

**ESTUDO DAS  
PROPRIEDADES  
REOLÓGICAS DO  
CIMENTO  
ASFÁLTICO DE  
PETRÓLEO  
(CAP50/70)  
MODIFICADO COM  
POLÍMEROS  
FUNCIONALIZADOS**

**JOSÉ MANOEL  
ROSA JÚNIOR**



2021



**José Manoel Rosa Júnior**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES  
REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO  
DE PETRÓLEO (CAP50/70)  
MODIFICADO COM POLÍMEROS  
FUNCIONALIZADOS**



Pantanal Editora

2021

Copyright© Pantanal Editora  
Copyright do Texto© 2021 Os Autores  
Copyright da Edição© 2021 Pantanal Editora  
Editor Chefe: Prof. Dr. Alan Mario Zuffo  
Editores Executivos: Prof. Dr. Jorge González Aguilera  
Prof. Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diagramação: A editora

Edição de Arte: A editora. Imagens de capa e contra-capas: Canva.com

Revisão: O(s) autor(es), organizador(es) e a editora

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – OAB/PB
- Profa. Msc. Adriana Flávia Neu – Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
- Profa. Dra. Albys Ferrer Dubois – UO (Cuba)
- Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – IF SUDESTE MG
- Profa. Msc. Aris Verdecia Peña – Facultad de Medicina (Cuba)
- Profa. Arisleidis Chapman Verdecia – ISCM (Cuba)
- Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – UFESSPA
- Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo - UEA
- Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu – UNEMAT
- Prof. Dr. Carlos Nick – UFV
- Prof. Dr. Claudio Silveira Maia – AJES
- Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – UFGD
- Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva – UEMS
- Profa. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos – IFPA
- Prof. Msc. David Chacon Alvarez – UNICENTRO
- Prof. Dr. Denis Silva Nogueira – IFMT
- Profa. Dra. Denise Silva Nogueira – UFMG
- Profa. Dra. Dennyura Oliveira Galvão – URCA
- Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves – ISEPAM-FAETEC
- Prof. Me. Ernane Rosa Martins – IFG
- Prof. Dr. Fábio Steiner – UEMS
- Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza – UFF
- Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez (Colômbia)
- Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles – UNAM (Peru)
- Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira – IFRR
- Prof. Msc. Javier Revilla Armesto – UCG (México)
- Prof. Msc. João Camilo Sevilla – Mun. Rio de Janeiro
- Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales – UNMSM (Peru)
- Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski – UFMT
- Prof. Msc. Lucas R. Oliveira – Mun. de Chap. do Sul
- Profa. Dra. Keyla Christina Almeida Portela – IFPR
- Prof. Dr. Leandris Argente-Martínez – Tec-NM (México)
- Profa. Msc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan – Consultório em Santa Maria
- Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann – UFJF
- Prof. Msc. Marcos Pisarski Júnior – UEG
- Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos – FAQ
- Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla – UNAM (Peru)
- Profa. Msc. Mary Jose Almeida Pereira – SEDUC/PA
- Profa. Msc. Nila Luciana Vilhena Madureira – IFPA
- Profa. Dra. Patrícia Maurer
- Profa. Msc. Queila Pahim da Silva – IFB
- Prof. Dr. Rafael Chapman Auty – UO (Cuba)
- Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke – UFMS
- Prof. Dr. Raphael Reis da Silva – UFPI
- Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo – UEMA
- Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca – UFPI
- Prof. Msc. Wesclen Vilar Nogueira – FURG
- Profa. Dra. Yilan Fung Boix – UO (Cuba)
- Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – UFT

Conselho Técnico Científico  
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior  
- Esp. Maurício Amormino Júnior  
- Esp. Tayronne de Almeida Rodrigues  
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Ficha Catalográfica

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b> <b>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
R788e	Rosa Júnior, José Manoel. Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP50/70) modificado com polímeros fucionalizados [livro eletrônico] / José Manoel Rosa Júnior. – Nova Xavantina, MT: Pantanal, 2021. 90p.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-65-88319-65-9 DOI <a href="https://doi.org/10.46420/9786588319659">https://doi.org/10.46420/9786588319659</a>  1. Polímeros. 2. Pavimentos. 3. Reologia. I. Título.  CDD 666.95
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

O conteúdo dos e-books e capítulos, seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do(s) autor (es) e não representam necessariamente a opinião da Pantanal Editora. Os e-books e/ou capítulos foram previamente submetidos à avaliação pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação. O download e o compartilhamento das obras são permitidos desde que sejam citadas devidamente, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais, exceto se houver autorização por escrito dos autores de cada capítulo ou e-book com a anuência dos editores da Pantanal Editora.



**Pantanal Editora**

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000. Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.  
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).  
<https://www.editorapantanal.com.br>  
[contato@editorapantanal.com.br](mailto:contato@editorapantanal.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A pavimentação, que pode ser vista como uma subárea da engenharia civil, tem a responsabilidade de atender, por intermédio de projetos e da execução de pavimentos flexíveis e rígidos, a demanda de mobilidade dos centros urbanos. Sendo que, a qualidade desses pavimentos depende, entre outros fatores, diretamente da qualidade, ou seja, das propriedades dos materiais que os constituem.

Assim, sendo o cimento asfáltico de petróleo (CAP50/70) um dos materiais, comumente, utilizado na camada de revestimento dos pavimentos flexíveis, o e-book “**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP50/70) MODIFICADO COM POLÍMEROS FUNCIONALIZADOS**”, que tem origem da dissertação de mestrado desenvolvida no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande, aborda as modificações ocorridas nas propriedades desse material pós adição de polímeros funcionalizados.

Em relação ao seu objetivo, ao publicar esse trabalho, o autor define duas vertentes: a primeira; é voltada aos profissionais de engenharia e áreas afins, e, visa, não só apresentá-los o material modificado, como também fomentar a inserção do fruto do trabalho acadêmico na prática da engenharia; e a segunda; voltada aos demais leitores, tensiona melhorar a compreensão desses através da retificação da ideia retrógrada, implantada na sociedade, que resume a engenharia a tradicional prática da execução, omitindo, assim, o brilhantismo da fase que antecede a execução, e que qualifica a engenharia como ciência investigativa.

## SUMÁRIO

<b>Apresentação</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
1.1 Objetivos .....	8
1.2 Objetivo Geral.....	8
1.3 Objetivos Específicos.....	8
1.4 Estrutura da Dissertação.....	9
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>10</b>
1.5 Introdução .....	10
1.6 Química do Cimento Asfáltico .....	12
1.7 Principais Funções do Cimento Asfáltico na Pavimentação.....	14
1.8 Modificadores de Cimentos Asfálticos.....	16
2.4.1 <i>Cimento Asfáltico Modificado com Polímeros (AMP)</i> .....	16
3.2.1 <i>Polímeros do tipo RET</i> .....	18
2.4.2 <i>Ácido Polifosfórico (PPA 116%)</i> .....	20
1.9 Reologia dos Cimentos Asfálticos.....	21
2.5.1 <i>Procedimentos/Equipamentos utilizados no estudo das propriedades reológicas do Cimento Asfáltico</i> .....	23
2.5.2 <i>Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (MSCR)</i> .....	28
2.5.3 <i>Curva Mestre</i> .....	32
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
1.10 Materiais.....	34
3.1.1 <i>Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e Aditivos</i> .....	34
3.1.2 <i>Preparação dos CAPs Modificados</i> .....	35
1.11 Métodos.....	36
3.2.7 <i>Ensaio de estabilidade à estocagem (NBR 15166/2004)</i> .....	37
3.2.8 <i>Ensaio de Penetração (DNIT-ME 155/2010)</i> .....	37
3.2.9 <i>Procedimento de envelhecimento à curto prazo RTFO (NBR 15235)</i> .....	39
3.2.10 <i>Ponto de Amolecimento (DNIT-ME 131/2010)</i> .....	39
3.2.11 <i>Índice de susceptibilidade térmica (DNIT-ME/2010)</i> .....	40
3.2.12 <i>Recuperação Elástica (DNIT-ME 130/2010)</i> .....	40
3.2.13 <i>Viscosidade Rotacional (NBR 15184/07)</i> .....	41
3.2.14 <i>Ensaio de Ductilidade (DNIT-ME 163/98)</i> .....	43

<i>3.2.15 Ensaio reológico no Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)</i> .....	43
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	46
1.12 Ensaio de estabilidade à estocagem .....	46
1.13 Procedimento de Envelhecimento à Curto Prazo.....	47
1.14 Ensaio de Penetração .....	48
1.15 Ensaio de Viscosidade Rotacional .....	51
1.16 Ensaio de Ponto de Amolecimento (Método do anel e bola) .....	54
<i>3.2.164.5.1 Avaliação do Índice de Susceptibilidade Térmica</i> .....	56
1.17 Ensaio de Recuperação Elástica .....	58
1.18 Ensaio de Ductilidade .....	60
1.19 Ensaio Reológico no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).....	61
<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	82
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	84
<b>Índice Remissivo</b> .....	88
<b>Sobre o autor</b> .....	90

## INTRODUÇÃO

---

As rodovias constituem um dos principais sistemas de transporte utilizados para o deslocamento de pessoas e bens. Entretanto, nas últimas décadas, o aumento do volume de tráfego, das cargas transportadas por eixo e da pressão dos pneus, tem ocasionado a degradação prematura dos revestimentos asfálticos constituídos com cimentos asfálticos convencionais, tendo como consequência elevados custos de restauração e de manutenção.

Essas degradações ocorrem principalmente na forma de severas deformações permanentes e na formação de trincas por fadiga. A formação de trilhas de rodas comumente leva a perda da regularidade e serventia dos pavimentos e resulta na deformação permanente causada pela deformação plástica do revestimento sob cargas cíclicas, problema que se acentua em temperaturas de serviço mais elevadas. Fissuras por fadiga normalmente causam danos severos a estrutura do pavimento e as fissuras térmicas, perpendiculares a ação do tráfego, ocorrem pela exposição do pavimento à baixas temperaturas (Fernandes, 2009).

Com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte, relacionados a estes defeitos, foram iniciados diversos estudos nos materiais que compõem a capa asfáltica, cimentos asfálticos de petróleo (CAP) e materiais pétreos. No tocante ao CAP, diversos modificadores são utilizados buscando um aperfeiçoamento das suas propriedades reológicas e mecânicas, em relação ao CAP convencional, e entre os diversos modificadores estudados, os polímeros vêm se apresentando como uma excelente alternativa (Sobreiro, 2014).

Specht (2004) evidencia que, a principal razão de se combinar CAP com polímeros é prevenir a degradação prematura do revestimento e, desta forma, estender sua vida útil. De acordo com esse autor, a adição dos polímeros promove a redução na susceptibilidade térmica e aumento da ductilidade do CAP e recuperação elástica, levando a uma maior resistência à deformação plástica e elástica sob temperaturas elevadas e suprimindo o aparecimento de fissuras de retração térmica e por fadiga prematura.

Atualmente no Brasil, para fins de pavimentação de revestimentos asfálticos, os polímeros mais utilizados na modificação de asfaltos são: os copolímeros em bloco de estireno-butadieno-estireno (SBS), o copolímero de estireno-butadieno (SBR), o copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA), o polietileno e os polímeros do tipo RET (Negrão, 2006).

Além dos polímeros, o ácido polifosfórico, também, vem sendo bastante utilizado como agente “catalizador” entre polímeros os CAP. Leite et al. (2004) comentam que o ácido

polifosfórico pode ser adicionado sozinho ao CAP ou juntamente com outros modificadores, e as melhoras nas propriedades do asfalto são resultantes da mudança química proporcionada pelo ácido.

Os CAPs modificados serão submetidos a tensões estáticas e dinâmicas, à variações de temperatura e a condições ambientais diversas. Portanto, torna-se essencial à compreensão das propriedades reológicas desses materiais; a diferentes taxas de cisalhamento, temperaturas e frequência, pois estas podem ter influência significativa no comportamento mecânico da mistura CAP/agregado, e na mistura durante a compactação e em serviço.

Nesse contexto, neste trabalho procurar-se-á estudar as propriedades reológicas de um CAP Modificado com, um Polímero Reativo (RET – Terpolímero Elastomérico Reativo), com o ácido polifosfórico (PPA - 116%) e com o polietileno de baixa densidade (PEBD). Ressalta-se, ainda, que as propriedades reológicas do cimento asfáltico serão analisadas a partir de resultados a serem obtidos com o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DHR - Discovery Hybrid Rheometer), e com auxílio deste, serão mensurados e calculados os parâmetros reológicos inerentes as condições e desempenho do CAP em campo.

