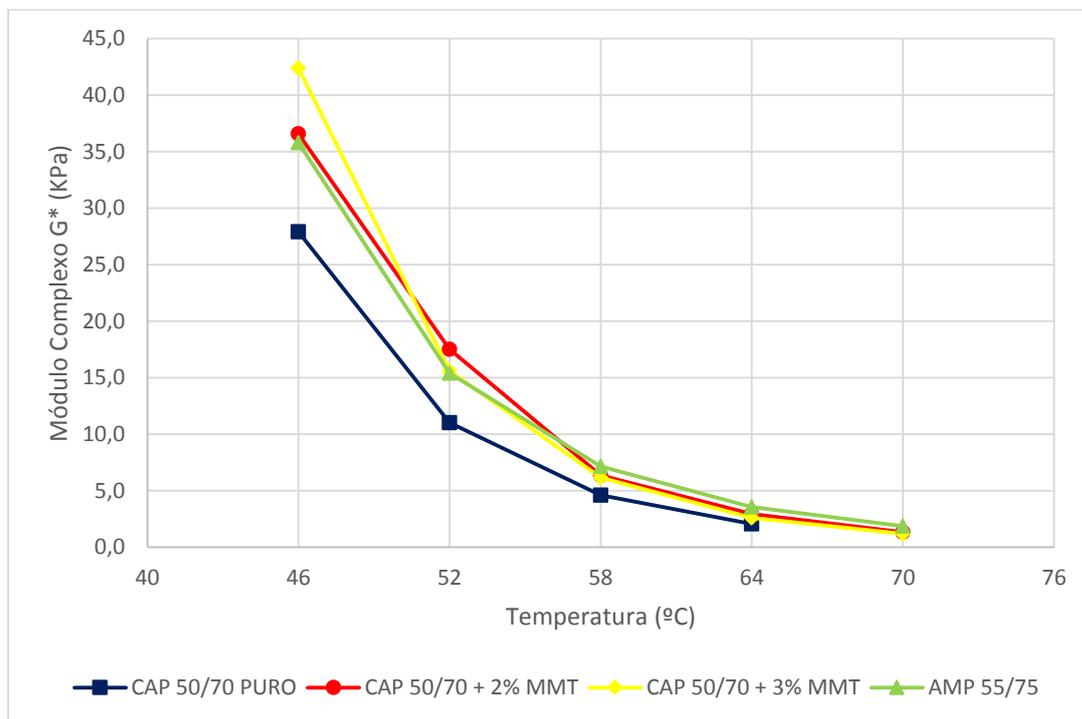
Da análise deste resultado infere-se que tanto o ligante asfáltico puro, CAP 50/70, quanto o modificado por SBS, AMP 55/75 apresentaram reduções de temperatura após o envelhecimento a curto prazo, decrescendo de 64 para 58°C e de 70 para 64°C, respectivamente. Isso se deve ao fato de que os ligantes ficam mais suscetíveis ao efeito da oxidação e perdem suas propriedades de deformabilidade e rigidez mediante altas temperaturas. Observa-se também que os ligantes incorporados com 2% e 3% de MMT mantêm suas temperaturas de PG constantes após o RTFOT em 64°C, o que evidencia que a adição de montmorilonita ocasiona o aumento na resistência ao envelhecimento oxidativo do ligante asfáltico.

Em relação ao módulo complexo ( $G^*$ ), que está ligado à rigidez do ligante, as Figuras 28 e 29 ilustram que este parâmetro é superior nos ligantes modificados com MMT, tornando-os mais rígidos quando comparados ao CAP 50/70 puro e AMP 55/75 até a temperatura de 52°C, tanto antes como após o processo de envelhecimento a curto prazo, respectivamente.

**Figura 28:** Módulo complexo  $G^*$  (KPa) em função da temperatura (°C) dos ligantes antes do envelhecimento.



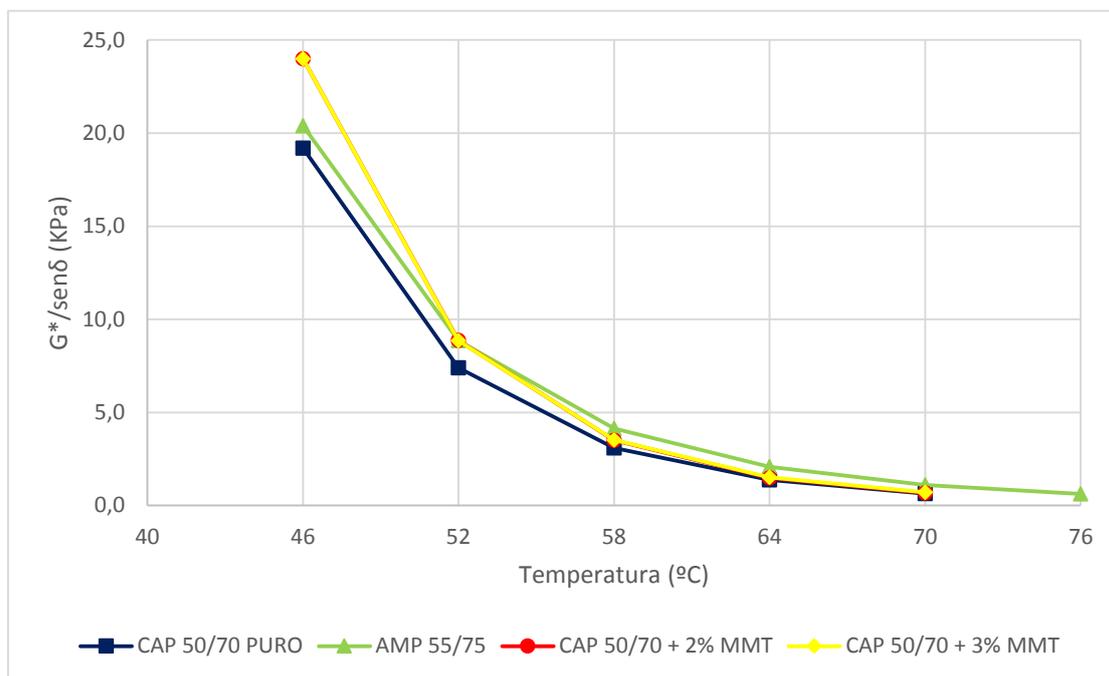
**Figura 29:** Módulo complexo  $G^*$  (KPa) em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos ligantes após envelhecimento.



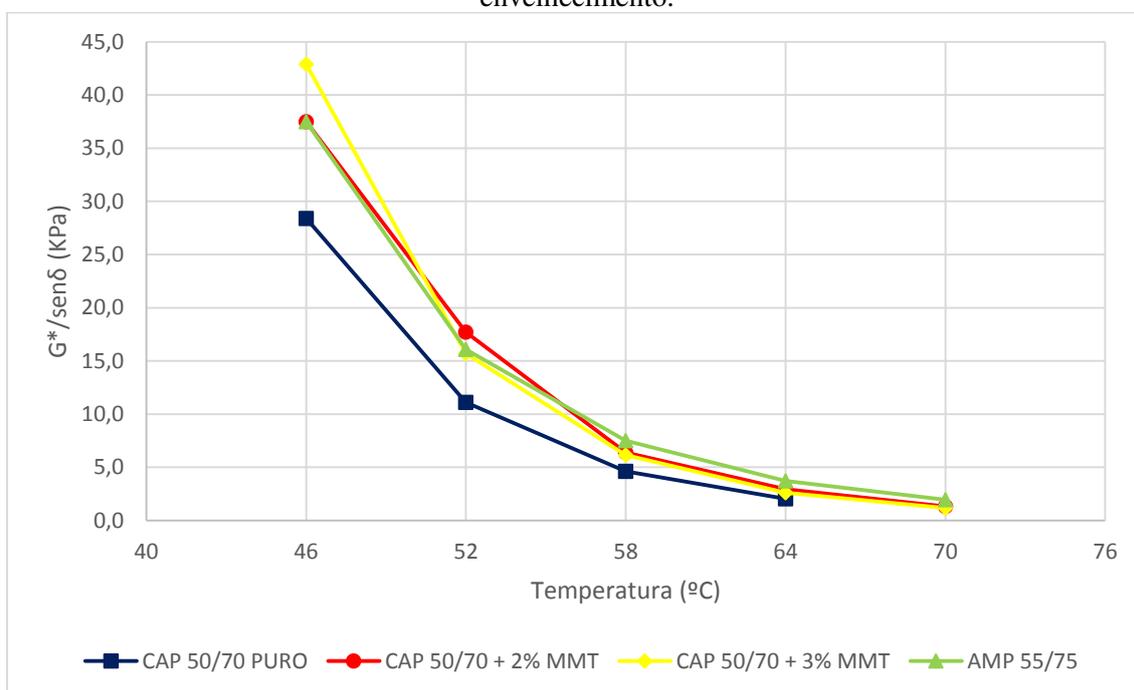
Verifica-se que antes do envelhecimento os ligantes com 2% e 3% de MMT possuem módulos complexos semelhantes ao longo de todo o espectro de temperatura, sendo estes valores superiores ao do CAP 50/70 e AMP 55/75 até a temperatura de  $52^{\circ}\text{C}$ , passando o AMP 55/75 a possuir os maiores valores em temperaturas superiores. Os valores de  $G^*$  vão diminuindo com o incremento da temperatura e nota-se também que o AMP 55/75 possui a maior temperatura de falha, sendo de  $71^{\circ}\text{C}$ .

Após o envelhecimento, nota-se que o ligante modificado por SBS e o ligante modificado com 2% de MMT possuem valores próximos de módulo complexo ao longo do espectro de temperatura. Vale ressaltar que os ligantes modificados com polímero e nano argila apresentam valores de módulo complexo até a temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$ , o que reforça a ideia de que estes materiais conferem propriedades antioxidantes ao ligante asfáltico, permitindo-o ser melhor utilizado em altas temperaturas sem prejudicar muito seu desempenho. Em consonância à análise do módulo complexo ( $G^*$ ), as Figuras 30 e 31 ilustram a variação do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  com o aumento da temperatura de ensaio, antes e após o RTFOT, respectivamente.

**Figura 30:** Parâmetro  $G^*/\text{sen } \delta$  (KPa) em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos ligantes antes do envelhecimento.



**Figura 31:** Parâmetro  $G^*/\text{sen } \delta$  (KPa) em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos ligantes após envelhecimento.



O parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  mede a resistência à deformação permanente do ligante asfáltico e é estabelecido como critério de parada do ensaio de PG. Para amostras antes do envelhecimento, quando  $G^*/\text{sen}(\delta)$  for menor que 1,0 KPa o ensaio é encerrado, pois admite-se que a partir daí o ligante está muito deformável e não atende aos critérios de

desempenho mínimo. Para amostras após envelhecimento, o critério de parada do ensaio se dá quando  $G^*/\text{sen}(\delta)$  for menor que 2,2 KPa.