## ***1.1 Objetivos***

### ***1.2 Objetivo Geral***

Estudos das propriedades reológicas de um CAP (CAP 50/70) com a adição associada de um Terpolímero de Etileno, Acrilato de Metila e Metacrilato de Glícidila (EMA-GMA), de um Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e um ácido polifosfórico visando estabelecer as proporções destes aditivos que melhor se adéquem ao comportamento reológico do CAP modificado.

### ***1.3 Objetivos Específicos***

- Estudos das propriedades reológicas a partir de ensaios convencionais e especiais de um CAP puro (CAP 50/70) e modificado;
- Mensurar as propriedades reológicas para diferentes proporções de aditivos;
- Estudar o efeito da adição dos aditivos nas propriedades reológicas de um CAP puro e modificado sob o efeito do envelhecimento a curto prazo (RTFO).

## ***1.4 Estrutura da Dissertação***

Esta Dissertação é composta de seis capítulos, a seguir é apresentada uma breve descrição dos assuntos abordados em cada um deles.

Capítulo 1 – Composto de introdução, objetivos e organização do trabalho.

Capítulo 2 – Compreende a fundamentação teórica, onde foram abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: Química do asfalto, Principais funções do asfalto na pavimentação, Modificadores de asfalto, Reologia dos asfaltos e Principais procedimentos e equipamentos utilizados no estudo das propriedades reológicas do asfalto.

Capítulo 3 – Consiste nos procedimentos e/ou métodos experimentais, onde foram descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o alcance dos objetivos da pesquisa.

Capítulo 4 – São discutidos e analisados os resultados obtidos durante a fase experimental.

Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões com as sugestões para pesquisas futuras.

Capítulo 6 – São apresentadas as referências bibliográficas.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

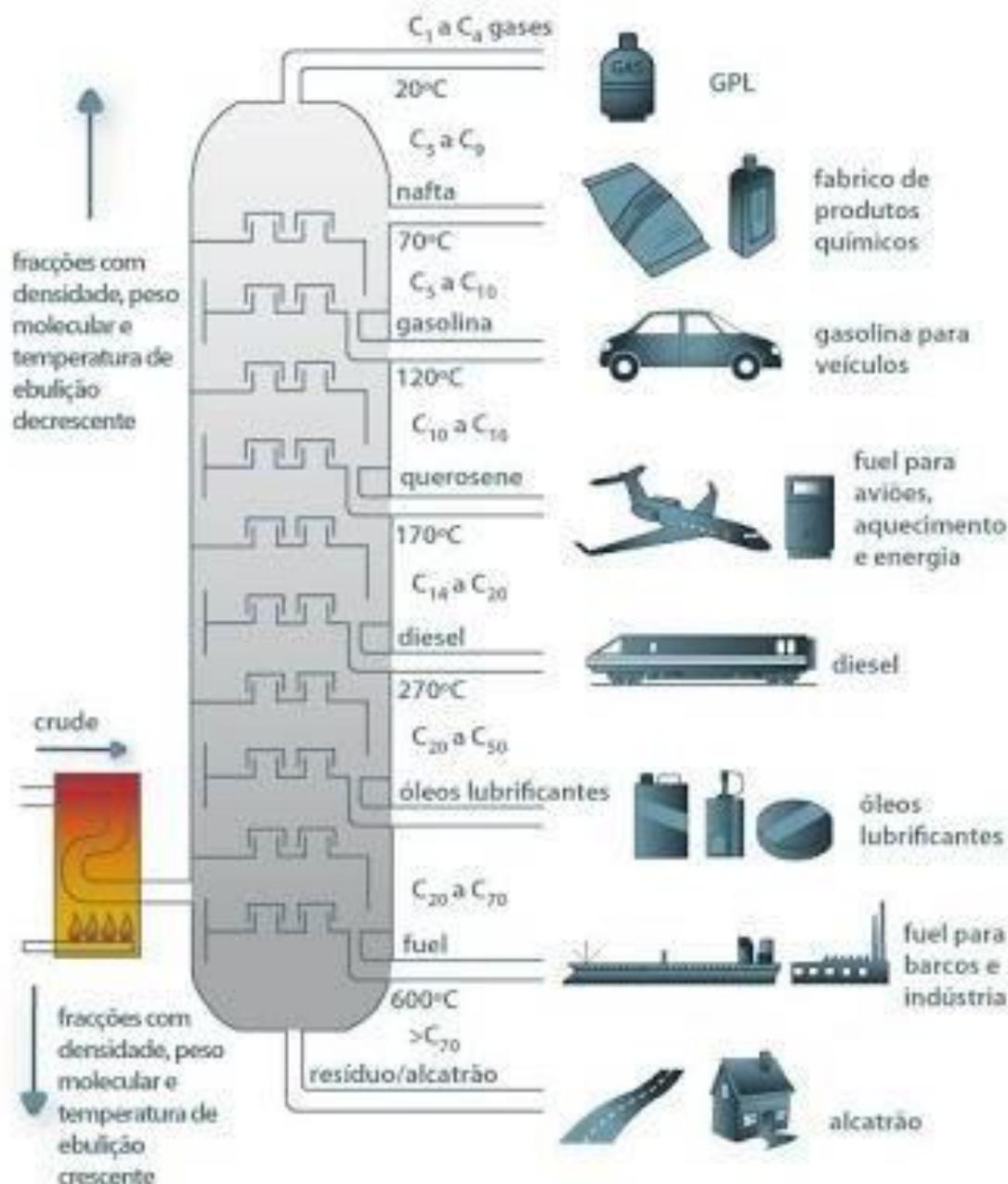
---

### *1.5 Introdução*

O Cimento asfáltico de petróleo (CAP) é um material de consistência variável, de cor pardo- escura ou negra, constituído de misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular e pode ser obtido em jazidas naturais ou pela destilação do petróleo (Negrão, 2006).

Os asfaltos naturais podem aparecer impregnados nos poros de algumas rochas, formando as denominadas rochas asfálticas (gilsonitas); podem ocorrer em depressões da crosta, constituindo os lagos de asfaltos e encontrar-se, também, misturados com impurezas minerais (areis e argilas) em quantidades variáveis, os quais são submetidos a processos de purificação para serem utilizados na pavimentação (Amaral, 2000).

O asfalto obtido pelo processamento do petróleo bruto (Figura 2.1), também dito cru, constitui-se do produto final da destilação do petróleo, no qual as frações mais leves (gasolina, querosene e diesel) são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação (Negrão, 2006).



**Figura 2.1.** Estrutura do refino do Petróleo. Fonte: <https://diariodopresal.wordpress.com/o-que-e-o-pre-sal/>.

Segundo Gusmão (2009) esse processo de refino depende do tipo de petróleo e do rendimento em asfalto que ele representa, podendo-se empregar distintos processos nas unidades refinadoras.

Se o rendimento em asfalto for alto (cru de base naftênica), basta, no processo de refinação, a destilação à vácuo do resíduo que irá remover frações de alto ponto de ebulição possibilitando a obtenção do asfalto de destilação direta. Se o rendimento em asfalto for médio

(cru de base intermediária), o processo é de destilação em dois estágios: pressão atmosférica e a vácuo. Se o rendimento em asfalto for baixo (petróleos leves), além da destilação em dois estágios, inclui-se o processo de “desasfaltação”, no qual a extração de componentes com volatilidade baixa pode ser feita por solvente.

Entre os processos apresentados o mais utilizado para obtenção dos asfaltos brasileiros é o da destilação em duas etapas, pois além desses asfaltos apresentarem teores de resíduo asfáltico baixos, esse processo produz asfalto normalmente sem a necessidade de instalações especiais e consiste basicamente de uma separação física dos vários constituintes do petróleo, pela diferença entre seus pontos de ebulição e de condensação (Fernandes, 2009).

## **1.6 Química do Cimento Asfáltico**

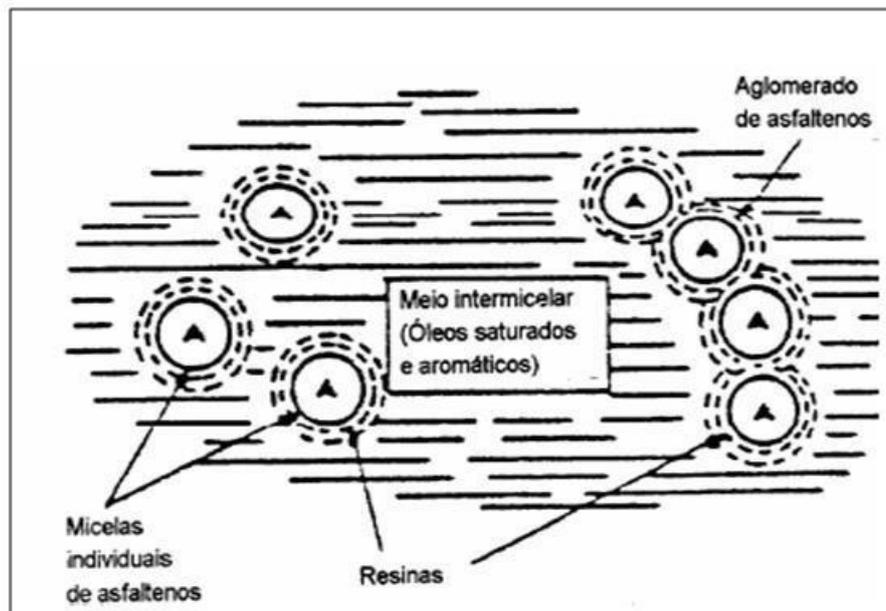
A composição química do asfalto é bastante complexa, podendo variar com a fonte de petróleo, com as modificações induzidas nos processos de refino, durante o envelhecimento na usinagem e em serviço (Bernucci, 2007).

Segundo o DNIT (1998), quimicamente o asfalto é definido como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de resinas, óleos aromáticos e saturados, chamados maltenos.

Os asfaltenos são materiais complexos de peso molecular elevado e constituem de 5 a 25% do teor do CAP. O teor de asfaltenos influencia diretamente nas características reológicas do CAP, ou seja, quanto maior o percentual de asfaltenos maior a viscosidade, a consistência do CAP, e conseqüentemente, valores de penetração mais baixos e ponto de amolecimento maior. Quanto à fase maltênica: os saturados constituem de 5% a 20% do CAP, são cadeias lineares e ramificadas de hidrocarbonetos, possuem peso molecular igual aos aromáticos e possuem influência negativa na susceptibilidade térmica; as resinas são compostas de pequenas quantidades de hidrogênio, enxofre, nitrogênio e contribuem para a melhoria na ductilidade e dispersão dos asfaltenos; os aromáticos são os compostos que apresentam menor peso molecular, constituem cerca de 40% a 65% do total do CAP, sendo o meio de dispersão e peptização dos asfaltenos. (Bernucci, 2007; Negrão, 2006).

Fernandes (2009) ressalta que, para a definição da microestrutura do asfalto existem dois modelos propostos e bastante difundidos: o Modelo de Yen que considera o asfalto como uma dispersão coloidal dos asfaltenos, estabilizados pelas resinas em meio composto pela fração de saturados e aromáticos (Figura 2.2), e o Modelo estrutural do Programa de Pesquisa de Rodovias - Strategic Highway Research Program (SHRP) – esse não considera válido o conceito de

asfaltenos e maltenos, classificando as frações asfálticas em polares e não polares. Este modelo propõe que as forças intra e intermoleculares são responsáveis pela formação de redes tridimensionais que resultam em características elásticas ou viscosas, uma vez que, com aumento da temperatura ou ação de forças cisalhantes ocorre destruição destas interações e consequentemente redução da elasticidade e aumento de suas características viscosas.



**Figura 2.2.** Microestrutura do asfalto: Modelo de Yen. Fonte: Fernandes, (2009).

Segundo Júnior (2004) durante o processo de envelhecimento do asfalto ocorrem mudanças em sua estrutura química. Tais mudanças se caracterizam pela diminuição do teor de aromáticos que se transformam em resina, que por sua vez, parte se transforma em asfaltenos. Ao final do processo, o balanço é o seguinte: pequena ou nenhuma variação do teor de saturados e resinas, diminuição do teor de aromáticos e aumento do teor de asfaltenos.

Pinto (2014) evidencia que a composição química do asfalto não influencia apenas no comportamento físico e mecânico das misturas asfálticas, mas também no processo de incorporação de agentes modificadores.

## ***1.7 Principais Funções do Cimento Asfáltico na Pavimentação***

Quando em serviços de pavimentação, o CAP pode ser utilizado com diferentes combinações de esqueleto mineral. Dessa forma, este tem que apresentar-se com uma consistência adequada, ou seja, suficientemente fluído para facilitar a mistura com agregados, e posterior, lançamento e compactação. Em contrapartida, após a compactação, esse deve ter consistência suficiente para resistir às cargas do tráfego e as variações climáticas (Iten, 2011).