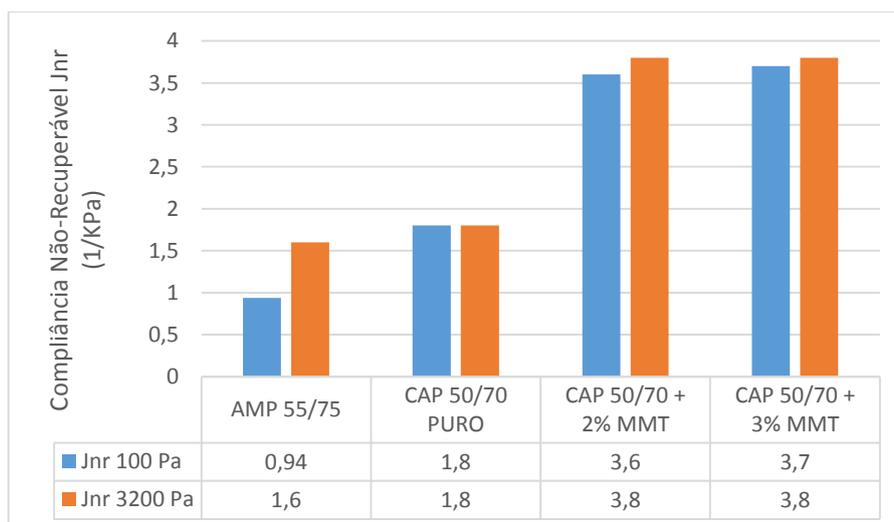
O que se pode observar é que os ligantes modificados apresentam um aumento da resistência à deformação permanente frente ao CAP 50/70 puro. Comparando os dois teores de modificação com MMT, ambos com a mesma temperatura máxima de utilização (64°C) percebe-se que antes do envelhecimento o ligante com 2% de MMT apresenta uma redução de 3% no valor de  $G^*/\text{sen}(\delta)$  com relação ao teor de 3%. Já após o envelhecimento o ligante com 2% de MMT apresenta um aumento de mais de 11% no valor de  $G^*/\text{sen}(\delta)$  com relação ao teor de 3%.

E ainda, comparando o CAP+MMT com o AMP 55/75 infere-se que o ligante modificado por polímero apresenta uma maior resistência total à deformação, pois a incorporação do SBS ao CAP ocasiona uma melhoria da resposta elástica do material.

#### 4.2.2. Ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)

O ensaio de MSCR é, por norma, realizado apenas com o ligante asfáltico envelhecido. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 32 e representam o valor da compliância não-recuperável,  $J_{nr}$ , sob o carregamento de 100 e 3200 Pa.

**Figura 32:** Compliância não-recuperável,  $J_{nr}$ , sob carregamento de 100 e 3200 Pa dos ligantes asfálticos.

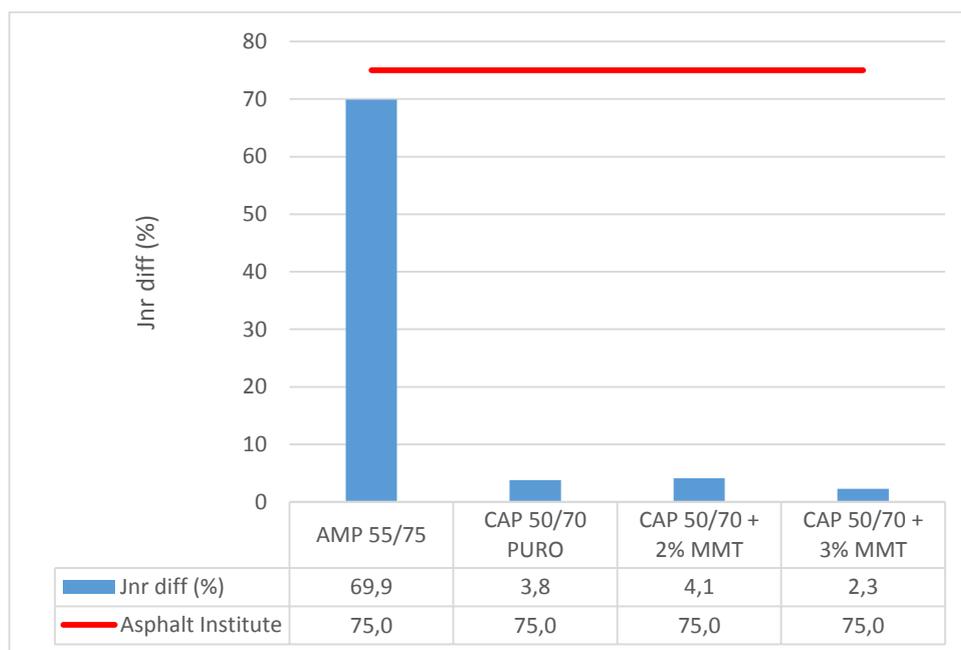


De acordo com a classificação AASHTO M320, apresentada na Tabela 5, o ligante puro é indicado para tráfego pesado ( $1,0 < J_{nr} < 2,0$ ), ou seja, tem um número de

solicitações acima de 10 milhões se utilizado na temperatura de PG pós RTFOT, 58°C. O ligante modificado com SBS também é indicado para tráfego pesado na temperatura de PG de 64°C. Já o ligante modificado com MMT é indicado para tráfego padrão ( $2,0 < J_{nr} < 4,0$ ) e tem um número de solicitações abaixo de 10 milhões na temperatura de PG, 64°C. Todos os ligantes estudados apresentam  $J_{nr}$  dentro do limite máximo estabelecido pela AASHTO, de  $4,0 \text{ kPa}^{-1}$ .

A compliância não-recuperável dos ligantes modificados com nano argila aumentou em relação à do CAP 50/70 e AMP 55/75, ou seja, os teores de 2% e 3% de MMT apresentam menores resistências à deformação permanente. Outro parâmetro importante de se discutir no estudo do ensaio é o  $J_{nr \text{ diff}}$ , que é a medida da diferença entre o  $J_{nr}$  a 100 e a 3200 Pa, expresso em porcentagem. Ele avalia a sensibilidade dos ligantes ao aumento do nível de tensão. Os resultados estão ilustrados na Figura 33.

**Figura 33:** Diferença entre as compliâncias não-recuperáveis a 100 Pa e 3200 Pa.



Segundo o Asphalt Institute (2010), a diferença entre o  $J_{nr}$  sob tensão de 100 e 3200 Pa deve ser inferior a 75% para que se ateste a propriedade do ligante não ser demasiadamente sensível às mudanças de carregamento. Desta forma, todos os ligantes pesquisados atendem aos critérios estabelecidos e são adequados à pavimentação.

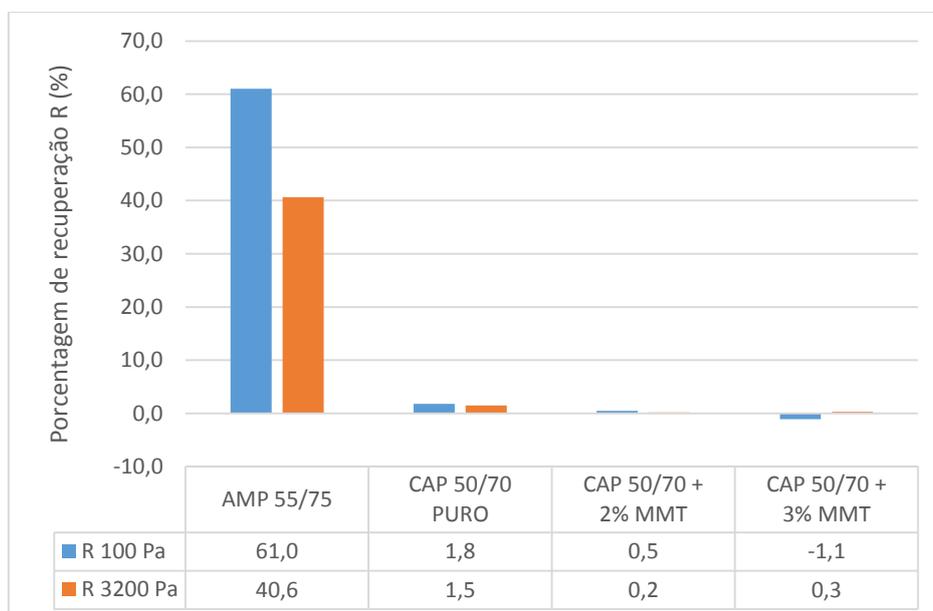
Pode-se observar que os ligantes modificados com MMT apresentam baixos valores de  $J_{nr \text{ diff}}$ , diferentemente do ligante modificado com polímero, ou seja, do ponto

de vista da deformação permanente, o AMP 55/75 seria o menos indicado por apresentar uma maior suscetibilidade à deformação.

O ensaio MSCR também fornece o parâmetro de porcentagem de recuperação, expresso em porcentagem, que mede as propriedades elásticas do ligante asfáltico. Por meio da Figura 34 percebe-se que o ligante modificado por polímero apresentou maiores porcentagens de recuperação em relação ao ligante puro, indicando uma parcela elástica maior da deformação total sofrida.

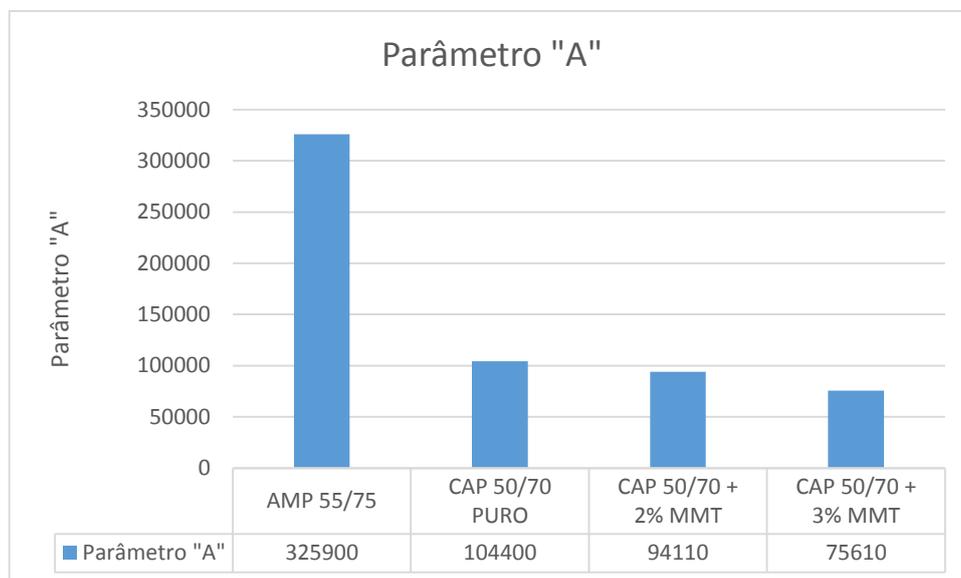
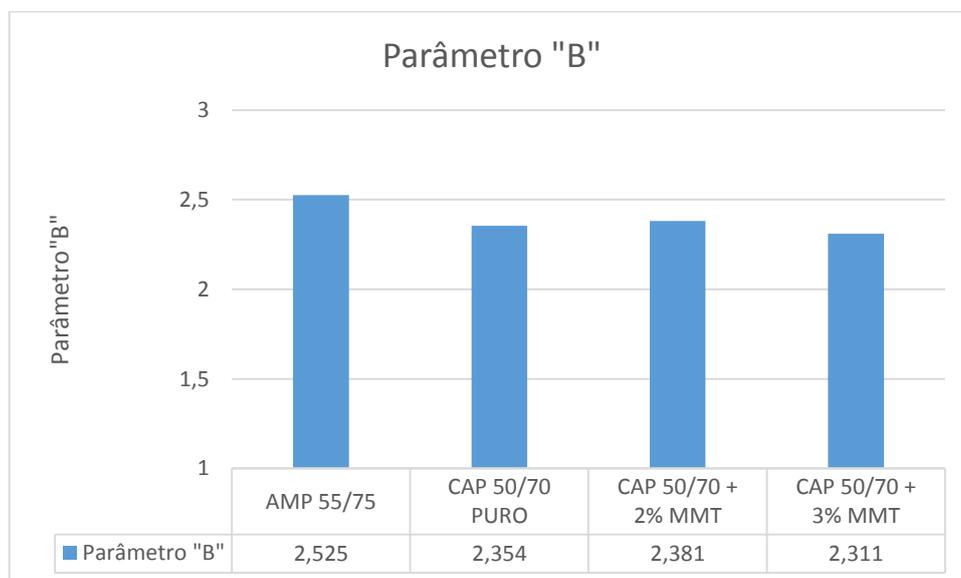
Como a recuperação elástica em ligantes não modificados por polímeros não nos traz resultados representativos, percebe-se que a incorporação da MMT fez com que o CAP não apresentasse melhorias quanto a sua elasticidade.

**Figura 34:** Porcentagem de recuperação R dos ligantes asfálticos.



#### 4.2.3. Varredura linear de amplitude (LAS)

As Figuras 35 e 36 apresentam os resultados de avaliação dos parâmetros “A” e “B” na resistência ao dano obtidas pelo ensaio da varredura linear de amplitude (LAS) para as amostras de CAP 50/70 e amostras modificadas com MMT e SBS.

**Figura 35:** Parâmetro “A” obtido no LAS.**Figura 36:** Parâmetro “B” obtido no LAS.

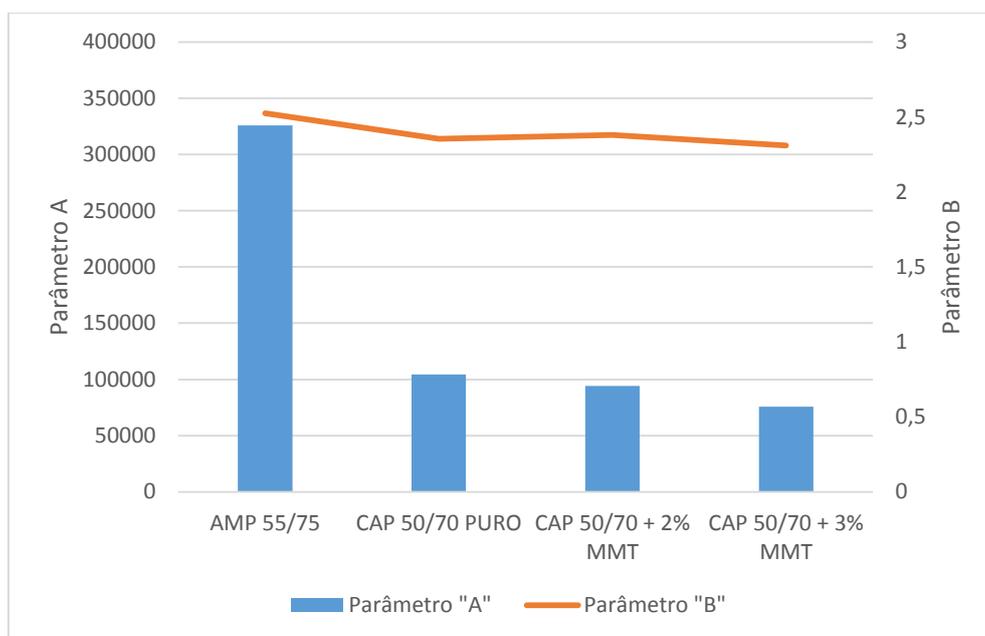
Com os resultados, observa-se que há uma redução nos valores do parâmetro “A” dos ligantes modificados com montmorilonita em relação tanto ao CAP 50/70 puro quanto ao ligante modificado por polímero, ou seja, houve uma diminuição da integridade inicial do ligante asfáltico diante do acúmulo de danos. O teor de 3% de MMT é o que apresenta a menor manutenção de integridade e o modificado por SBS é o que apresenta a única melhoria na integridade comparado ao ligante virgem.

Em relação ao parâmetro “B”, têm-se que o CAP + 2% MMT apresentou um aumento quando comparado ao CAP puro, ou seja, possui maior sensibilidade à variação do nível de deformações no ligante. Já o CAP + 3% MMT apresentou uma diminuição em detrimento do CAP puro, ocasionando uma menor sensibilidade à variação do nível de deformações.

Ao comparar o CAP + SBS com o CAP + MMT e o CAP 50/70 percebe-se que o aumento da sensibilidade desse ligante à variação do nível de deformações é devido à adição do polímero.

Na Figura 37, observa-se uma correlação entre os resultados dos parâmetros “A” e “B” a fim de verificar a influência da modificação no comportamento desses parâmetros simultaneamente.

**Figura 37:** Relação entre os parâmetros “A” e “B”.



O gráfico demonstra que apesar do AMP 55/75 possuir uma maior resistência ao dano acumulado, se mostra mais sensível ao aumento da amplitude de deformações. Ao comparar os teores de 2% e 3% de MMT, percebe-se que enquanto o teor de 2% apresenta uma maior resistência ao dano acumulado, o teor de 3% apresenta uma menor sensibilidade à variação do nível de deformações no ligante.

Também a partir do ensaio, é possível estimar a vida de fadiga do ligante asfáltico (Nf) em função de níveis de deformação. A Tabela 10 originou-se a partir da utilização

da estimativa da vida de fadiga dos ligantes modificados com montmorilonita e polímero SBS, além do ligante puro para os níveis de deformação de 2,5%, 5% e 10%.

**Tabela 10:** Estimativa de vida de fadiga dos ligantes.

<b>ENSAIO DE LAS</b>				
<b>ESTIMATIVA DA VIDA DE FADIGA</b>				
<b>AMPLITUDE DE DEFORMAÇÃO (%)</b>	<b>AMP 55/75</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>
<b>2.5</b>	32235	12082	10619	9102
<b>5.0</b>	5601	2364	2038	1835
<b>10.0</b>	973	463	391	370

Nota-se que o AMP 55/75 possui em todas as amplitudes de deformação as maiores estimativas de vida de fadiga, seguido pelo CAP 50/70, CAP 50/70 + 2% MMT e CAP 50/70 + 3% MMT, ou seja, a incorporação da nano argila ao CAP virgem age de forma a aumentar a resistência ao envelhecimento, tanto em termos de volatilização, quanto em termos de oxidação.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após os estudos referentes à adição da montmorilonita ao ligante asfáltico convencional, chegou-se às seguintes considerações:

➤ Antes do procedimento de envelhecimento a curto prazo:

- Os ligantes modificados com montmorilonita apresentam valores maiores de módulo complexo, tornando-os mais rígidos que o CAP convencional.

- Os valores de viscosidade para os teores de 2% e 3% são próximos, ou seja, a adição de 1% de argila não influencia na consistência do ligante, porém os valores são maiores que o do CAP 50/70, demonstrando uma maior resistência ao movimento.

➤ Depois do procedimento de envelhecimento a curto prazo:

- Os ligantes modificados com MMT são menos sensíveis ao envelhecimento, dado os maiores valores de penetração retida e menores valores de variação de ponto de amolecimento comparados ao ligante convencional.

- O grau de desempenho dos ligantes com MMT é maior devido ao aumento da resistência ao envelhecimento oxidativo, porém a compliância não-recuperável destes ligantes é maior, ou seja, eles são menos resistentes à deformação permanente e possuem menor integridade inicial do ligante asfáltico diante do acúmulo de danos.

➤ Comparando o CAP + MMT ao AMP 55/75:

- Os ligantes modificados com MMT possuem os maiores valores de penetração retida, logo são menos sensíveis ao envelhecimento.

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

- O ligante modificado por SBS é o que apresenta a única melhoria na integridade comparado ao ligante virgem. Em relação ao parâmetro “B”, ao comparar o AMP 55/75 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 ligante modificado por polímero possui uma maior resistência ao dano acumulado, todavia se mostra mais sensível ao aumento da amplitude de deformações.

Portanto, essa modificação com montmorilonita se mostrou benéfica devido ao fato de que trouxe melhoria nas propriedades reológicas do ligante, aumentando sua rigidez e sua resistência ao envelhecimento, bem como diminuindo sua suscetibilidade à

variações do nível de deformações e ao aumento da amplitude das mesmas. Por outro lado, se mostrou menos resistente à deformação permanente, ou seja, é preciso saber a finalidade da aplicação do ligante, quais propriedades se deseja melhorar para que se escolha a melhor modificação e seu teor para ser utilizado na pavimentação.

## 5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Caracterizar quimicamente o ligante modificado por montmorilonita;
- Avaliar a aplicação do ligante modificado por montmorilonita na produção de misturas asfálticas;
- Estudos de incorporações em teores diferentes para buscar o teor ótimo de adição, e ainda, estudar a composição de dois ou mais aditivos e realizar a proporção ótimas destes.

## REFERÊNCIAS

AASHTO (2005) M320 – **Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C., EUA.

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

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. 15184 (2004) Materiais Betuminosos – **Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional**. NBR 15184. São Paulo. 2004.

ARSHAK, K. et al. A review of gas sensors employed in electronic nose applications. **Sensor review**, v. 24, n. 2, p. 181-198, 2004.

ASPHALT INSTITUTE. **Implementation of the multiple stress creep recovery test and specification**. Asphalt Institute Guidance Document. 2010.

ASTM, D. 4402. **Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer**, 2006.

ASTM, D. 2872 (2004) Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). **Annual Book of ASTM Standards**, v. 4, 2004.

ASTM, D. 6373 (2015) Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 4.

ASTM D7405-15 **Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM. Standards: Designation: D 4124-01, Standard Test Methods for Separation of Asphalt into Four Fractions. 2001.

AZEVEDO, Breno Costa de. **Análise do comportamento reológico dos ligantes asfálticos cap 50/70 e cap 55/75**. [2017]. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Campina Grande – Paraíba, 2017.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos. São Paulo. 2007

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica – formação básica para Engenheiros**. 1. ed. ABEDA: Rio de Janeiro, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 3ª. **Reimpressão. PETROBRÁS–Petróleo Brasileiro S/A, ABEDA–Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto**. Rio de Janeiro, 2010.

BRINGEL, Raquel Moraes. **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE.

CAVALCANTE, Fabiano Pereira et al. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. 2016.