De acordo com Azevedo et al. (2009) entre as funções do CAP na pavimentação, as principais são:

- aglutinante: promove a ligação entre os agregados possibilitando que a mistura asfáltica resista à ação mecânica de desagregação, produzida pelas cargas dos veículos;
- impermeabilização: garante ao revestimento vedação eficaz contra a ação da água, proveniente das chuvas, evitando danos ao pavimento;
- flexibilidade: promove ao pavimento uma maior resistência à deformação permanente.

Ainda conforme Azevedo et al. (2009) nenhum outro material atende melhor que o asfalto a realização econômica e simultânea dessas funções. Contudo, esses autores destacam também que, apesar do CAP ser o principal material utilizado na construção de rodovias e vias urbanas, ele apresenta algumas limitações, tais como: em determinadas misturas a presença de umidade na interfase agregado/CAP leva à perda de material pétreo; à resistência à tração do asfalto diminui à medida que o mesmo é flexionado, ou seja, o asfalto perde sua resistência mecânica quando o pavimento sofre deflexões; em baixas temperaturas, se torna rígido e quebradiço, sujeito à trincas, enquanto que em altas temperaturas, amolece e flui, causando deformações permanentes; e ainda apresenta uma tendência ao envelhecimento (oxidativo).

Assim, buscando garantir a qualidade do asfalto utilizado em revestimentos asfáltico, surgiram às especificações, essas tendo como objetivos definir parâmetros para a produção e utilização desse material, mais precisamente definir faixas de aceitação baseadas em ensaios físicos, químicos e mecânicos segundo normas determinadas.

Os asfaltos, comercializados no Brasil, devem então atender às especificações estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), instituída pela resolução normativa N. 19, de 11 de julho de 2005, que classifica os asfaltos brasileiros, denominado de CAP, pelos valores de penetração, os quais devem atender as especificações listadas no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1.** Especificação brasileira (Resolução n. 19 da ANP, 11/07/2005) para cimento asfáltico de petróleo – CAP.

CARACTERÍSTICAS UNID.		LIMITES			
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200
Penetração(100g,5s,25 <sup>0</sup> C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200
Ponto de amolecimento em, mín	<sup>0</sup> C	52	46	43	37
Viscosidade Saybolt-Furol					
-a 135 <sup>0</sup> C, mín		192	141	110	80
-a 155 <sup>0</sup> C, mín	S	90	50	43	36
-a 177 <sup>0</sup> C, mín		40 – 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60
Viscosidade Brookfield					
-a 135 <sup>0</sup> C,SP 21 mín, 20 rpm	cP	374	274	214	155
-a 150 <sup>0</sup> C,SP 21 mín		203	112	97	81
-a 177 <sup>0</sup> C,SP 21 mín		76 – 285	57 – 285	28 - 114	28 - 114
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5) a (+ 0,7)	(-1,5) a (+ 0,7)	(-1,5 a (+ 0,7)	(-1,5) a (+ 0,7)
Ponto de fulgor mín	<sup>0</sup> C	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductilidade a 25 C, mín	Cm	60	60	100	100
EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163					
<sup>0</sup> C , 85 mín					
Varição em massa, máx	%	0,5	0,5	0,5	0,5
Ductilidade a 25 C, mín	Cm	10	20	50	50
Aumento do ponto de amolecimento, máx	<sup>0</sup> C	8	8	8	8
Penetração retida, mín*	%	60	55	55	50

(\*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFO e a penetração antes do ensaio. Fonte: Adaptada da ANP (2013).

## **1.8 Modificadores de Cimentos Asfálticos**

O uso de modificadores para melhorar as propriedades reológicas de um CAP e conseqüentemente de misturas asfálticas tem aumentado a cada ano. Os modificadores são adicionados visando melhorar o comportamento mecânico e conseqüentemente o desempenho funcional dos pavimentos, aumentando a resistência ao acúmulo de deformações permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento prematuro do CAP e melhorando a interação entre o este e os agregados (adesividade).

### **2.4.1 Cimento Asfáltico Modificado com Polímeros (AMP)**

Segundo Oda (2000), os polímeros podem ser definidos como sendo substâncias macromoleculares que podem ser produzidas pela natureza (madeira, óleo lubrificante, cortiça etc.) ou podem ser obtidas artificialmente pela união sequenciada de pequenas moléculas, chamadas monômeros. Ainda de acordo essa autora, a utilização de polímeros visando melhorar as propriedades dos asfaltos não é uma técnica recente, consta que aplicações práticas de asfaltos modificados com polímeros tiveram início em 1901, quando a *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França, sendo no ano de 1902 construído o primeiro pavimento com CAP modificado por borracha.

De acordo com Negrão (2005), nem todos os polímeros podem ser adicionados ao asfalto, assim, os que apresentam melhor compatibilização com os asfaltos podem ser classificados nas seguintes categorias:

- termorrígidos: são aqueles que não se fundem, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Por exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- termoplásticos: são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. São incorporados aos asfaltos a alta temperatura, com o objetivo de melhorar a rigidez e reduzir as deformações permanentes. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;
- elastômeros: são aqueles que, quando aquecidos, se decompõem antes de amolecer, e conferem boas propriedades elásticas ao CAP modificado. Por exemplo: SBR;

- elastômeros termoplásticos: são aqueles que, a baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém quando a temperatura aumenta passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS e RET.

Zhu et al. (2014) ressaltam que a adição de polímeros ao CAP de petróleo pode ter, além das vantagens, várias limitações. As principais limitações são: o alto custo, a alta sensibilidade à temperatura de alguns polímeros modificadores, baixa resistência ao envelhecimento, problemas de separação de fase durante o armazenamento (estocagem) que geralmente são ocasionados por falta de compatibilidade entre o polímero e o CAP e, ainda, melhoria limitada da elasticidade à baixas temperaturas.

Outra limitação da adição de polímeros ao asfalto está diretamente relacionada à quantidade de polímeros a adicionar, pois os polímeros tendem a promover o aumento da viscosidade do CAP e apesar do efeito positivo esse aumento de viscosidade poderá comprometer a trabalhabilidade da mistura, tornando o processo construtivo mais complexo. Uma das alternativas para tentar solucionar o problema é adicionar aditivos que melhorem o manuseio do material, atuando na viscosidade do CAP (Sobreiro, 2014).

No tocante as vantagens do CAP modificado com polímeros, Gusmão (2009) descreve que essas vantagens podem ser vistas e agrupadas da seguinte forma:

- em relação às misturas asfálticas densas: maior resistência a ocorrência de deformações permanentes, aumento da vida de fadiga, redução da espessura da camada do pavimento, melhor coesão e adesão frente à ação da água e do tráfego;
- em relação as camadas drenantes: melhor resistência à ação da água e ao arrancamento do agregado por ação do tráfego; aumento da capacidade de drenagem superficial do pavimento;
- em camadas de absorção de tensões: manutenção das propriedades elásticas sob maior faixa de temperatura, que o asfalto convencional; minimização da reflexão de trincas do pavimento antigo para o novo, aumento da ligação entre as camadas asfálticas e maior absorção das tensões, permitindo ao projetista diminuir a espessura das camadas asfálticas.

De Cezaro Júnior (2008) fez um estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas elaboradas com CAPs convencionais e modificadas com borracha moída de pneus

e com polímero SBS e ressalta que as misturas elaboradas a partir de CAPs modificados apresentaram melhor comportamento mecânico à fadiga e melhor resistência a deformações permanentes.

Gama (2013) avalia o uso do Etileno Acetato de Vinila (EVA) em misturas asfálticas e em seus resultados ressalta que, além do aumento na viscosidade do CAP, nos ensaios de Tração e Módulo Resiliência, todas as misturas asfálticas que utilizaram o EVA em sua composição atenderam aos critérios de resistência do DNIT para uso na pavimentação.

Amaral (2000) relata que o sucesso da incorporação de polímeros ao CAP de petróleo depende das características do asfalto usado, do tipo e quantidade de polímeros, bem como do processo usado na preparação desses asfaltos modificados.

Já segundo Bernucci (2007), para a mistura do asfalto com polímeros ser viável, do ponto de vista técnico e econômico, faz-se necessário que o produto final dessa, o asfalto-polímero, mantenha suas propriedades durante a estocagem, aplicação e em serviço. Sendo o mesmo, processado por equipamentos convencionais e podendo ser aplicado com uma temperatura não muito diferenciada.

### **3.1.1 Polímeros do tipo RET**

Apesar de grandes avanços no campo da modificação do CAP com a adição de polímeros, como já citado, essas modificações podem ocasionar também algumas desvantagens, que limitam a utilização de polímeros como modificadores. Assim, buscando superar essas limitações algumas técnicas foram desenvolvidas, incluindo, entre elas, o desenvolvimento do polímero RET (Terpolímero Elastomérico Reativo) (Zhu et al., 2014).

Segundo Polacco et al., (2004), o RET é um “Terpolímero”, ou seja, é um polímero formado por três monômeros diferentes, sendo eles um bloco de Etileno, o n-Butil Acrilato e o Glicidil Metacrilato. A adição do polímero RET ao CAP resulta em um produto final inseparável e quimicamente estável, pois por ser reativo, esse polímero reage quimicamente com os asfaltenos do asfalto, formando uma estrutura única.

Negrão et. al. (2005) destacaram um breve histórico sobre o polímero do tipo RET, de acordo com esses, o desenvolvimento do polímero do tipo RET se deu a partir de 1988, a partir da necessidade de se desenvolver um novo polímero modificador de asfalto que pudesse ser facilmente incorporado, resultando em um produto fácil de trabalhar, cujas propriedades visco-elásticas seriam similares a de asfaltos modificados com outros polímeros já utilizados, como os

Copolímeros de Estireno Butadieno. Em 1989 foi desenvolvido o primeiro polímero RET de reação lenta, em 1991 foi iniciada a pavimentação de um trecho experimental nos EUA e a partir de 1994 até os dias de hoje foram desenvolvidos vários tipos de polímeros RET.

De acordo com Negrão (2006), a adição de polímeros RET ao CAP tem o objetivo de aperfeiçoar as propriedades do CAP, tais como:

- diminui a Susceptibilidade Térmica: ou seja, em clima frio, o aumento da flexibilidade diminui o aparecimento de fissuras no revestimento; já em clima quente, o aumento da viscosidade reduz a tendência à exsudação e deformação permanente;
- melhora a coesão e a adesividade: aumentando a resistência a desagregação do pavimento;
- aumenta o ponto de amolecimento (PA) e promove o aumento da faixa de plasticidade do CAP (faixa de temperatura que o CAP pode ser utilizado);
- maior resistência ao envelhecimento: aumentando o tempo de vida útil do pavimento;
- excelente comportamento reológico: a resistência a fluência e/ou boa recuperação elástica do CAP modificado sob tensões de tração mantém a integridade do revestimento, mesmo quando sujeito a níveis elevados de carga e deslocamentos.

Tome et. al. (2005) avaliaram os efeitos da adição do Terpolímero de etileno-butilacrilato- glicidilmetacrilato (polímero do tipo RET que possui o nome comercial de Elvaloy) nas propriedades químicas e reológicas do CAP de petróleo (CAP 50/70), constatando que o terpolímero aumentou a viscosidade do CAP e atuou como antioxidante tornando o CAP mais resistente no processo de envelhecimento induzido.

Gusmão (2009) utilizou asfalto modificado com polímeros do tipo RET na restauração de rodovias. Esse fez o reforço de um trecho experimental na Rodovia BR116/MG, com concreto betuminoso usinado a quente, utilizando asfalto modificado com diversos teores de polímeros (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 em peso sobre o CAP de petróleo), além de um segmento utilizando CAP de petróleo não modificado para servir de parâmetro de comparação com os recapeados com polímeros. Após a execução das camadas de reforço foram executadas medições utilizando a viga *Benkelman* e retiradas amostras do revestimento com sonda rotativa. As amostras foram submetidas aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, fadiga, módulo

resiliência, os resultados foram analisados e concluiu-se que, o trecho executado com CAP modificado com polímeros apresentou aumento da vida de fadiga e redução das deflexões no pavimento em relação ao trecho executado com asfalto puro.

É válido salientar, também, que uma das principais vantagens do polímero tipo RET está na simplicidade do seu processo de mistura ao CAP, uma vez que, esse depende basicamente do aquecimento do asfalto até a temperatura adequada (185 a 195 °C), adição da quantidade de polímero desejada e posterior agitação do mesmo, podendo então ser realizado em laboratório ou *in loco*.

#### 2.4.2 Ácido Polifosfórico (PPA 116%)

O ácido polifosfórico PPA 116% é um oligômero do ácido fosfórico, a sua produção com alto grau de pureza pode ser feita tanto pela desidratação do ácido fosfórico ou pelo aquecimento do pentóxido de fósforo disperso em ácido fosfórico (Pamplona, 2013).