D'ANGELO, J. et al. Revision of the Superpave high-temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**. White Bear Lake, v. 76, p. 123-162. 2009.

D'ÁNGELO, J. et al. **The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure**. Technical Brief. Office of Pavement Technology. Federal Highway Administration United States Department of Transportation. FHWA-HIF-10-XXX. 2010.

DARLEY, Henry CH; GRAY, George R. **Composition and properties of drilling and completion fluids**. Gulf Professional Publishing, 1988.

DOMINGOS, M. D. I. **Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte). Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. 2011.

DOS SANTOS, Karine Pereira. **Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas como modificador em cimentos asfálticos de petróleo**. 2012. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande.

GIRDLER, R. B. Constitution of asphaltenes and related studies. **Assoc Asphalt Paving Technol Proc**. 1965.

HUNTER, Alistair E.; AIREY, Gordon D.; COLLOP, Andrew C. Effect of asphalt mixture compaction on aggregate orientation and mechanical performance. **Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)**. 2004. p. 16.

JAHROMI, Saeed Ghaffarpour; KHODAII, Ali. Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2894-2904, 2009.

JIMÉNEZ, Félix Edmundo Pérez. **Manual de Pavimentação**. CEPISA. 3 ed. 2014.

LEITE, Leni Figueiredo Mathias. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese (Doutorado). Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, IMA/UFRJ. Rio de Janeiro. 1999.

LIAN, H. J.; LIN, J. R.; YEN, T. F. Peptization studies of asphaltene in asphalt systems and correlation by solubility parameter spectra. **Particle Technology and Surface Phenomena in Minerals and Petroleum**. Springer, Boston, MA, 1991. p. 39-48.

LUCENA, Maria da Conceição Cavalcante. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2005.

MELO, João Victor Staub de et al. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014.

MÉLO, T. J. A.; ARAÚJO, E. M.; BRITO, G. F.; AGRAWAL, P. Development of nanocomposites from polymer blends: effect of organoclay on the morphology and mechanical properties. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 615, p. S391, 2014.

MIGNONI, L. M. **Síntese, caracterização e aplicações de nanocompósitos polímeroargila**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 2008.

MOTHÉ, Michelle Gonçalves. **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

MOTTA, L., Tonial, I., LEITE, L., & Constantino, R. (1996). **Princípios do projeto e análise superpave de misturas asfálticas**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo. 1996.

NETO, Oswaldo Lima. **Transportes no Brasil: história e reflexões**. GEIPOT, Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Ministério dos Transportes, 2001.

OLIVEIRA, A. D.; CASTRO, L. D. C.; JUNG, M. K.; PESSAN, L. A. Influência da modificação da argila montmorilonita nas propriedades mecânicas, termo-mecânicas e morfológicas de nanocompósitos de blendas de poliamida 6/Acrilonitrila-EPDM-estireno. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 25, p. 228, 2015.

OSMAN, M.A., (2006) *J. Mater Chem*, 16, 3007.

PAIVA, L. B.; MORALES, A. R.; DIAZ, F. R. V. An overview on organophilic clays: properties, routes of preparation and applications. **Applied Clay Science**, 2007.

PAIVA, L. B.; MORALES, A. R.; DIAZ, F. R. V. Argilas organofílicas: características, metodologias de preparação, compostos de intercalação e técnicas de caracterização. **Cerâmica**, v. 54, p. 226, 2008.

PAMPLONA, T. F. **Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo/USP, São Paulo/SP. 2013.

PECK, James; SHELL, Karl. Equilibrium bank runs. **Journal of political Economy**, v. 111, n. 1, p. 103-123, 2003.

PEREIRA, Luiz Andrei Gonçalves; LESSA, Simone Narciso. O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 12, n. 40, 2011.

RAMOS, C.R.; LÁO, V.L. DO E.S.T.; MARTINHO, F.G.; MACEDO, M.M.D. Asfalto modificado com polímero uma opção para melhoria dos asfaltos nacionais. **Anais do 13º Encontro de Asfalto**, v. 1, p. 60-82 1996.

RAY, Suprakas Sinha; OKAMOTO, Masami. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. **Progress in polymer science**, v. 28, n. 11, p. 1539-1641, 2003.

SILVA, Andressa de Oliveira. **Estudo do comportamento reológico de ligantes asfálticos: CAP 50-70, CAP 55-75 e CAP AB-8**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Estadual da Paraíba, Araruna – Paraíba, 2017

SILVA, Letícia Socal da. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos: influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV**. 2005. 155 f. tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005

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

TOMÉ, Luisa Gardênia Alves. **Efeito da adição de nanoargilas e nanocompósitos argila/sbs no desempenho de ligantes asfálticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2014.

TONIAL, M.L.; GONÇALVES, R; CONSTANTINO, F. A. Jr.; BASTOS, A.R. **13º Encontro de Asfalto do IBP**, 1996.

VASCONCELOS, Kamilla Lima; SOARES, Jorge Barbosa; LEITE, Leni Mathias. Influência da densidade máxima teórica na dosagem de misturas asfálticas. **17º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET**. 2003. p. 5-17.

YILDIRIM, Yetkin. Polymer modified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 66-72, 2007.

YU, Zhenyang et al. Biodegradable poly (l-lactide)/poly ( $\epsilon$ -caprolactone)-modified montmorillonite nanocomposites: preparation and characterization. **Polymer**, v. 48, n. 21, p. 6439-6447, 2007.

# APÊNDICES

## APÊNDICE A: RESULTADOS REFERENTES AOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

**Tabela A1:** Resultados da perda de massa obtidos para o CAP puro.

PERDA DE MASSA - CAP 50/70 PURO					
AMOSTRA	ANTES	APÓS	DIFERENÇA	%	MÉDIA
1	222,10	221,70	0,40	0,180	0,113
2	223,60	223,20	0,40	0,179	
3	218,50	218,30	0,20	0,092	
4	221,10	220,80	0,30	0,136	
5	221,40	221,20	0,20	0,090	
6	220,50	220,20	0,30	0,136	
7	221,10	221,00	0,10	0,045	
8	225,10	225,00	0,10	0,044	

**Tabela A2:** Resultados da perda de massa obtidos para o CAP + 2% MMT.

PERDA DE MASSA - CAP 50/70 + 2% MMT					
AMOSTRA	ANTES	APÓS	DIFERENÇA	%	MÉDIA
1	217,85	217,78	0,07	0,032	0,057
2	220,64	220,52	0,12	0,054	
3	207,76	207,65	0,11	0,053	
4	210,47	210,28	0,19	0,090	

**Tabela A3:** Resultados da perda de massa obtidos para o CAP + 3% MMT.

PERDA DE MASSA - CAP 50/70 + 3% MMT					
AMOSTRA	ANTES	APÓS	DIFERENÇA	%	MÉDIA
1	216,60	216,42	0,18	0,083	0,055
2	219,82	219,71	0,11	0,050	
3	212,76	212,66	0,10	0,047	
4	217,34	217,25	0,09	0,041	

**Tabela A4:** Resultados obtidos antes do RTFOT para o ensaio de penetração.

ENSAIO DE PENETRAÇÃO (dmm)				
LEITURAS	CAP 50/70 PURO	AMP 55/75	CAP 50/70 + 2% MMT	CAP 50/70 + 3% MMT
1	52,0	50,0	33,0	41,0
2	55,0	49,0	34,0	38,0
3	58,0	52,5	31,0	37,0
4	54,0	52,0	34,0	37,0
5	53,0	54,0	33,0	36,0
<b>MÉDIA</b>	54,4	51,5	33,0	37,8

**Tabela A5:** Resultados obtidos pós RTFOT para o ensaio de penetração.

<b>ENSAIO DE PENETRAÇÃO (dmm)</b>				
<b>LEITURAS</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>AMP 55/75</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>
<b>1</b>	47,0	28,0	37,0	47,0
<b>2</b>	46,0	27,0	32,0	44,0
<b>3</b>	49,0	29,0	36,0	41,0
<b>4</b>	45,0	32,0	32,0	45,0
<b>5</b>	50,0	29,0	35,0	46,0
<b>MÉDIA</b>	47,4	29,0	34,4	44,6

**Tabela A6:** Resultados obtidos antes do RTFOT para o ensaio de amolecimento.

<b>ENSAIO DE AMOLECIMENTO (°C)</b>				
<b>AMOSTRAS</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>AMP 55/75</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>
<b>1</b>	47,00	59,10	52,50	50,50
<b>2</b>	48,00	58,10	52,50	51,00
<b>MÉDIA</b>	47,50	58,60	52,50	50,75

**Tabela A7:** Resultados obtidos após RTFOT para o ensaio de amolecimento.

<b>ENSAIO DE AMOLECIMENTO (°C)</b>				
<b>AMOSTRAS</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>AMP 55/75</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>
<b>1</b>	51,00	63,00	53,50	52,00
<b>2</b>	52,00	64,00	54,50	53,00
<b>MÉDIA</b>	51,50	63,50	54,00	52,50

**Tabela A8:** Resultados obtidos para a variação do ponto de amolecimento dos ligantes.

<b>PONTO DE AMOLECIMENTO (°C)</b>			
	<b>ANTES</b>	<b>APÓS</b>	<b>VARIAÇÃO</b>
<b>DNIT 095/2006</b>	-	-	8,00
<b>AMP 55/75</b>	58,60	63,50	4,90
<b>CAP 50/70 PURO</b>	47,50	51,50	4,00
<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	52,50	54,00	1,50
<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>	50,75	52,50	1,75

**Tabela A9:** Resultados obtidos antes do RTFOT para o ensaio de viscosidade.

<b>ENSAIO DE VISCOSIDADE BROOKFIELD (cP)</b>				
<b>TEMPERATURA</b>	<b>AMP 55/75</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>
<b>135 ° C</b>	833,75	377,50	437,50	430,00
<b>150 ° C</b>	400,50	186,50	209,00	210,00
<b>177 ° C</b>	150,00	68,25	74,00	74,00

**Tabela A10:** Resultados obtidos após RTFOT para o ensaio de viscosidade.

<b>ENSAIO DE VISCOSIDADE BROOKFIELD (cP)</b>				
<b>TEMPERATURA</b>	<b>AMP 55/75</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>
<b>135 °C</b>	1213,00	520,00	582,50	533,75
<b>150 °C</b>	542,00	248,50	275,00	255,00
<b>177 °C</b>	184,50	85,50	93,25	87,75

## APÊNDICE B: RESULTADOS REFERENTES AOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

**Tabela B1:** Resultados obtidos através do ensaio de PG para a temperatura máxima de utilização do ligante asfáltico.

<b>ENSAIO DE PG</b>				
<b>TEMPERATURA MÁXIMA DE UTILIZAÇÃO (°C)</b>				
<b>LIGANTES</b>	<b>AMP 55/75</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>
<b>ANTES RTFOT</b>	70	64	64	64
<b>APÓS RTFOT</b>	64	58	64	64

**Tabela B2:** Resultados obtidos através do ensaio de PG para o parâmetro G\* x temperatura antes do RTFOT.

<b>ENSAIO DE PG</b>				
<b>MÓDULO COMPLEXO G* (KPa) x TEMPERATURA (°C)</b>				
<b>TEMP. (°C)</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>	<b>AMP 55/75</b>
<b>46</b>	19,100	23,900	23,900	19,800
<b>52</b>	7,370	8,850	8,830	8,570
<b>58</b>	3,080	3,500	3,520	4,000
<b>64</b>	1,370	1,470	1,520	2,010
<b>70</b>	0,642	0,674	0,701	1,070
<b>76</b>	-	-	-	0,593

**Tabela B3:** Resultados obtidos através do ensaio de PG para o parâmetro G\* x temperatura após RTFOT.

<b>ENSAIO DE PG</b>				
<b>MÓDULO COMPLEXO G* (KPa) x TEMPERATURA (°C)</b>				
<b>TEMP. (°C)</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>	<b>AMP 55/75</b>
<b>46</b>	27,900	36,600	42,400	35,800
<b>52</b>	11,000	17,500	15,600	15,400
<b>58</b>	4,600	6,350	6,140	7,140
<b>64</b>	2,050	2,930	2,600	3,560
<b>70</b>	-	1,31	1,18	1,860

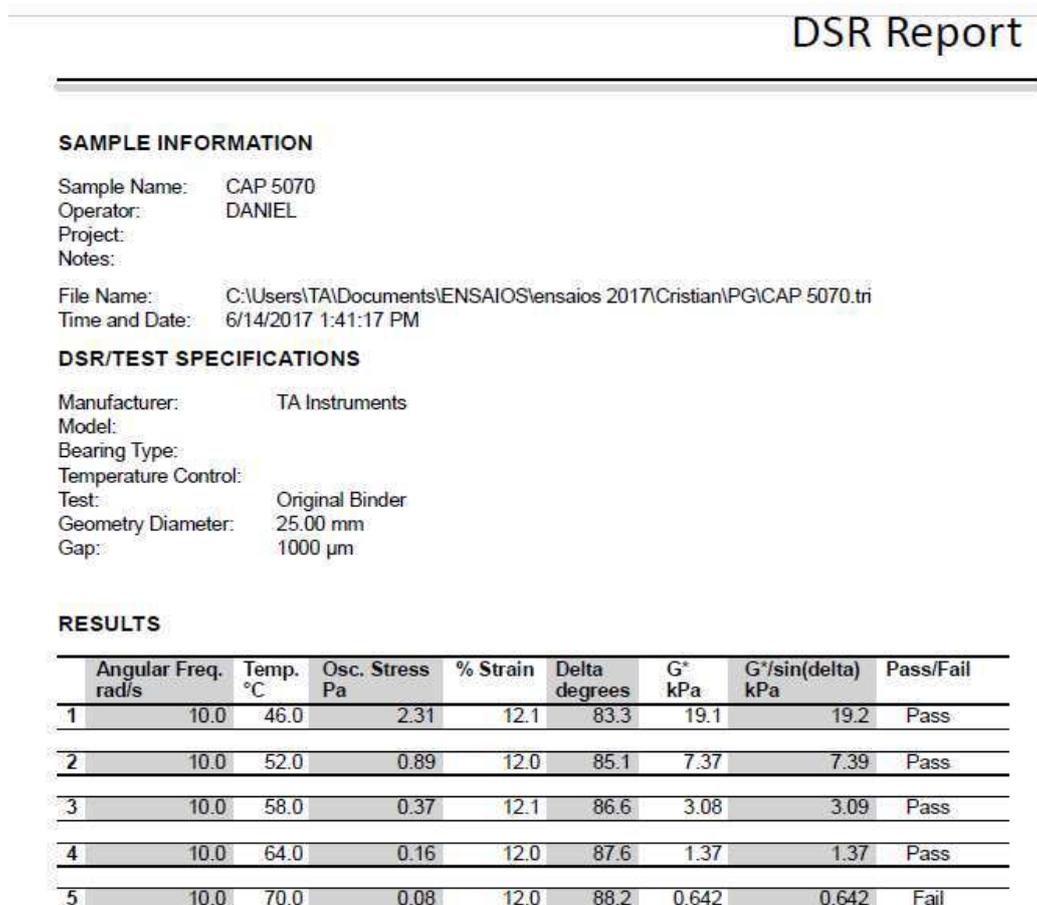
**Tabela B4:** Resultados obtidos através do ensaio de PG para o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  x temperatura antes do RTFOT.

<b>ENSAIO DE PG</b>				
<b>PARÂMETRO <math>G^*/\text{SEN}\delta</math> (KPa) x TEMPERATURA (°C)</b>				
<b>TEMP. (°C)</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>	<b>AMP 55/75</b>
<b>46</b>	19,200	24,000	24,000	20,400
<b>52</b>	7,390	8,870	8,850	8,860
<b>58</b>	3,090	3,500	3,520	4,140
<b>64</b>	1,370	1,480	1,520	2,080
<b>70</b>	0,642	0,674	0,702	1,100
<b>76</b>	-	-	-	0,614

**Tabela B5:** Resultados obtidos através do ensaio de PG para o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  x temperatura após RTFOT.

<b>ENSAIO DE PG</b>				
<b>PARÂMETRO <math>G^*/\text{SEN}\delta</math> (KPa) x TEMPERATURA (°C)</b>				
<b>TEMP. (°C)</b>	<b>CAP 50/70 PURO</b>	<b>CAP 50/70 + 2% MMT</b>	<b>CAP 50/70 + 3% MMT</b>	<b>AMP 55/75</b>
<b>46</b>	28,400	37,500	42,900	37,500
<b>52</b>	11,100	17,700	15,700	16,100
<b>58</b>	4,630	6,390	6,160	7,490
<b>64</b>	2,050	2,940	2,600	3,730
<b>70</b>	-	1,31	1,18	1,940

**Figura B1:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 puro antes do RTFOT.

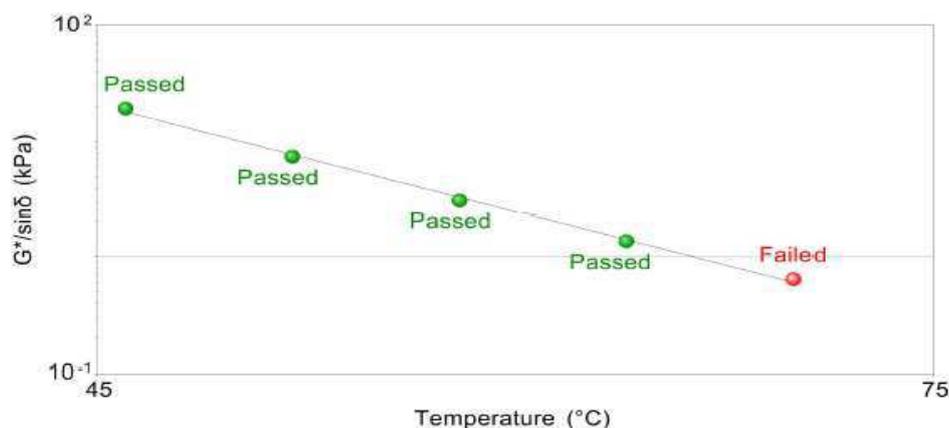


**Figura B2:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 puro antes do RTFOT (continuação).

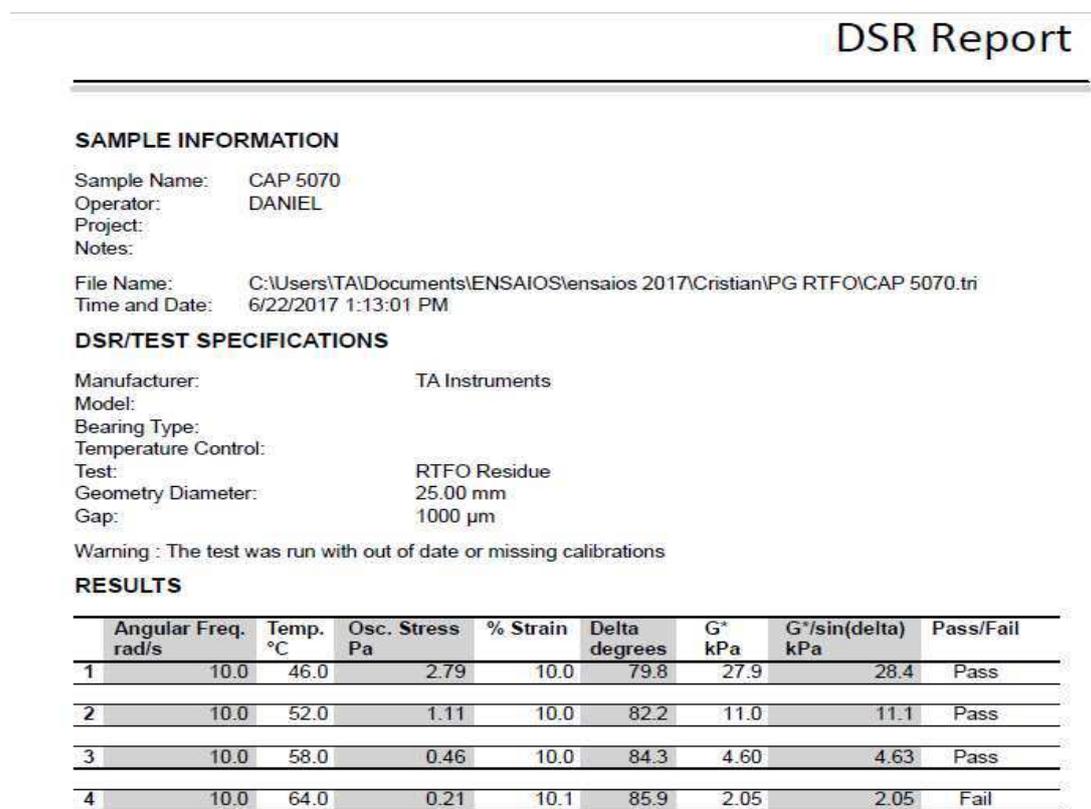
DSR Report, continued

### FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 5070  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\PG\CAP 5070.tri  
 Fail Temperature: 66.4 °C