A modificação do CAP com o ácido polifosfórico (PPA 116%) teve início em 1970, na tentativa de aumentar a viscosidade do asfalto, sem reduzir substancialmente a sua penetração, ou seja, com o objetivo de se produzir asfaltos com maior resistência à deformações permanentes, sem prejudicar a resistência a trincas de origem térmica (Grande, 2011).

Outro fator que promove o uso do PPA 116% como modificador de asfalto é o custo do polímero, que muitas vezes em função da quantidade utilizada, para se obter as propriedades desejadas ao asfalto, inviabilizo o seu uso e impulsionou o estudo do PPA para reduzir a quantidade de polímero na mistura asfáltica. O PPA contorna duas grandes limitações do uso do polímero como modificador de asfalto. Na primeira, o PPA restitui a trabalhabilidade da mistura asfáltica, quando essa é comprometida por adição dos polímeros e na segunda, atua ajudando a melhorar a estabilidade a estocagem do asfalto modificado por polímeros (Sobreiro, 2014; Zhu, 2014).

De acordo com Kodrat (2007) no que se refere a incorporação do PPA 116% ao CAP, esta pode ser feita a partir de três procedimentos: a) como catalisador, aumentando o ponto de amolecimento sem alterar de forma expressiva a rigidez; b) como aditivo direto, para melhorar o grau de desempenho em altas temperaturas, devido a relação entre os asfaltenos e o ácido polifosfórico e, c) como acelerador da reação entre o polímero e o CAP, reduzindo a quantidade de polímero a ser adicionado.

Domingos et. al. (2013) realizaram estudos das propriedades reológicas de um CAP

modificado com a adição do copolímero SBS e com adição do PPA. Os autores relataram que comparado ao CAP+SBS, a adição do PPA ao CAP apresentou resultados promissores com relação aos parâmetros obtidos nos ensaios de fluência e de recuperação sob tensões múltiplas (MSCR), por conta das menores compliâncias não-recuperáveis e maiores percentuais de recuperação elástica, o que faz indicar uma provável melhoria quanto a resistência à deformação da mistura asfáltica em campo.

Pamplona et. al. (2012) avaliaram o efeito da adição de diferentes teores de PPA (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0) em CAP de diferentes fontes, diferentes composições químicas e de diferentes graus de desempenho. As amostras desses CAPs foram submetidas ao ensaio de determinação do PG (grau de desempenho) e ao ensaio de MSCR. Os resultados indicaram que os CAPs respondem de maneira diferente à adição do PPA. Os autores inferem que, em função da sua composição química, alguns adquirem maiores ganhos com menor consumo de PPA, enquanto outros exigem maiores consumos.

Tais modificações no comportamento reológico do CAP com a adição do PPA pode ser justificada pela reação química entre os constituinte do PPA e os grupos funcionais do CAP. No entanto, a reação exata não pode ser totalmente padronizada, uma vez que, o asfalto possui constituintes químicos, qualitativamente e quantitativamente, variáveis em função de sua origem, do processo de destilação, do seu nível de pureza e de elementos misturados em sua cadeia carbônica (Grande et. al., 2011).

## ***1.9 Reologia dos Cimentos Asfálticos***

Reologia é a ciência que estuda a deformação e o fluxo dos materiais, seja nas formas de líquido ou sólido em termos da elasticidade e da viscosidade do material (Amaral, 2000).

A Sociedade Americana de Reologia foi fundada em 1929 e em seu primeiro encontro teve intenção de discutir sobre as propriedades e comportamentos dos materiais divergentes como asfaltos, lubrificantes, tintas, plásticos e borrachas, assim como as principais disciplinas que pudessem estar envolvidas no assunto. No estudo reológico, para atingir suas metas, é necessário a verificação dos modelos que representam o comportamento reológico dos materiais de interesse, bem como a proposição que o comportamento dos materiais, de maneira geral, esta relacionado com à tensão, à deformação, o tempo de aplicação de carga e o tempo de experimento (Fernandes et. al., 2009).

No tocante, ao estudo do comportamento reológico do CAP pode-se definir que, tem

por objetivo principal encontrar a obtenção da relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura, pois, a investigação destas propriedades corrobora para um maior conhecimento da interação do CAP com os agregados, quando submetidos a condições de serviço.

Mothé (2009) destaca que é importante o entendimento da reologia dos CAPs pelas seguintes razões:

- relaciona as propriedades reológicas com os defeitos na superfície do pavimento;
- permite diferenciar os asfaltos provindos de diferentes petróleos e diferentes processos de refino;
- orienta na seleção das temperaturas para as operações de usinagem e construção das camadas asfálticas;

Ainda segundo Mothé (2009), as propriedades como viscosidade, rigidez, elasticidade, deformação ao longo do tempo (fluência) e taxa de relaxação são de grande interesse para o entendimento da reologia dos CAP.

Entretanto, o comportamento reológico do CAP torna-se bastante complexo, tendo em vista que este material será submetido a uma ampla variação de temperatura, carregamento dinâmico do tráfego e exposição a diferentes frequências de carregamento. Ou seja, por ser um material visco-elástico, a temperaturas baixas e/ou altas taxas de carregamento (frequência) reage como sólido elástico, do contrário, quando a temperatura aumenta e/ou quando a taxa de carregamento é reduzida, as propriedades relacionadas a viscosidade.

Associando-se aos fatores citados acima, Domingos (2013) relata que o envelhecimento do CAP, o qual pode ocorrer durante o processo de usinagem e/ou ao longo de sua vida útil, é um fator altamente complicador para quem estuda suas propriedades reológicas, pois, ao longo desse processo ocorre a oxidação das moléculas polarizáveis dos maltenos, que passam a fazer parte da fração de asfaltenos, resultando no endurecimento gradativo do asfalto e diminuição da sua susceptibilidade térmica.

Em relação ao CAP modificado com polímeros a adição de polímeros é uma alternativa versátil de modificar as propriedades reológicas dos asfaltos, fato que pode ser explicado pelas alterações que ocorrem na composição química deste material (Amaral, 2000).

### **2.5.1 Procedimentos/Equipamentos utilizados no estudo das propriedades reológicas do Cimento Asfáltico**

Ao longo do tempo o CAP vem sendo estudado por meio do uso de equipamentos a partir de procedimentos convencionais, baseados em métodos empíricos, tais como: penetração, ponto de amolecimento, ductilidade, recuperação elástica entre outros. Porém, esses procedimentos/equipamentos, não estão sendo considerados satisfatórios, uma vez que apresentam limitações inerentes aos parâmetros obtidos, que impedem a determinação das propriedades fundamentais dos asfaltos, as quais poderiam ser correlacionadas com o desempenho do revestimento asfáltico (Fernandes et. al., 2009).

À luz desta constatação, a qual se fundamenta o estudo de parâmetros que possam ser relacionados ao comportamento reológico do CAP ao desempenho mecânico das misturas asfálticas em serviço, surgiu, em 1987, nos Estados Unidos, o SHRP (Strategic Highway Research Program) com o objetivo de estabelecer novos procedimentos e equipamentos para o estudo de Cimentos asfálticos e suas misturas, baseado em ensaios reológicos. Neste programa foi definido um novo conjunto de ensaios e uma nova classificação de CAPs, denominada como especificação Superior Performing Pavement (SUPERPAVE), que contribuiu muito para o desenvolvimento da malha rodoviária americana (Fernandes et. al., 2009).

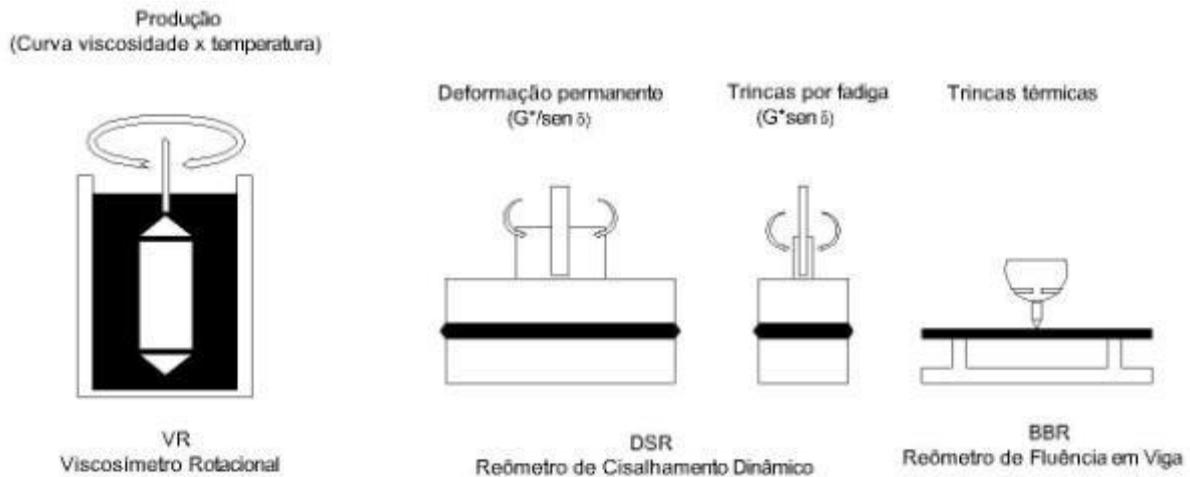
Buscando alcançar seus objetivos, o SHRP realizou estudos em diversos materiais, pavimentos, e destacou; a deformação permanente, a formação de trincas por fadiga associada ao tráfego, a formação de trincas de origem térmica e o envelhecimento como os principais mecanismos que promovem a falência dos revestimentos asfálticos associados ao CAP.

Assim, com base em tais mecanismos, nas especificações SUPERPAVE, o CAP é classificado em função da temperatura, ou seja, se baseia na realização de medidas das propriedades reológicas do CAP sobre o efeito de diferentes temperaturas, onde são estimadas faixas de temperaturas em que o asfalto pode ser utilizado. Estas faixas são denominadas Grau de Desempenho (PG), e podem ser definidas por duas temperaturas limites, sendo uma máxima, que garante à resistência de deformação permanente e uma mínima, que indica à resistência a formação de trincas térmicas (Lucena et.al., 2004).

Na Figura 2.3 são apresentados os “Layouts” dos principais procedimentos utilizados para o estudo das propriedades reológicas dos CAPs sobre a ótica do SRHP os quais podem ser relacionados ao comportamento destes materiais em serviço.

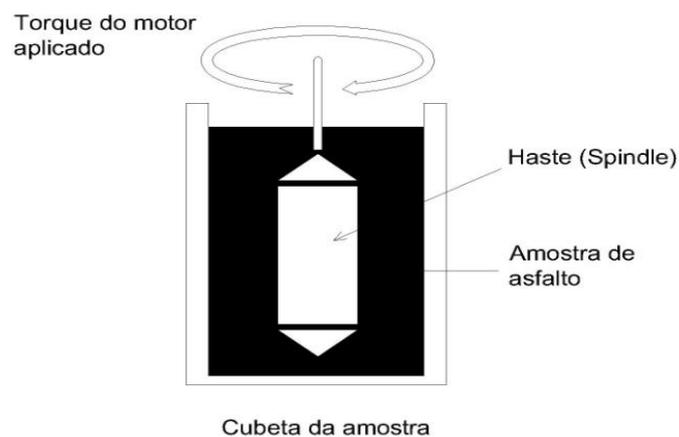
As especificações SUPERPAVE utilizam para o estudo o comportamento reológico dos CAPs, os seguintes equipamentos (Negrão 2006):

- viscosímetro rotacional;
- reômetro de cisalhamento dinâmico;
- reômetro de fluência em viga;
- prensa de tração direta.



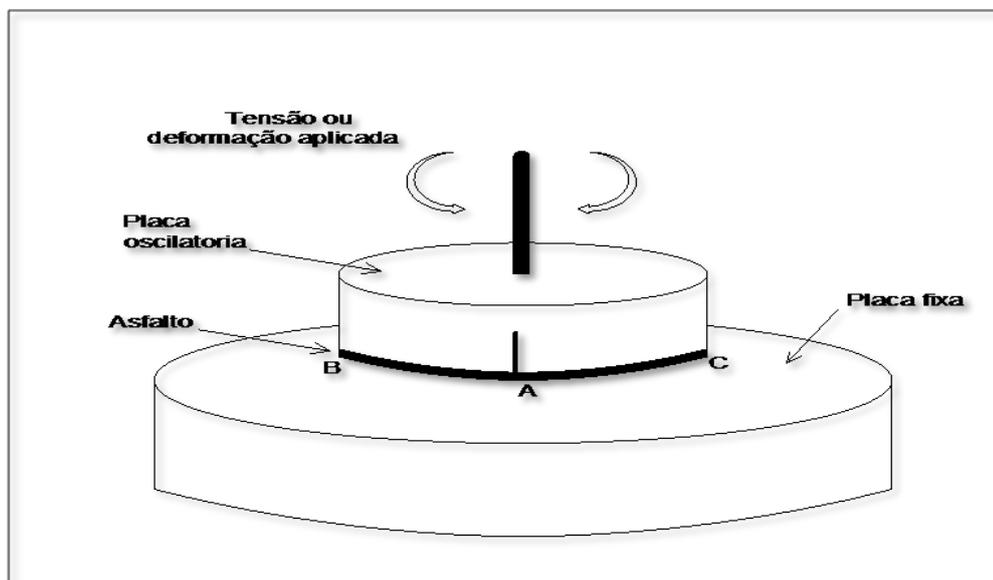
**Figura 2.3.** “Layouts” de procedimentos utilizados para o estudo das propriedades reológicas dos CAPs/SRHP e o comportamento em campo dos revestimentos asfálticos. Fonte: Adaptada de Gonzales, (2006).

O procedimento com viscosímetro rotacional (Figura 2.4) é utilizado para medir a viscosidade sob temperatura de bombeamento, de mistura com agregados em usina e de compactação, assegurando a trabalhabilidade da mistura (Faxina, 2006).



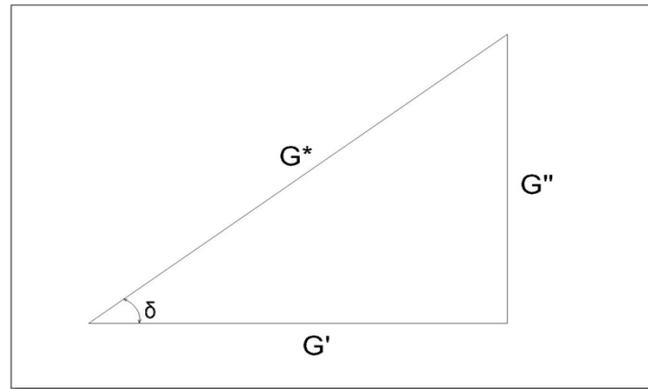
**Figura 2.4.** Layout do procedimento utilizado no viscosímetro rotacional.

O Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR – Dynamic Shear Rheometer) tem como princípio de funcionamento submeter uma pequena quantidade do CAP a tensões oscilatórias, entre duas placas paralelas. No método Superpave, esse equipamento é utilizado para medir as propriedades do asfalto a temperaturas elevadas, intermediárias e simular taxas de carregamento típicas do tráfego. As temperaturas nas quais os ensaios são realizados são baseadas na temperatura real de serviço, onde o CAP será utilizado. Por meio do DSR, sob condições específicas de temperatura e frequência de carga, são obtidos o Módulo Complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), como principais parâmetros reológicos. Na Figura 2.5 é apresentado o layout de um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).



**Figura 2.5.** Layout de um Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).

O Módulo Complexo é definido como a razão entre o máximo de tensão de cisalhamento e o máximo de deformação, e está relacionado à resistência à deformação quando o asfalto é submetido a uma carga de cisalhamento, ou seja, quanto maior o seu valor, maior a rigidez do material e conseqüentemente maior sua resistência à deformação. O Módulo Complexo pode ser decomposto em uma componente elástica (módulo elástico -  $G'$ ) e outra viscosa (módulo viscoso -  $G''$ ) (Negrão, 2006). Através da Figura 2.6 pode-se obter a Equação 01 e a Equação 02 que apresentam as relações entre as componentes do módulo complexo, o Módulo Complexo e o ângulo de fase.



**Figura 2.6.** Relações entre o Módulo Complexo ( $G^*$ ), seus componentes ( $G'$ ), ( $G''$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ).

$$G' = G^* \cos \delta \quad \text{Equação 01}$$

$$G'' = G^* \sin \delta \quad \text{Equação 02}$$

O ângulo de fase ( $\delta$ ) pode ser definido como a medida do balanço visco-elástico do material. Dessa forma, para um material puramente elástico a resposta à deformação é imediata e o ângulo de fase é igual a zero, para o material puramente viscoso há uma defasagem entre a tensão aplicada e a deformação do material e o ângulo de fase é igual a 90. Como o CAP é um material visco-elástico o  $\delta$  varia de 0 a 90 dependendo da temperatura, sendo que, a temperaturas altas  $\delta$  tende a 90 e a baixas temperaturas  $\delta$  tende a 0 (Bringel, 2007).

O resultado do  $\delta$  pode também ser registrado sob a forma da tangente do ângulo ( $\tan \delta$ ) que é a razão entre o módulo viscoso e o módulo elástico, ou seja,  $\tan \delta = G'' / G'$ . Logo, quanto menor o valor  $\delta$ , e conseqüentemente da  $\tan \delta$ , maior a resposta elástica do material. (Bringel, 2007).

Entretanto esses parâmetros visco-elásticos; Módulo Complexo ( $G^*$ ), ângulo de fase ( $\delta$ ), módulo elástico ( $G'$ ) e módulo viscoso ( $G''$ ); devem ser definidos dentro da região de viscoelasticidade linear. Nessa região, o módulo do material é independente da tensão ou da deformação, permitindo-se assim selecionar a máxima tensão ou deformação a ser aplicada ao material. Com o DSR, a definição dessa região é feita por meio de uma varredura de tensão ou de deformação, onde os valores dessas sobre o corpo de prova aumentam gradativamente até que se observe uma redução significativa do módulo (Faxina, 2006).

Logo, diante do que foi mencionado, é notório que sem uma distinção entre os tipos

de respostas dos CAP em termos de resistência total a deformação ( $G^*$ ), da elasticidade ( $\delta$ ) e sem medir propriedades nas faixas de temperaturas ou de frequências que correspondem às condições climáticas e as cargas de tráfego que solicitam o pavimento, torna-se impossível à seleção do CAP para um pavimento com melhor desempenho.

Na especificação Superpave os parâmetros  $G^*/\sin\delta$  e  $G^* \sin\delta$  são utilizados para determinação do Grau de Desempenho (PG) (Figura 2.7). Ou seja, para o controle da rigidez do asfalto. Especificamente o  $G^*/\sin\delta$  controla a rigidez a altas temperaturas, ou seja, determina a temperatura máxima para o asfalto assegurando que esse forneça resistência ao cisalhamento global da mistura, em termos de elasticidade a altas temperaturas. A escolha dessa temperatura tem como base o fato de que quando em serviço o pavimento é submetido a cargas cíclicas que tendem a deformá-lo, sendo que parte dessa deformação torna-se permanente, pois esta relacionada ao trabalho desenvolvido e não recuperado, que é dissipado em forma de calor.



**Figura 2.7.** Determinação do PG – Layout. Fonte: traduzido de Gonzales, (2006).

Então, com base na equação que representa o trabalho dissipado por ciclo de carregamento, à especificação estabeleceu valores limites para o parâmetro  $G^*/\sin\delta$ . Ficando definido que para os CAP originais (antes do RTFO) o limite superior de temperatura do PG é aquela temperatura na qual o valor de  $G^*/\sin\delta$  seja superior a 1,0 KPa, enquanto que para os não originais (após o RTFO), considerando o efeito do envelhecimento que promove a oxidação e perda dos componentes voláteis, o valor do  $G^*/\sin\delta$  deve ser superior a 2,2 KPa. A lógica da associação do parâmetro  $G^*/\sin\delta$  com o trabalho dissipado é que a contribuição do asfalto à resistência a deformação permanente pode ser incrementada com o aumento de  $G^*$  e/ou diminuição do  $\sin\delta$  (Lucena, 2004; Faxina, 2006).

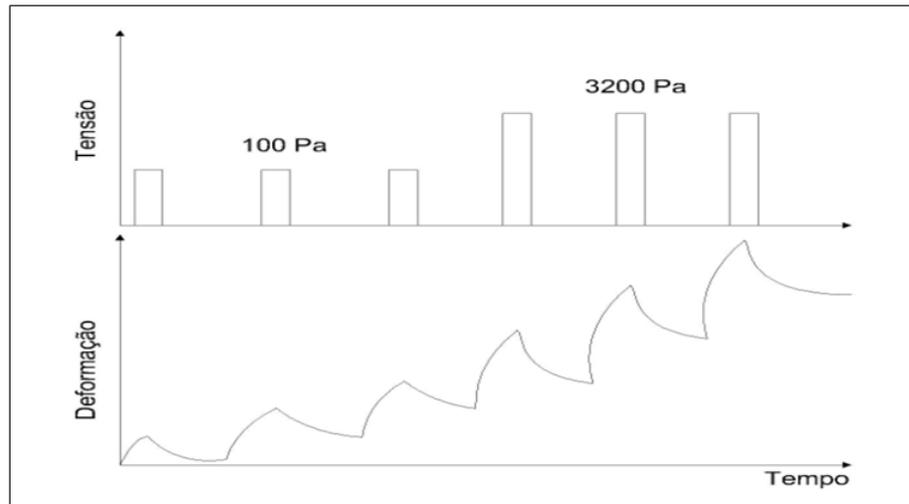
Em relação ao parâmetro  $G^* \sin\delta$ , esse está relacionado com a rigidez do CAP a

temperaturas intermediárias, garantindo que o CAP não contribua para o trincamento por fadiga (LEITE, 1999). E, considerando que a fadiga é uma desgaste à longo prazo, o parâmetro  $G^* \sin \delta$  é aplicado as amostras após o envelhecimento à curto e longo prazo, RTFO e PAV, respectivamente.

### **2.5.2 Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (MSCR)**

Como supracitado, a especificação SUPERPAVE utilizava o parâmetro  $G^*/\sin \delta$  para controle da deformação permanente do asfalto. Contudo, esse parâmetro também é avaliado dentro da região de viscoelasticidade linear e, como é sabido, as deformações no asfalto pode ocorrer fora desta região. Esse fato levou muitos estudiosos a definir que a utilização desse parâmetro impõe uma simplificação ao estudo da deformação permanente do asfalto. Nesse contexto, a Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos (FHWA) desenvolveu o ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR - Multi-Stress Creep Recovery) substituindo o parâmetro  $G^*/\sin \delta$  para controle da deformação permanente (Pamplona, 2012).

Este ensaio é realizado no DSR, aplicando-se uma tensão controlada durante 1s, em uma amostra de asfalto, sendo retirada em seguida e permitindo que o material repouse por um tempo de 9 s. São utilizados dois níveis de tensão, uma de 100 Pa aplicada para os dez primeiros ciclos, simulando uma condição de tráfego normal, e uma segunda de 3200 Pa, que simula a ação do tráfego intenso, com o objetivo de avaliar a capacidade do material em manter sua resposta elástica (Sobreiro, 2014). A Figura 2.8 são apresentados os ciclos de aplicação de tensões e deformações durante a realização do ensaio de Fadiga com DSR.



**Figura 2.8.** Ciclos de aplicação de tensões e deformações durante a realização do ensaio de MSCR como DSR. Fonte: D'Ángelo (2012).

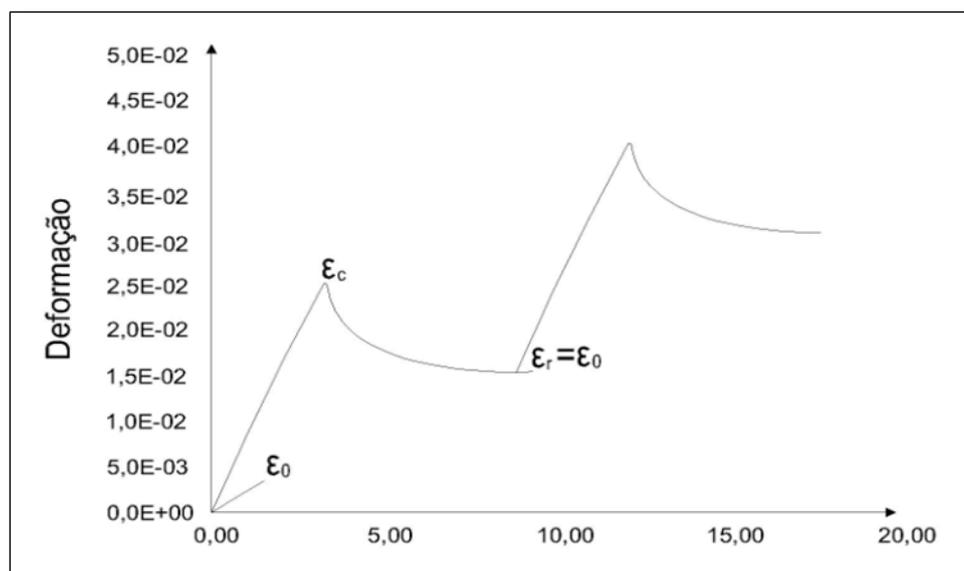
Ao final de cada ciclo de fluência e recuperação, são registradas as seguintes deformações:

$\epsilon_0 = \epsilon_r$  = fluência no início de cada ciclo, no tempo 0 segundo;

$\epsilon_c$  = fluência no final de cada ciclo, no tempo de 1 segundo;

$\epsilon_t$  = fluência no final da recuperação de cada ciclo, no tempo de 10 segundos.