**Figura B3:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 puro após RTFOT.

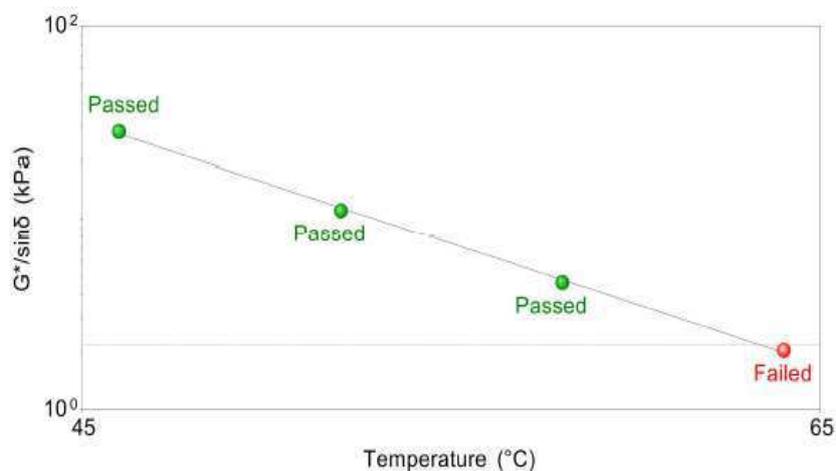


**Figura B4:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 puro após RTFOT (continuação).

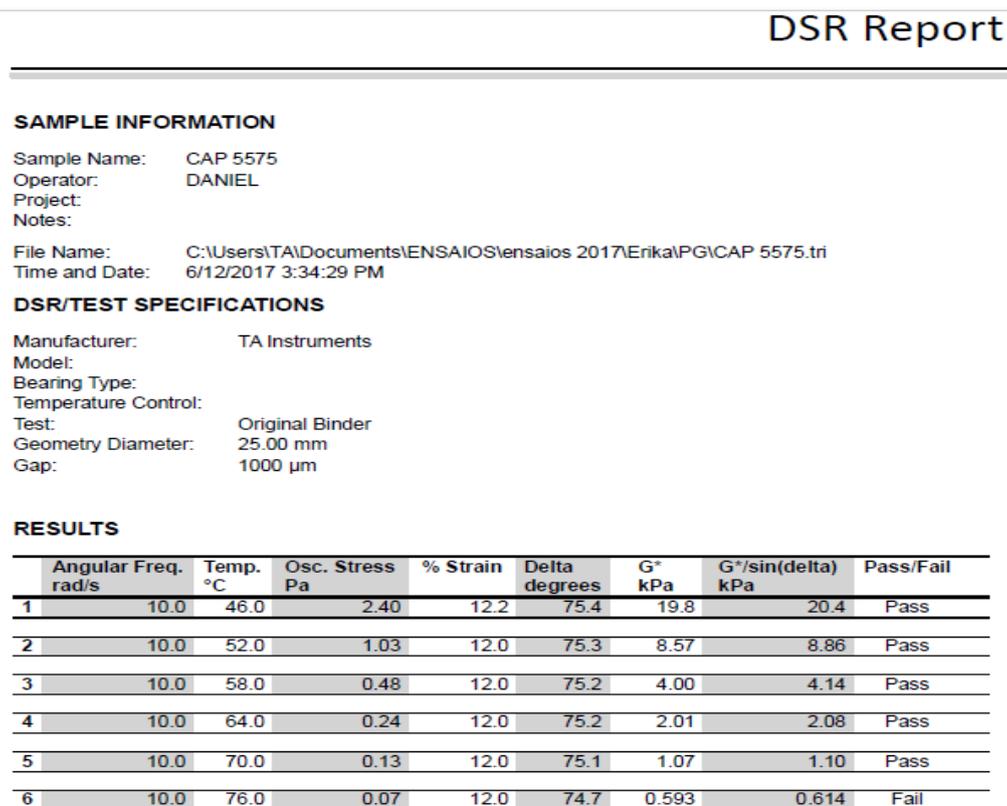
DSR Report, continued

#### FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 5070  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\PG RTFO\CAP 5070.tri  
 Fail Temperature: 63.3 °C



**Figura B5:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o AMP 55/75 antes do RTFOT.

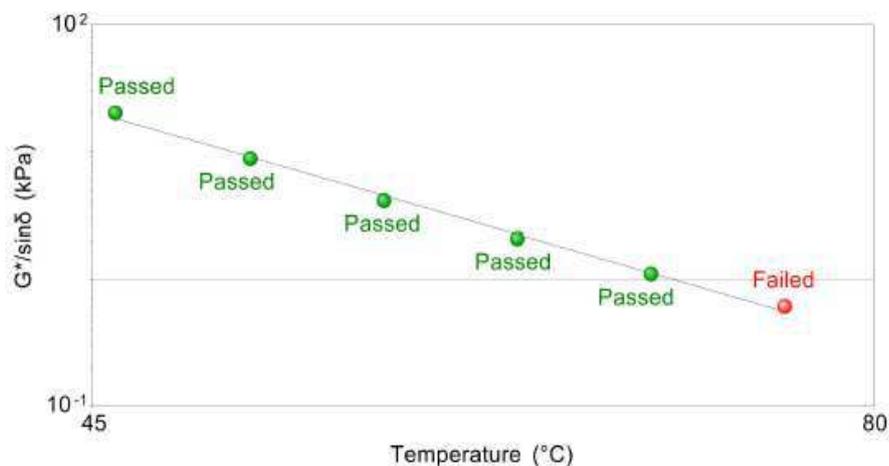


**Figura B6:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o AMP 55/75 antes do RTFOT (continuação).

DSR Report, continued

#### FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 5575  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Erika\PG\CAP 5575.tri  
 Fail Temperature: 71.0  $^{\circ}$ C



**Figura B7:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o AMP 55/75 após RTFOT.

## DSR Report

### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5575  
 Operator: DANIEL  
 Project:  
 Notes:  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Erika\PG RTFO\CAP 5575.tri  
 Time and Date: 6/14/2017 3:18:15 PM

### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
 Model:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: RTFO Residue  
 Geometry Diameter: 25.00 mm  
 Gap: 1000  $\mu$ m

### RESULTS

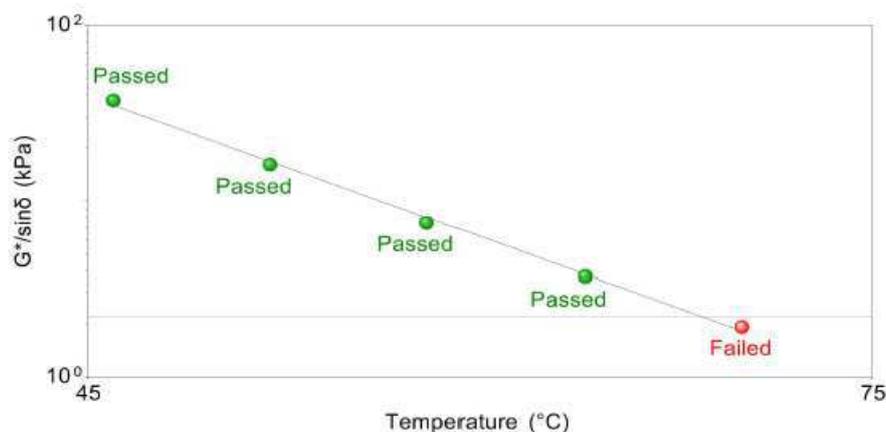
	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G' kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	3.59	10.0	72.7	35.8	37.5	Pass
2	10.0	52.0	1.53	10.0	72.4	15.4	16.1	Pass
3	10.0	58.0	0.72	10.0	72.3	7.14	7.49	Pass
4	10.0	64.0	0.35	9.9	72.5	3.56	3.73	Pass
5	10.0	70.0	0.19	10.0	73.1	1.86	1.94	Fail

**Figura B8:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o AMP 55/75 após RTFOT (continuação).

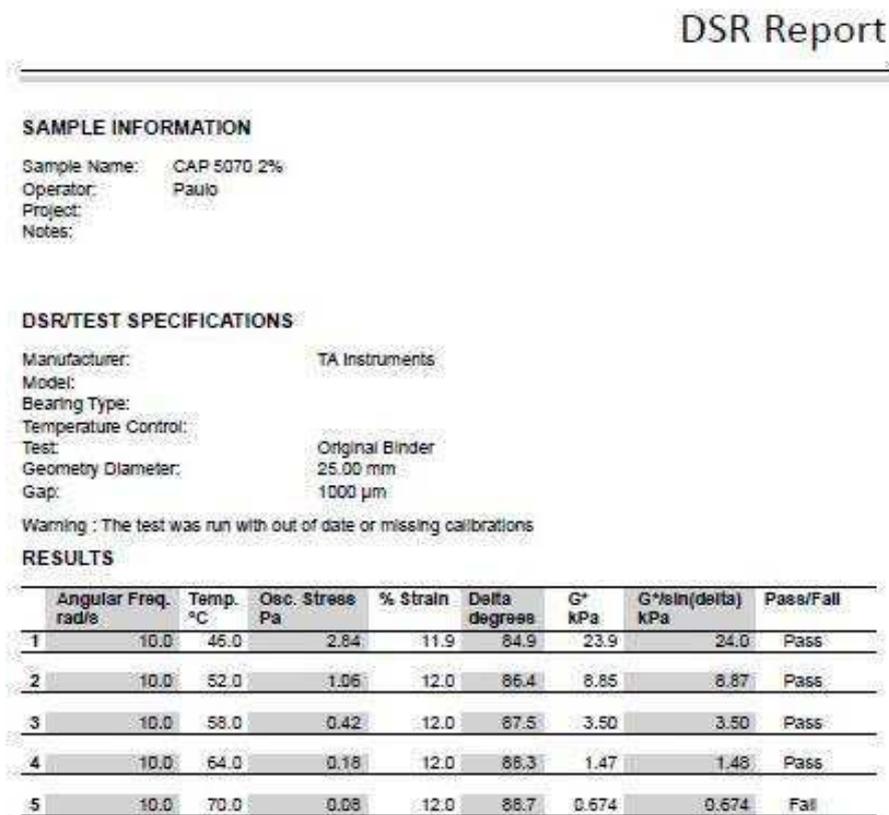
DSR Report, continued

### FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 5575  
 File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Erika\PG RTFO\CAP 5575.tri  
 Fail Temperature: 68.5 °C



**Figura B9:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 + 2% MMT antes do RTFOT.



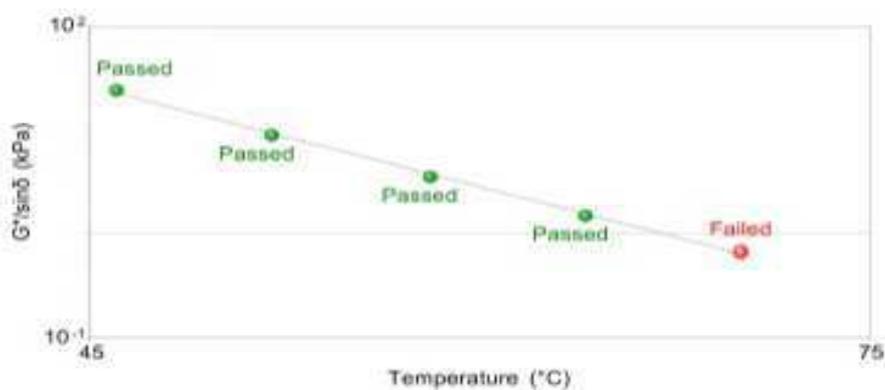
**Figura B10:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 + 2% MMT antes do RTFOT (continuação).