Na Figura 2.9 são apresentadas as localizações das deformações em um ciclo do ensaio MSCR.



**Figura 2.9.** Localização das deformações em um ciclo do ensaio de MSCR. Fonte: Sobreiro (2014).

Com as deformações citadas acima, calcula-se a compliância não-recuperável  $J_{nr}(\sigma, N)$ , na tensão  $\sigma = 100$  Pa ou  $\sigma = 3200$  Pa e o percentual de recuperação %R ( $\sigma, N$ ) para cada ciclo de fluência e recuperação (sendo N o número de ciclos  $1 \leq N \leq 10$ ). A compliância não-recuperável é calculada pela razão entre a deformação não recuperável e a tensão aplicada. Como mostra a Equação 03:

$$J_{nr}(\sigma, N) = \frac{(\varepsilon_r - \varepsilon_0)}{\sigma} \quad \text{Equação 03}$$

Enquanto que, o percentual de recuperação é calculado pela razão entre a deformação recuperável e a deformação total do material, como mostra a Equação 04:

$$\%R(\sigma, N) = \frac{((\varepsilon_c - \varepsilon_0) - (\varepsilon_r - \varepsilon_0)) * 100}{(\varepsilon_c - \varepsilon_0)} \quad \text{Equação 04}$$

sendo:  $\varepsilon_r = \varepsilon_0$  = fluência no início de cada ciclo;  $\varepsilon_c$  = fluência no final de cada ciclo;  $\sigma$  = tensão controlada.

Sobreiro (2014) relata que a relação entre as compliâncias não-recuperáveis a 100Pa ( $J_{nr100}$ ) e a 3.200 ( $J_{nr3200}$ ) não deve superar os 75%, assegurando assim que o CAP não seja demasiadamente sensível a mudanças no nível de tensão

Dessa maneira, diante desses novos parâmetros, surgiu uma nova especificação, baseada no ensaio MSCR ou mais precisamente nos valores limites de  $J_{nr}$ , para diferentes níveis de carregamento de tráfego (S, H, V e E) designados, respectivamente, como padrão (Standard), pesado (Heavy), muito pesado (Very heavy) e extremamente pesado (Extremely heavy) (D'Angelo, 2012). Na Tabela 2.1 está inserida a classificação quanto ao valor de  $J_{nr}$  de acordo com o critério proposto pelo FHWA.

**Tabela 2.1.** Classificação quanto ao valor de  $J_{nr}$ . Fonte: AASHTO M320.

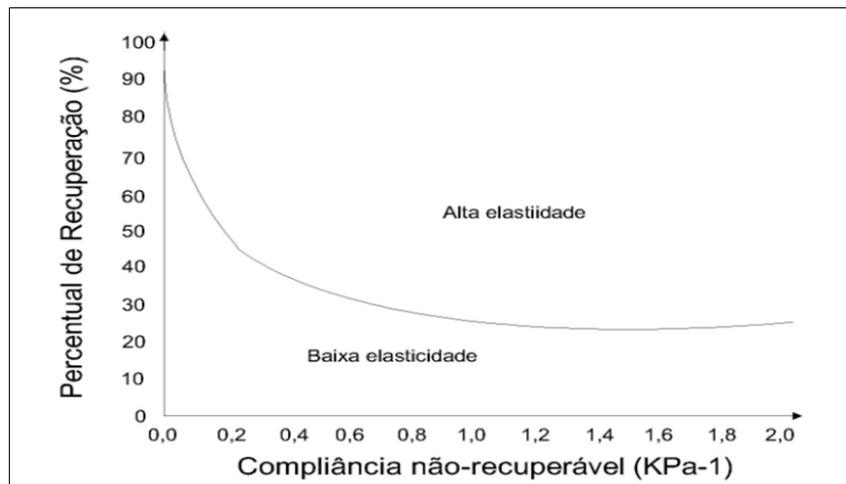
Propriedade	Limite máximo ( $KPa^{-1}$ )	Tipo de tráfego	Número de passadas de um eixo padrão
$J_{nr}$ a 3.200 Pa na temperatura do PG	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
	1,0	Muito pesado (V)	> 30 milhões
	0,5	Extremamente pesado (E)	> 100 milhões

Diante do valor da compliância não-recuperável foi também estabelecido valores mínimos do percentual de recuperação para os cimentos asfálticos de petróleo. Na Tabela 2.2 estão inseridos os percentuais de recuperação de acordo com o critério proposto pelo FHWA (Federal Highway Administration).

**Tabela 2.2.** Percentual de recuperação de acordo com o critério proposto pelo FHWA.

$J_{nr}$	a 3.200 Pa ( $KPa^{-1}$ )	%R mínimo (%)
	1,01 – 2,0	30
	0,51 – 1,0	35
	0,251 – 0,50	45
	0,125 – 0,25	50

Esses valores mínimos de percentual de recuperação podem ainda serem apresentados de forma gráfica, onde os pares ordenados ( $J_{nr}$  ; R) acima da curva são considerados de alta elasticidade e aqueles abaixo da curva de baixa elasticidade, como apresentado na Figura 2.10 (Sobreiro, 2014).



**Figura 2.10.** Relação entre a compliância não-recuperável e o percentual de recuperação a 3200 Pa. Fonte: Fernandes (2009).

Moraes (2007) evidencia que a utilização desse ensaio, MSCR, para avaliação dos CAP modificados tem apresentado resultados positivos, demonstrando assim, a sensibilidade desse método para identificação do efeito dos polímeros.

### 2.5.3 Curva Mestre

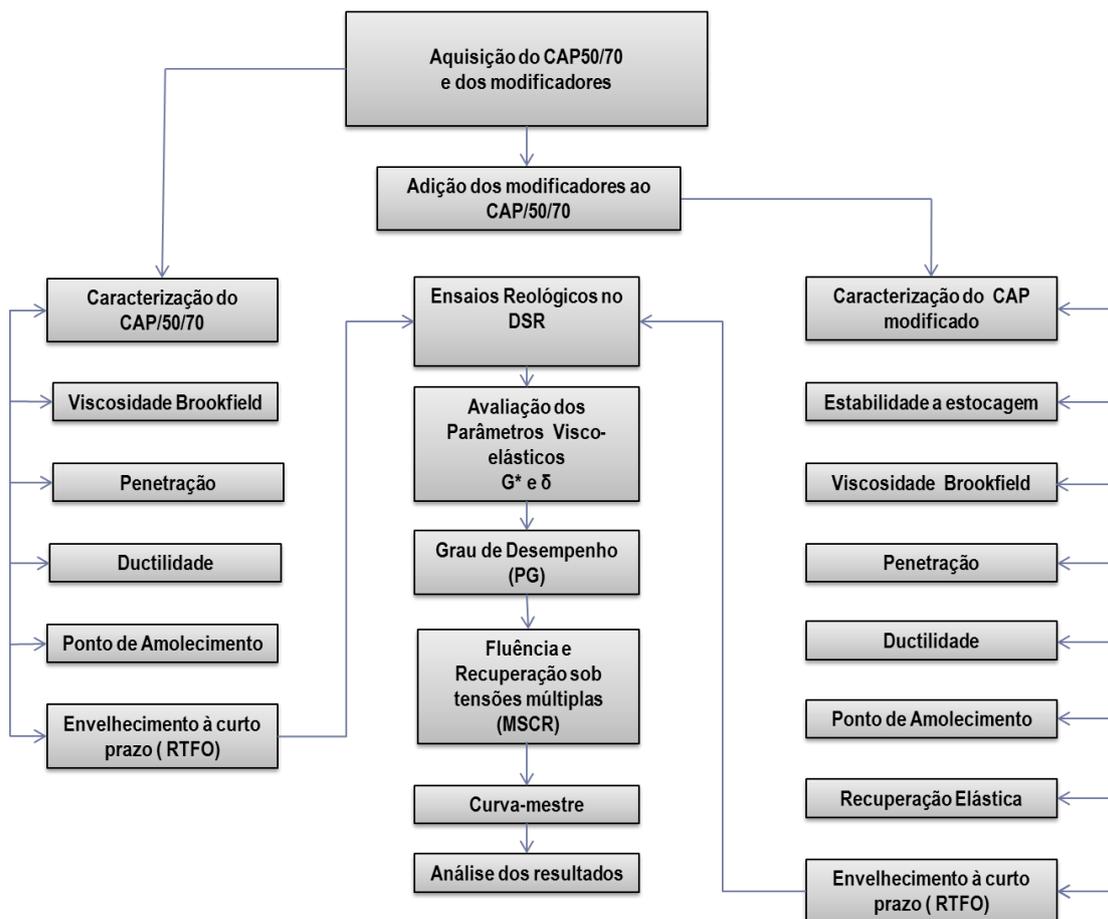
Outro ensaio de relevada importância, que é realizado no DSR, para avaliar as propriedades reológicas do CAP de petróleo é comumente denominado de curva mestre. As curvas mestre são a representação do comportamento reológico do material a uma temperatura determinada, em um amplo espectro de frequência (Pamplona, 2013).

De acordo com Fernandes (2009) tais curvas permitem a avaliação do efeito da modificação e do uso de diferentes aditivos no comportamento reológico dos CAP. Destaca-se que baixas frequências guardam uma correlação direta com maiores tempos de aplicação do esforço e temperaturas mais altas, enquanto frequências mais elevadas, com tempos menores e temperaturas mais baixas.

Para a obtenção da curva mestre, o ensaio é realizado em diversas temperaturas para um mesmo intervalo de frequência, escolhe-se então a temperatura de referência, geralmente 25 °C. Pela aplicação do princípio de superposição tempo-temperatura os valores obtidos na varredura de frequência em outras temperaturas são trasladados na escala tempo, para que todas as curvas se fundam em uma única curva, a curva mestra (Moraes et. al., 2007).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa para o estudos das *‘propriedades reológicas convencionais e especiais’* dos CAPs Puro e Modificado. No Fluxograma 3.1 é apresentada a sequência de atividades utilizadas na fase experimental para alcançamos objetivos da pesquisa.



**Fluxograma 3.1.** Sequência de atividades utilizadas do experimento para realização desta pesquisa.

## 1.10 Materiais

### 3.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e Aditivos

Na presente pesquisa foi utilizado o CAP 50/70 fornecido pela PRANA Petroquímica e caracterizado pelo laboratório da REVAP em São Paulo. Na Tabela 3.1 são apresentadas as características físicas do CAP 50/70 empregado na pesquisa. O critério para escolha deste CAP foi estabelecido em função de sua utilização corriqueira na Região Nordeste.

**Tabela 3.1.** Resultados da Caracterização do CAP 50/70 utilizado na pesquisa.

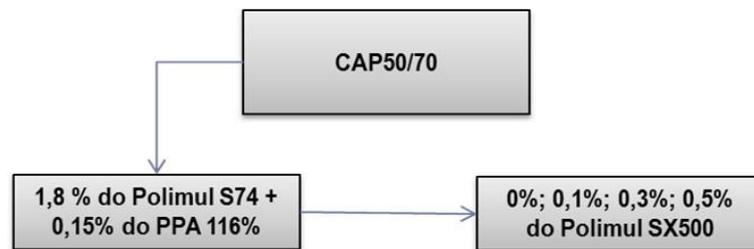
Característica	Resultado	Unidade
Penetração	56	0,1mm
Ponto de amolecimento	49	°C
Ponto de fulgor	-	-
Viscosidade Brookfield 135°C	354	Cp
Viscosidade Brookfield 150°C	179	Cp
Viscosidade Brookfield 177°C	66	Cp
RTFO Penetração retida	79	%
RTFO Aumento de ponto de amolecimento	5,1	°C
RTFO Ductilidade a 25°C	>150	Cm
RTFO Variação em % massa	-0,39	%
Ductilidade a 25°C	>150	Cm
Índice de Susceptibilidade Térmica	-1,2	-

Além do CAP 50/70, os modificadores utilizados no trabalho foram os seguintes:

- terpolímero Elastomérico Reativo (RET), denominado Terpolímero de Etileno, Acrilato de Metila, Metacrilato de Glicídila (EMA-GMA), que recebe o nome comercial de Polimul S74 e foi fornecido pela PRANA Petroquímica.
- polietileno de baixa densidade (PEBD) que recebe o nome comercial de Polimul SX-500, fornecido pela PRANA Petroquímica.
- ácido Polifosfórico (PPA 116%) também fornecido pela PRANA Petroquímica.

### 3.1.3 Preparação dos CAPs Modificados

Para o desenvolvimento dessa pesquisa as misturas CAP- polímeros foram realizadas adicionando ao CAP Puro 1,8% do Polimul S74, 0,15% do PPA (116%) e 0,1; 0,3; 0,5% do Polimul SX500 (Fluxograma 3.2)., tais teores foram definidos conforme sugerido por Miranda (2013).



**Fluxograma 3.2.** Sequência da mistura.

As misturas foram preparadas conforme utilizado na indústria como procedimento padrão desse tipo de modificador utilizando um agitador de baixo cisalhamento, FISATOM Modelo 722D, com agitação de 500 rpm. A Figura 3.1 apresenta o misturador utilizado para preparo das misturas.



**Figura 3.1.** Misturador de Cimentos Asfálticos Modelo 722D – LEP/UFCG utilizado para preparo das misturas de aditivos com o CAP.

O Procedimento de mistura foi determinado seguindo a metodologia apresentada por Negrão (2006) e consta das seguintes etapas: o CAP foi aquecido a 160 -165°C e mantendo-se constante essa temperatura adicionou-se a quantidade pré-determinada de Polimul S74, misturando durante 1 (uma) hora. A seguir, a temperatura do CAP foi elevada até 175 °C e mantendo-se constante essa temperatura adicionou-se a quantidade pré-determinada de Polimul SX-500, misturando durante 30 minutos. Em seguida, foi adicionada a quantidade pré-determinada de PPA 116%, misturando durante 30 minutos.

Na Tabela 3.2 são apresentadas as informações inerentes as misturas realizadas nessa pesquisa e as nomenclaturas utilizadas para representar cada uma delas.

**Tabela 3.2.** Misturas realizadas e as nomenclaturas utilizadas.

MISTURA	CÓDIGO	PERCENTUAL		
		%		
		S74	PPA 116%	SX500
CAP 50/70	CAP 50/70	---	---	---
CAP 50/70 + S74	S74	1,8	0,15	---
CAP 50/70 + S74 + 0,1SX-500	S74 SX 0,1	1,8	0,15	0,1
CAP 50/70 + S74 + 0,3 SX-500	S74 SX 0,3	1,8	0,15	0,3
CAP 50/70 + S74 + 0,5SX-500	S74 SX 0,5	1,8	0,15	0,5

### 1.11 Métodos

Com o objetivo de determinar as propriedades reológicas foram realizados os ensaios sobre amostras de *CAPs Puros e Modificados* a partir de procedimentos, normatizados pela ABNT, DNIT e ASTM, e equipamentos *Convencionais e Especiais* pertencentes ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande (LEP/UFCG). No Quadro 3.1 são apresentadas as normas para os respectivos ensaios realizados.

**Quadro 3.1.** Tipo de ensaios e Normas utilizadas para realização dos ensaios.

<b>TIPOS DE ENSAIOS</b>	<b>NORMAS</b>
Penetração	DNIT-ME 155/2010
Viscosidade Brookfield	NBR 15184/07
Ductilidade	DNIT ME 163/98
Recuperação Elástica	DNIT-ME 130/2010
Ponto de Amolecimento	DNIT-ME 131/2010
RTFO	NBR 15235
Estabilidade a estocagem	NBR 15166/2004
<b>ENSAIOS REOLÓGICOS NO DSR</b>	
Determinação das propriedades reológicas	D7175 – 08
Determinação do grau de desempenho (PG)	ASTM D6373 - 15
Ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)	ASTM D7405-10a

### 3.1.4 Ensaio de estabilidade à estocagem (NBR 15166/2004)

Esse ensaio tem por objetivo avaliar a compatibilidade entre o polímero e o CAP durante a estocagem. É realizado, colocando-se o CAP/Polímero dentro de um tubo metálico, na vertical, em repouso, e em seguida coloca-se o tubo no interior de uma estufa a 163 °C, durante 5 dias. Transcorrido esse tempo, são colhidas amostras do material do topo e da base do tubo metálico e nesse material realiza-se os ensaios de ponto de amolecimento. De tal forma, para que a mistura CAP/Polímero seja considerada estocável, as diferenças entre os resultados dos ensaios nas amostras de topo e base não podem exceder os valores limites máximos especificados em norma.

### 3.1.5 Ensaio de Penetração (DNIT-ME 155/2010)

O ensaio de penetração mede a “consistência” ou “viscosidade indireta” do CAP no estado semi- sólido. Esse consiste basicamente em determinar a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra verticalmente, durante 5 segundos em uma amostra de CAP a uma temperatura de 25°C. Em cada ensaio foram realizadas três medidas individuais de penetração, com a adoção da média destes valores, na condição da dispersão entre as três medidas não exceder os valores especificados na norma. Na Figura 3.2 é apresentado o Penetrômetro utilizado para a realização deste ensaio.



**Figura 3.2.** Penetrômetro automático (LEP/UFGC).

A partir dos resultados obtidos com o ensaio de penetração foi avaliada, também, a *Penetração Retida* do CAP, calculada pela razão entre o valor da penetração do CAP na condição envelhecida á curto prazo e o valor da penetração na condição sem envelhecimento ambos para o *CAP 50/70 Puro* e o *CAP Modificado* com as proporções de aditivos citadas anteriormente. Para o cálculo da Penetração retida foi utilizada a Equação 05. Este procedimento teve como objetivo verificar a sensibilidade do material ao envelhecimento á curto prazo.

$$Penetração\ retida(\%) = \frac{Pen\ RTFO}{Pen\ Pura} * 100 \quad \text{Equação 05}$$

onde: Pen RTFO = penetração após o ensaio de RTFO Pen Pura = penetração antes do ensaio de RTFO.

### 3.1.6 Procedimento de envelhecimento à curto prazo RTFO (NBR 15235)

Este procedimento simula as mudanças ocorridas nas propriedades do CAP durante o processo de usinagem. Sendo realizado colocando-se uma amostra do CAP de 35g dentro de um cilindro de vidro de dimensões padronizadas e logo em seguida, o cilindro é fixado a um sistema giratório dentro de uma estufa. Pode-se operar com oito cilindros dentro da estufa, sendo que, com o movimento giratório e contínuo é formada uma fina película de CAP nas paredes do cilindro, a qual recebe uma injeção de ar a cada 3 ou 4 segundos por 85 minutos a 163 °C. Após este período de tempo é medida a variação de massa que o CAP sofreu decorrente do efeito do envelhecimento. Na Figura 3.3 é apresentado a estufa RTFO (Rolling Thin-Film Oven) utilizada para a realização deste procedimento.

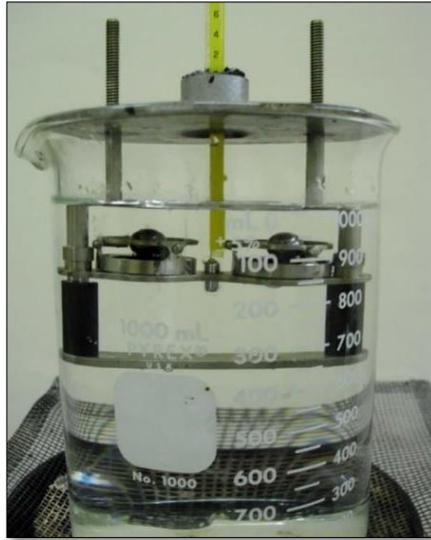


Figura 3.3. Estufa RTFO (Rolling Thin-Film Oven) do LEP/UFCG.

### 3.1.7 Ponto de Amolecimento (DNIT-ME 131/2010)

Este ensaio é normalmente conhecido como *Ensaio de Anel e Bola* e tem como finalidade fornecer a temperatura na qual a “viscosidade indireta” do CAP passa do estado semi-sólido para o estado líquido. A Figura 3.4 ilustra a realização desse ensaio.

O ponto de amolecimento foi realizado, também, na condição envelhecida à curto prazo ambos para o *CAP 50/70 Puro* e o *CAP Modificado* com as proporções de aditivos citadas anteriormente.



**Figura 3.4.** Equipamento para realização do ensaio de ponto de amolecimento (LEP/UFCCG).

### 3.1.8 Índice de susceptibilidade térmica (DNIT-ME/2010)

O índice de susceptibilidade térmica indica a sensibilidade dos CAPs à variação de temperatura (Pinto, 2014). Em síntese, de acordo com Gusmão (2009) o conhecimento prévio sobre como se comportará um determinado CAP frente à variação de temperatura é de fundamental importância na qualidade dos serviços e também na segurança do usuário da rodovia, tendo em vistas deformações permanentes que poderão ocorrer no revestimentos asfálticos. O índice de susceptibilidade térmica pode ser calculado a partir da Equação 06.

$$ISC = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C)1951}{120(50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad \text{Equação 06}$$

onde:  $T^{\circ}C$  = Ponto de amolecimento PEN = penetração a  $25^{\circ}C$ , 100 g, 5 seg.

### 3.1.9 Recuperação Elástica (DNIT-ME 130/2010)

O ensaio de recuperação elástica (Figura 3.5) é mensurada a capacidade de recuperação do CAP, após ser submetido a tração especificada sob temperatura controlada. A recuperação elástica foi determinada a partir da Equação 07.

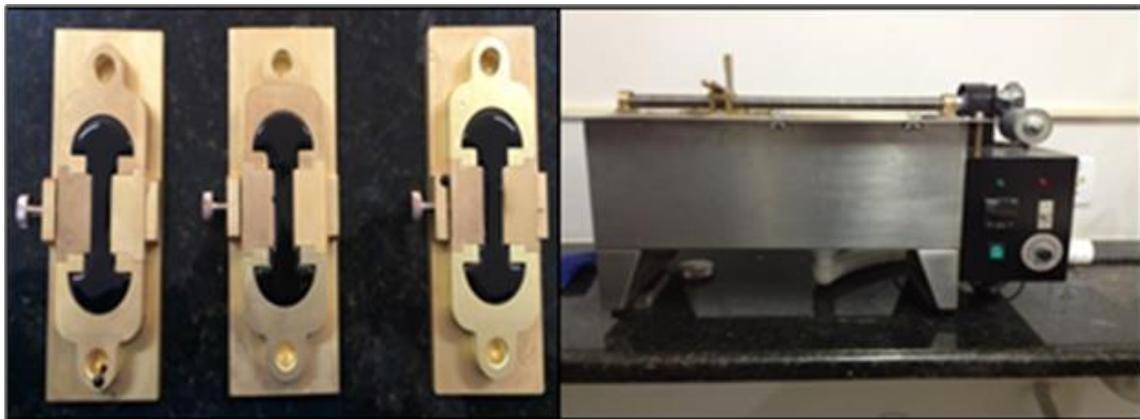
$$RE \% = ((L1 - L2)/L1) * 100$$

Equação 07

onde: L1 = 20 cm (comprimento inicial) L2 = alongamento final da amostra.

A Figura 3.5 apresenta as amostras moldadas e o equipamento utilizado para realização do ensaio de recuperação.

A recuperação elástica foi mensurada, também, na condição envelhecida á curto prazo ambos para o *CAP 50/70 Puro* e o *CAP Modificado* com as proporções de aditivos citadas anteriormente.



**Figura 3.5.** Equipamento para a realização do ensaio recuperação elástica (LEP/UFCG).

### 3.1.10 Viscosidade Rotacional (NBR 15184/07)

Nesse trabalho foi utilizado o viscosímetro Brookfield Modelo DV-III ULTRA, acoplado a um controlador de temperatura Thermosel, para monitorar a viscosidade rotacional nas seguintes temperaturas, 135 °C, 150 °C e 177°C, utilizando-se o “Spindle n.21 de maior geometria para as amostras do CAP puro e n. 27 de menor geometria para as amostras do CAP modificado, de tal forma a respeitar a capacidade de operação do equipamento. Nas Figuras 3.6 e 3.7 são apresentados os acessórios e o Viscosímetro Brookfield do LEP/UFCG utilizado nesta pesquisa.

A viscosidade rotacional foi obtida, também, na condição envelhecida á curto prazo ambos para o *CAP 50/70 Puro* e o *CAP Modificado* com as proporções de aditivos citadas anteriormente.



**Figura 3.6.** Viscosímetro Brookfield acoplado ao Thermosel (LEP/UFCG).



**Figura 3.7.** Acessórios utilizados no para determinação da viscosidade Rotacional – Viscosímetro Brookfield do LEP/UFCG.