DSR Report, continued

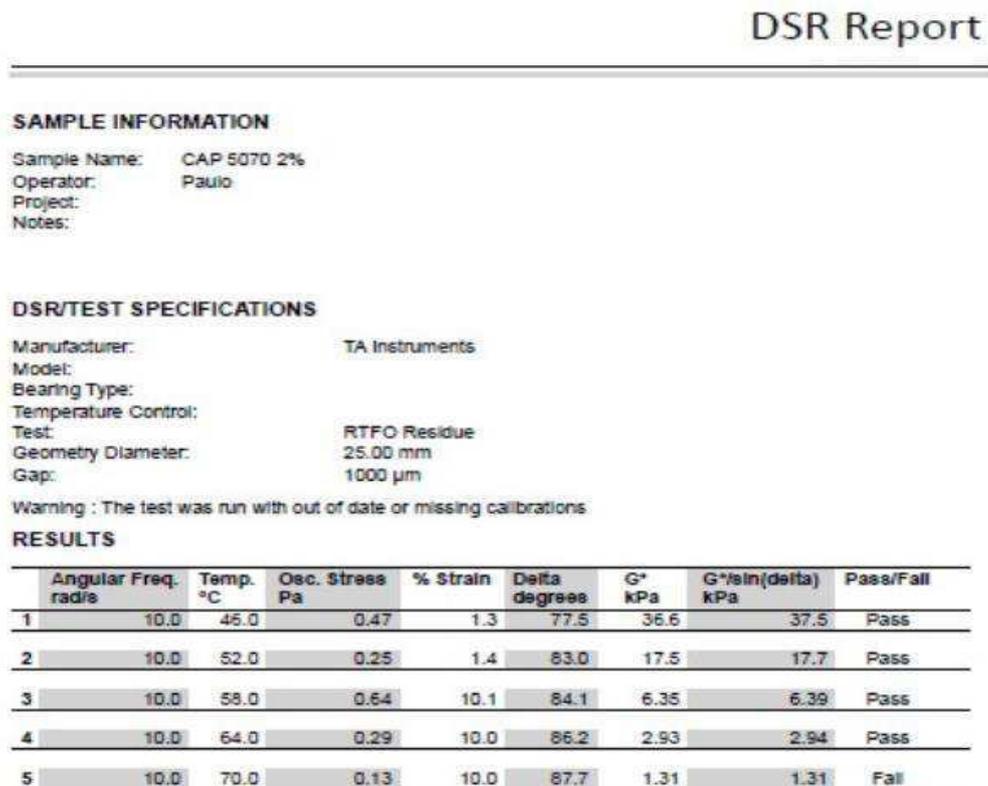
**FAIL GRAPH**

Sample Name: CAP 5070 2%

Fail Temperature: 66.9 °C



**Figura B11:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 + 2% MMT após RTFOT.



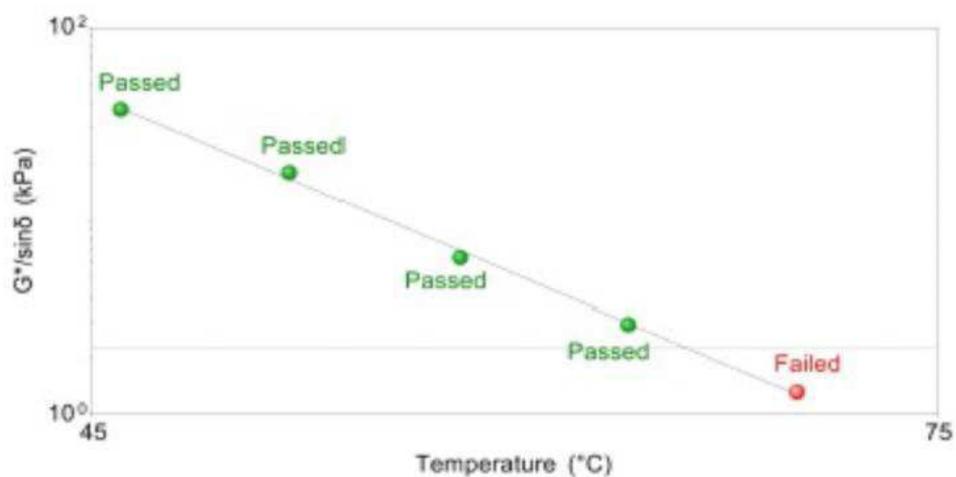
**Figura B12:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 + 2% MMT após RTFOT (continuação).

DSR Report, continued

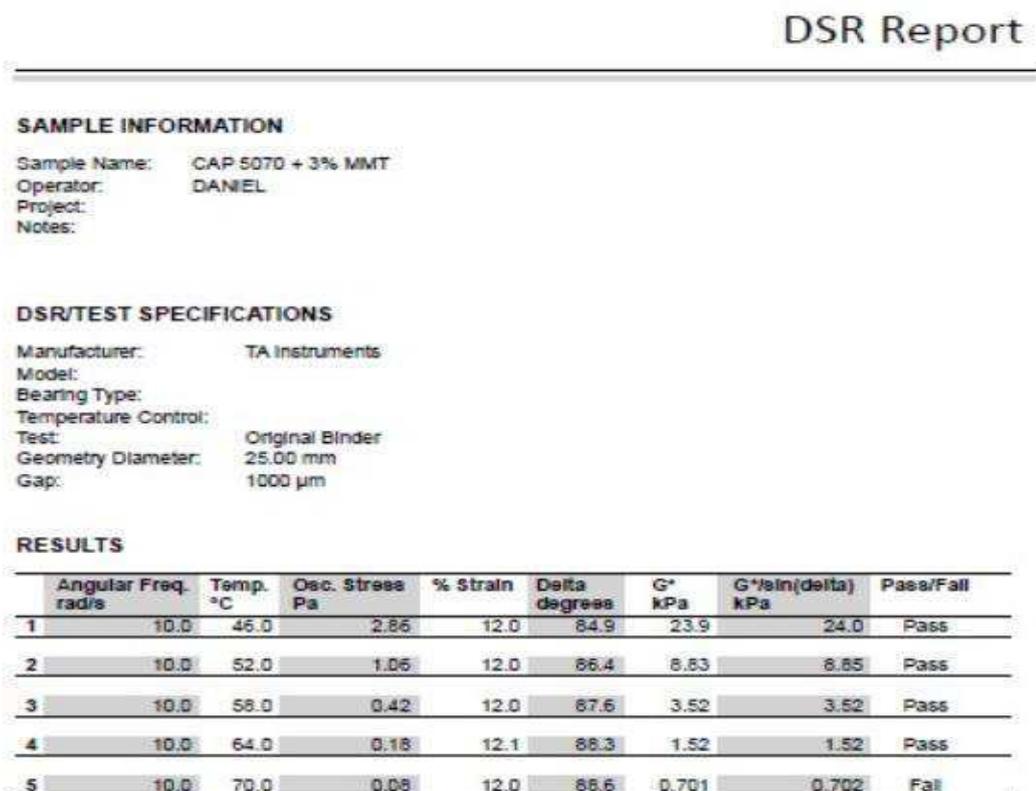
#### FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 5070 2%

Fail Temperature: 66.1  $^{\circ}$ C



**Figura B13:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 + 3% MMT antes do RTFOT.



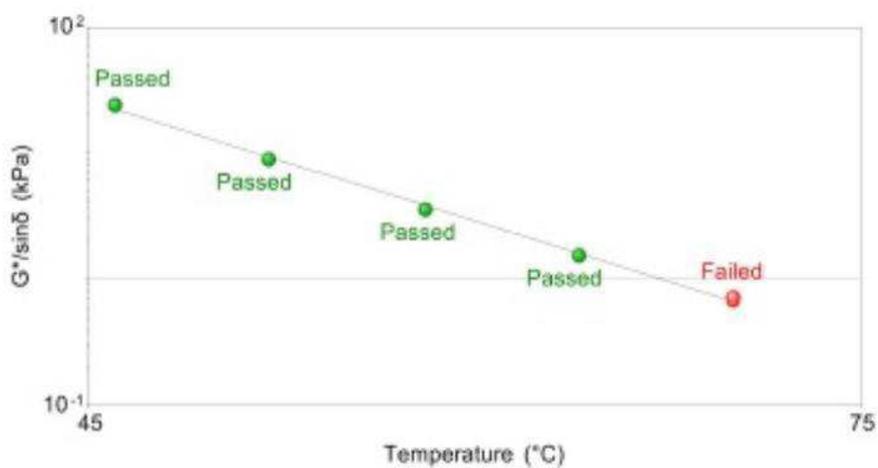
**Figura B14:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 + 3% MMT antes do RTFOT (continuação).

DSR Report, continued

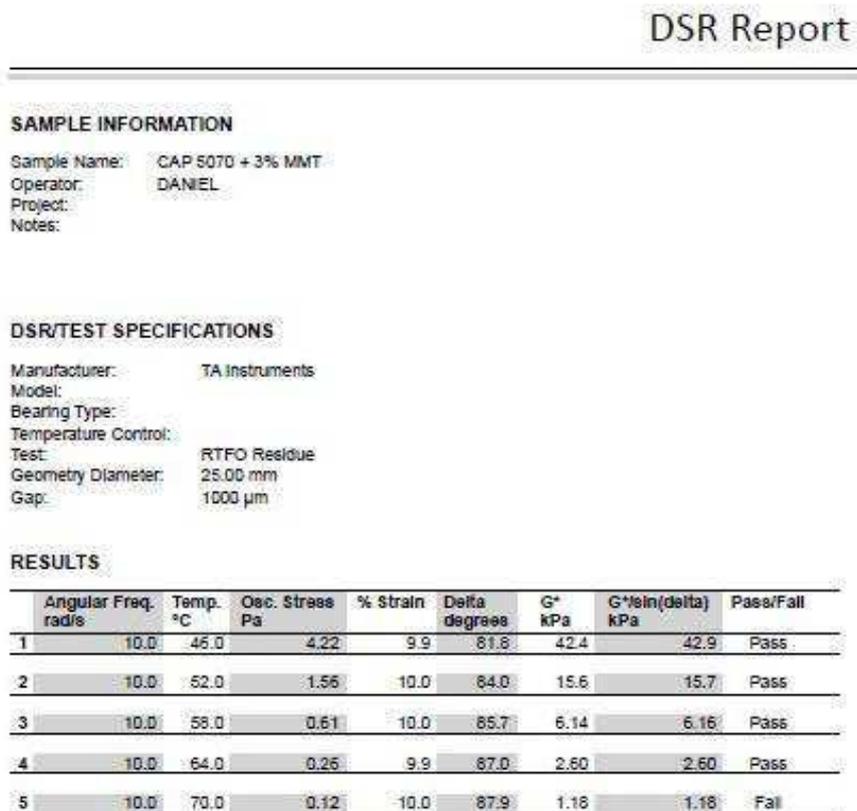
#### FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 5070 + 3% MMT

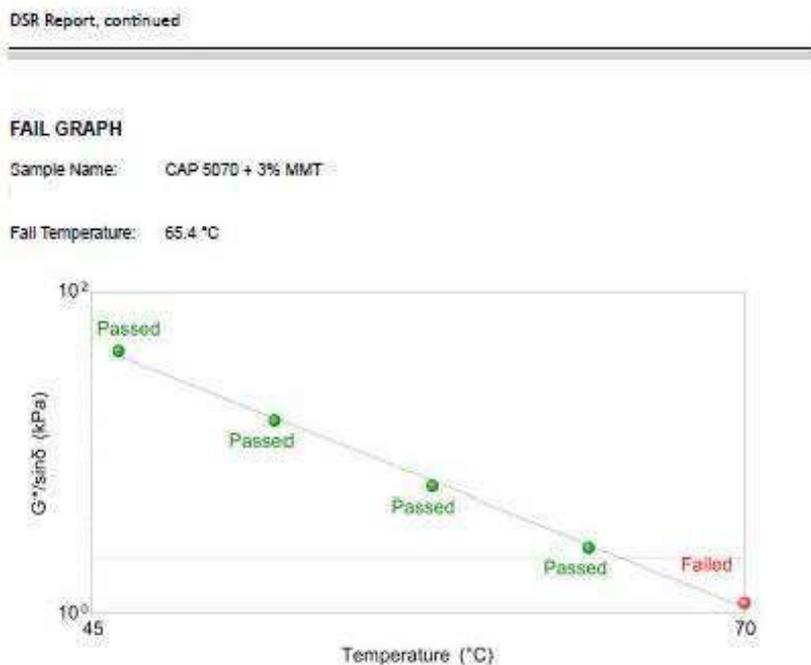
Fail Temperature: 67.1  $^{\circ}$ C



**Figura B15:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 + 3% MMT após RTFOT.



**Figura B16:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de PG para o CAP 50/70 + 3% MMT após RTFOT (continuação).



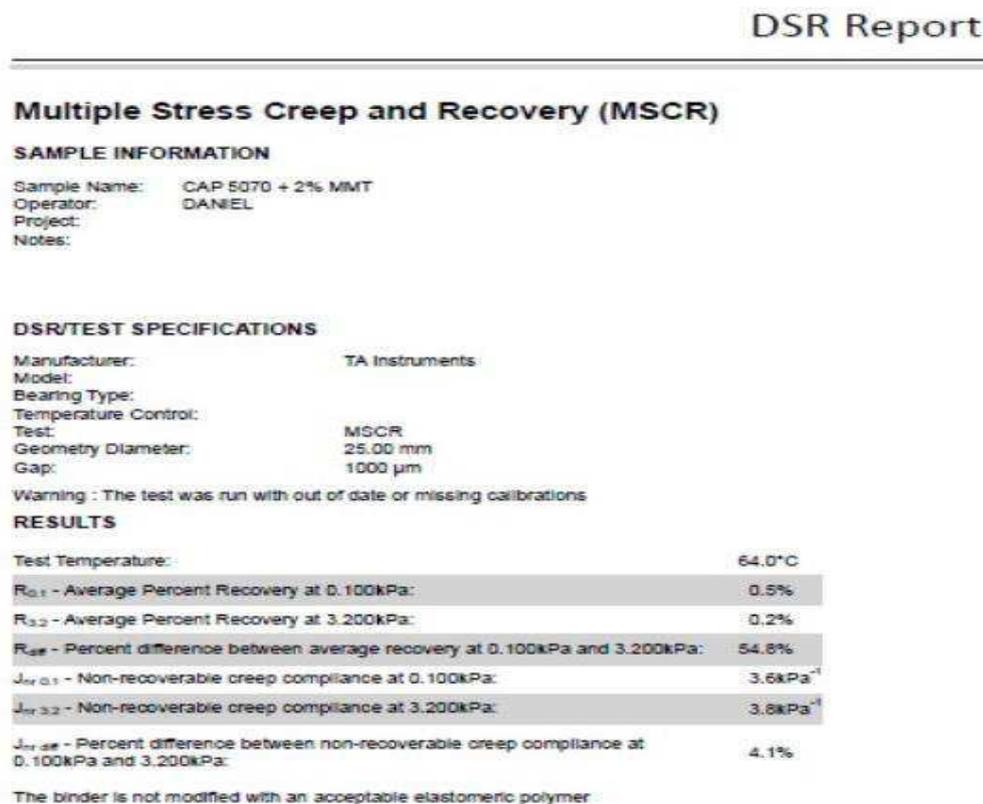
**Figura B17:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de MSCR para o CAP 50/70 puro.

<b>DSR Report</b>	
<b>Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</b>	
<b>SAMPLE INFORMATION</b>	
Sample Name:	CAP 5070
Operator:	DANIEL
Project:	
Notes:	
File Name:	C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\MSCR\CAP 5070.tri
Time and Date:	7/20/2017 1:55:00 PM
<b>DSR/TEST SPECIFICATIONS</b>	
Manufacturer:	TA Instruments
Model:	
Bearing Type:	
Temperature Control:	
Test:	MSCR
Geometry Diameter:	25.00 mm
Gap:	1000 $\mu$ m
<b>RESULTS</b>	
Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	1.8%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	1.5%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	17.8%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	1.8kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	1.8kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	3.8%
The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer	

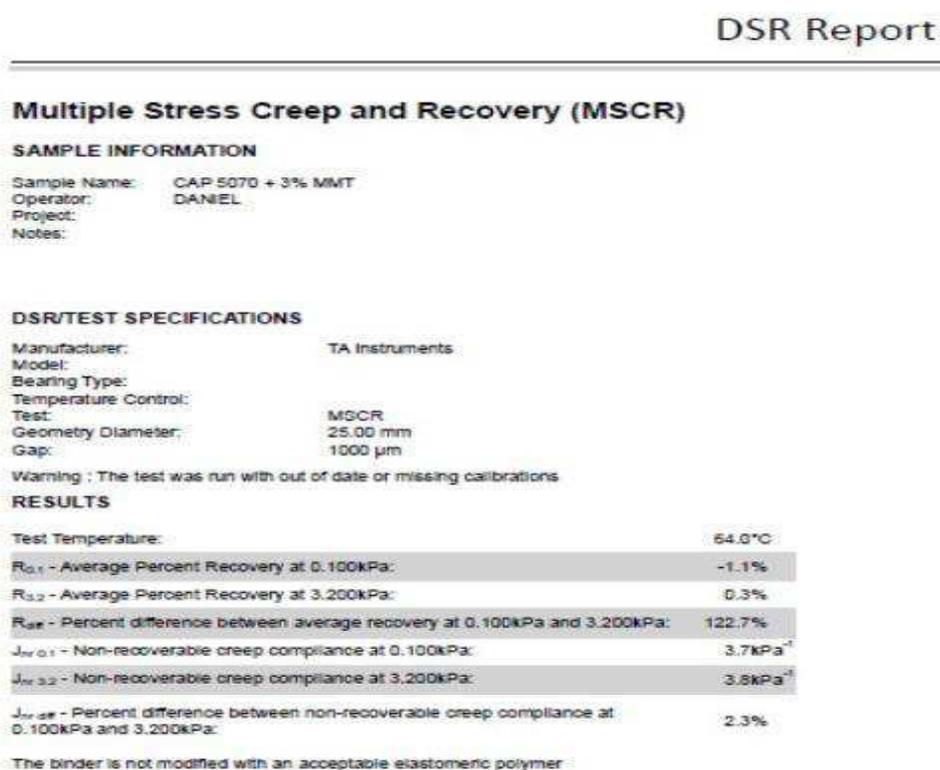
**Figura B18:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de MSCR para o AMP 55/75.

<b>DSR Report</b>	
<b>Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</b>	
<b>SAMPLE INFORMATION</b>	
Sample Name:	CAP 5575
Operator:	DANIEL
Project:	
Notes:	
File Name:	C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Erika\MSCR\CAP 5575.tri
Time and Date:	6/14/2017 7:11:18 PM
<b>DSR/TEST SPECIFICATIONS</b>	
Manufacturer:	TA Instruments
Model:	
Bearing Type:	
Temperature Control:	
Test:	MSCR
Geometry Diameter:	25.00 mm
Gap:	1000 $\mu$ m
<b>RESULTS</b>	
Test Temperature:	64.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	61.0%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	40.6%
$R_{diff}$ - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	33.5%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	0.94kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	1.6kPa <sup>-1</sup>
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	69.9%
The binder is modified with an acceptable elastomeric polymer	

**Figura B19:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de MSCR para o CAP 50/70 + 2% MMT.



**Figura B20:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de MSCR para o CAP 50/70 + 3% MMT.



**Figura B21:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de LAS para o CAP 50/70 puro.

## DSR Report

### LAS Test

#### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070  
 Operator:  
 Project:  
 Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\LAS\CAP 5070.tri  
 Time and Date: 7/25/2017 2:02:31 PM

#### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
 DSR Description:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: LAS Test  
 Geometry Diameter: 8.00 mm  
 Gap: 2000  $\mu$ m

#### RESULTS

Test Temperature: 25.0°C

Fatigue model : A 104400

Fatigue model : B 2.354

Alpha (for testing only) 1.17677

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N <sub>r</sub>
2.5	12082
5	2364
10.0	463

**Figura B22:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de LAS para o AMP 55/75.

## DSR Report

### LAS Test

#### SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5575  
 Operator:  
 Project:  
 Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Erika\LAS\CAP 5575.tri  
 Time and Date: 7/17/2017 5:23:45 PM

#### DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments  
 DSR Description:  
 Bearing Type:  
 Temperature Control:  
 Test: LAS Test  
 Geometry Diameter: 8.00 mm  
 Gap: 2000  $\mu$ m

#### RESULTS

Test Temperature: 25.0°C

Fatigue model : A 325900

Fatigue model : B 2.525

Alpha (for testing only) 1.26247

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N <sub>r</sub>
2.5	32235
5	5601
10.0	973

**Figura B23:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de LAS para o CAP 50/70 + 2% MMT.

DSR Report	
<b>LAS Test</b>	
<b>SAMPLE INFORMATION</b>	
Sample Name:	CAP 5070 + 2% MMT
Operator:	DANIEL
Project:	
Notes:	
<b>DSR/TEST SPECIFICATIONS</b>	
Manufacturer:	TA Instruments
DSR Description:	
Bearing Type:	
Temperature Control:	
Test:	LAS Test
Geometry Diameter:	8.00 mm
Gap:	2000 µm
<b>RESULTS</b>	
Test Temperature:	25.0°C
Fatigue model : A	94110
Fatigue model : B	2.381
Alpha (for testing only)	1.19055
Binder fatigue performance parameter	
Strain %	N <sub>i</sub>
2.5	10619
5	2038
10.0	391

**Figura B24:** Resultados obtidos através do DSR do ensaio de LAS para o CAP 50/70 + 3% MMT.

DSR Report	
<b>LAS Test</b>	
<b>SAMPLE INFORMATION</b>	
Sample Name:	CAP 5070 + 3% MMT
Operator:	DANIEL
Project:	
Notes:	
<b>DSR/TEST SPECIFICATIONS</b>	
Manufacturer:	TA Instruments
DSR Description:	
Bearing Type:	
Temperature Control:	
Test:	LAS Test
Geometry Diameter:	8.00 mm
Gap:	2000 µm
<b>RESULTS</b>	
Test Temperature:	25.0°C
Fatigue model : A	75610
Fatigue model : B	2.311
Alpha (for testing only)	1.15527
Binder fatigue performance parameter	
Strain %	N <sub>i</sub>
2.5	9102
5	1835
10.0	370