A partir dos resultados obtidos com o ensaio de viscosidade rotacional foi avaliado, também, o Índice de envelhecimento de viscosidade (VAI – Viscosity Aging Index), calculado pela razão entre o valor da viscosidade na condição envelhecida á curto prazo e o valor da viscosidade na condição sem envelhecimento para o *CAP 50/70 Puro* e o *CAP Modificado* com as proporções de aditivos citadas anteriormente. Para o cálculo do índice de envelhecimento

de viscosidade foi utilizada a Equação 08. Este procedimento teve como objetivo verificar a sensibilidade do material ao envelhecimento à curto prazo.

$$VAI = ((V2 - V1)/V1) * 100 \quad \text{Equação 08}$$

onde: V2 = viscosidade após RTFO, V1 = viscosidade antes do RTFO.

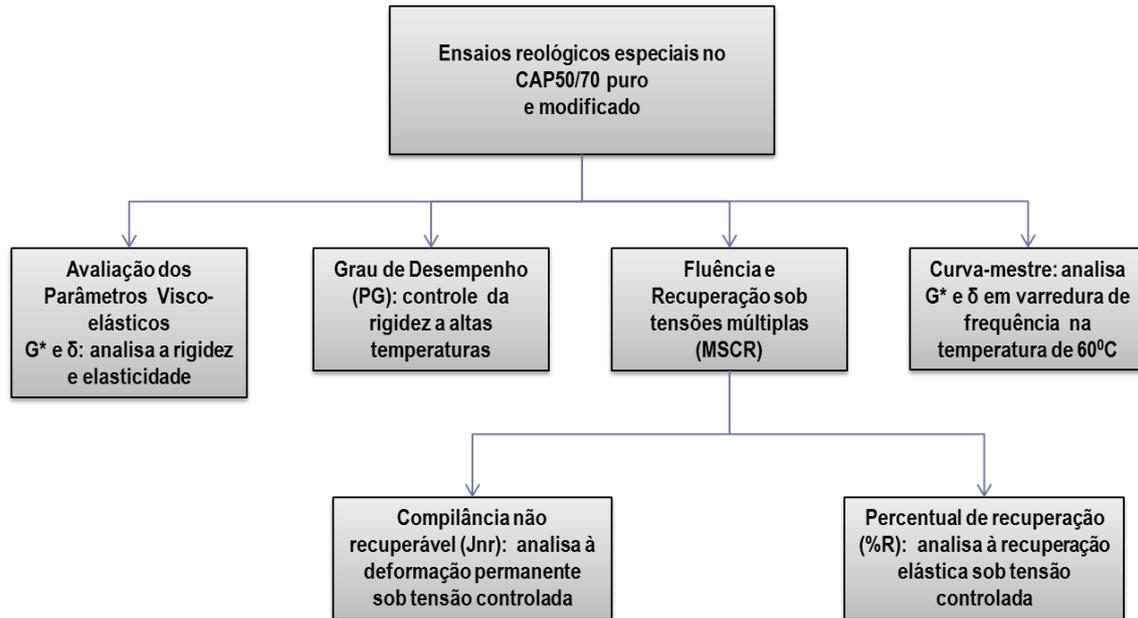
### 3.1.11 Ensaio de Ductilidade (DNIT-ME 163/98)

A ductilidade está relacionada com a capacidade do material de suportar grandes deformações (alongamento) sem se romper. Neste ensaio, uma amostra é moldada a temperatura ambiente, e em seguida é condicionada a temperatura de 25 °C por tempo determinado em norma. Logo após, a amostra é alongada a uma taxa de 5 cm/min até a ruptura, sendo o valor da ductilidade registrado como a distância em cm que a amostra é alongada até o rompimento.

### 3.1.12 Ensaios reológicos no Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)

Para a verificação e mensuração do comportamento reológico do CAP, denominado doravante de “ensaios reológicos especiais”, foi utilizado o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1). Segundo procedimento exemplificado no Fluxograma 3.3.

Os “ensaios reológicos especiais” foram realizados, também, na condição envelhecida á curto prazo ambos para o *CAP 50/70 Puro* e o *CAP Modificado* com as proporções de aditivos citadas anteriormente.



**Fluxograma 3.3.** Sequência de atividades utilizada para realização dos ensaios reológicos especiais.

No DSR foram realizados os seguintes ensaios:

- ensaios de avaliação dos parâmetros visco-elásticos: esses parâmetros, Módulo Complexo ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ), foram monitorados em varredura de temperatura e varredura de frequência. A varredura de temperatura foi realizada na faixa de 46 a 82<sup>0</sup>C, com variações de 6 em 6<sup>0</sup>C. As amostras do CAP foram submetidas à deformação de 12% e a uma frequência de 10 rad/s, que é relativa à velocidade de um automóvel a 90 km/h (SPECHT, et. al., 2002). Na varredura de frequência, na faixa de 0,1 a 100 Hz, os ensaios foram realizados a temperatura de 60<sup>0</sup>C, sendo essa temperatura considerada a temperatura típica de uso dos pavimentos (Fernandes, 2009).
- determinação do Grau de Desempenho: nessa pesquisa foi determinada a temperatura máxima do Grau de Desempenho (PG). Nesse ensaio, a determinação da temperatura máxima de PG é definida por meio de uma varredura de temperatura na faixa de 46 a 82<sup>0</sup>C, com variações de 6 em 6<sup>0</sup>C, a uma frequência de 10 rad/s e deformação de 12%, sendo a temperatura máxima de PG definida como aquela em que o parâmetro  $G^*/\sin\delta$  é superior a 1,0 KPa para o CAP Puro e 2,2 KPa para o CAP após RTFO.

- ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR): esse ensaio também avalia a resistência do CAP a deformação permanente e foi realizado na temperatura máxima de PG, com geometria de 25mm e gap de 1mm entre as placas, sendo o CAP submetido a tensão controlada, de 100 Pa e 3200 Pa, as quais são aplicadas por 1s e em seguida a amostra do CAP fica em repouso por 9s. Foram realizados dez ciclos de fluência e recuperação para cada tensão, na temperatura máxima do grau de desempenho.
- curva-mestre: para obtenção das curvas mestres das diferentes amostras estudadas foi realizado uma varredura de frequência na faixa de 0,1 a 100 Hz, sob tensão de cisalhamento constante e na faixa de temperatura de 46 a 82 °C.

Na Figura 3.8 estão apresentados os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios reológicos especiais.



**Figura 3.8.** Equipamento utilizados para a realização dos ensaios reológicos especiais (LEP/UFMG).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

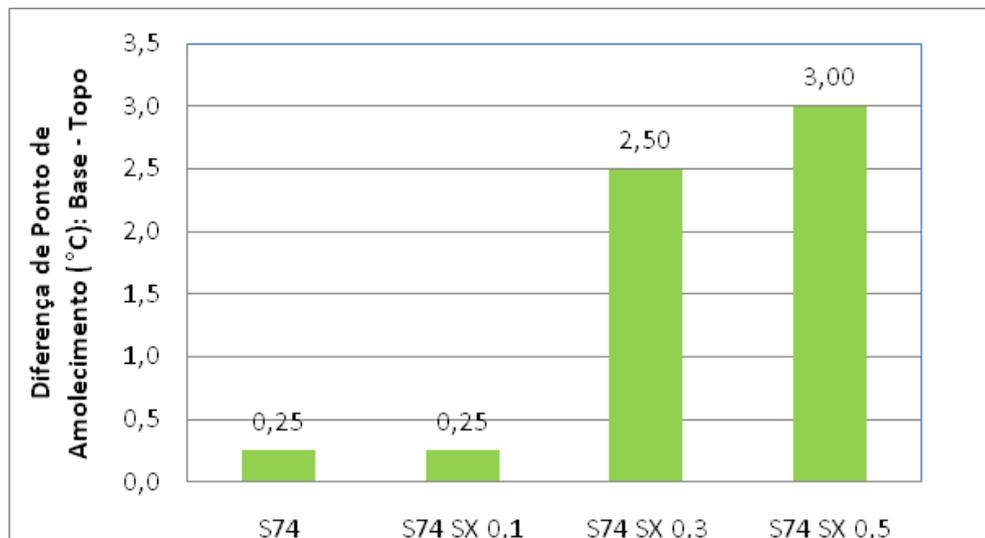
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das propriedades reológicas mensuradas a partir de ensaios convencionais e especiais.

### 1.12 Ensaio de estabilidade à estocagem

Na Tabela 4.1 e na Figura 4.1 são apresentados e lançados em gráficos, respectivamente, os resultados dos ensaios de estabilidade à estocagem realizados nas amostras do CAP modificado. Essa avaliação de compatibilidade foi observada a partir de uma análise comparativa entre os resultados do *Ensaio de Ponto de Amolecimento*, realizado no topo e na base das amostras do CAP modificado.

**Tabela 4.1.** Resultados do ensaio de estabilidade à estocagem.

Amostra	Ponto de amolecimento (°C)		Diferença
	Topo	Base	
S74	54,75	55,00	0,25
S74 SX 0,1	62,50	62,75	0,25
S74 SX 0,3	71,75	74,25	2,50
S74 SX 0,5	81,00	78,00	3,0



**Figura 4.1.** Estabilidade à estocagem lançada em gráfico.

Em função dos resultados expostos, observa-se que as amostras S74 apresentam uma diferença mínima entre a temperatura de amolecimento do topo e da base, indicando uma boa

estabilidade à estocagem dessas amostras. Tal fato podendo ser explicado pela reatividade do polímero Polímul S74.

Negrão (2006) também obteve boa estabilidade à estocagem para o CAP 20 e CAP 40 modificados com polímero reativo nos teores de 1,0%; 1,5% e 2,0%.

A adição do segundo polímero, o Polímul SX 500, promoveu a redução na capacidade à estocagem das amostras modificadas, sendo que as amostras do tipo S74 SX 0,5 apresentaram, entretodas as amostras, uma menor capacidade à estocagem. Nessas a temperatura média de amolecimento do topo foi de 81<sup>0</sup>C e a de amolecimento da base foi de 78 <sup>0</sup>C, resultando em uma diferença de 3<sup>0</sup>C. Entretanto as especificações da NBR 15166/2004 da ABNT, na qual é estabelecida o valor da diferença máxima entre a temperatura de amolecimento do topo e da base das amostras dos CAPs modificados por polímeros, determina que essa diferença de temperatura não deve ser superior a 4<sup>0</sup>C. Portanto pode-se inferir que todas as amostras modificadas apresentaram uma estabilidade à estocagem satisfatória.

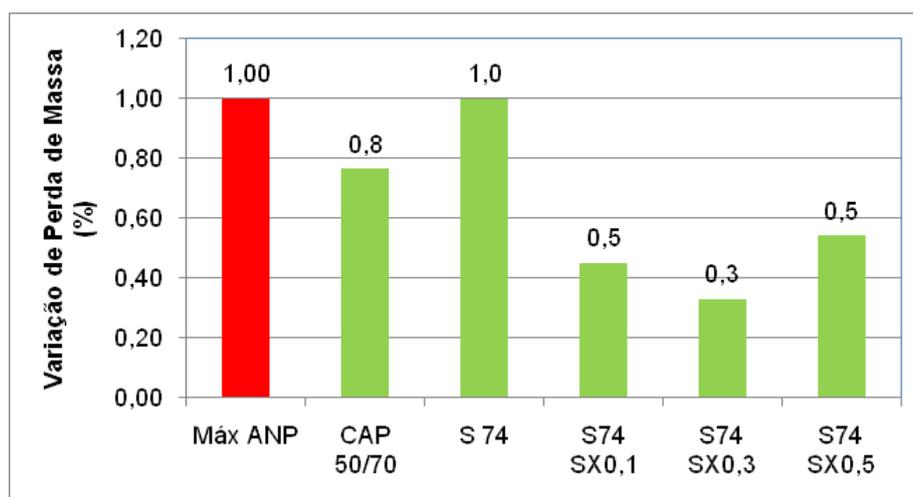
Ressalta-se, que o resultado satisfatório no ensaio de estabilidade à estocagem garante a eficácia do estudo das propriedades do CAP modificado, considerando-se esse, como um material de comportamento homogêneo.

### ***1.13 Procedimento de Envelhecimento à Curto Prazo***

Na Tabela 4.2 e na Figura 4.2 são apresentados e lançados em gráficos, respectivamente, os resultados do procedimentos de envelhecimento à curto prazo (RTFO).

**Tabela 4.2.** Resultados da variação de perda de massa após o procedimentonto de envelhecimento à curto prazo: RTFO – LEP/UFCG.

<b>Amostra</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>S74</b>	<b>S74 SX 0,1</b>	<b>S74 SX 0,3</b>	<b>S74 SX 0,5</b>
<b>Perda de massa (%)</b>	0,8	1,0	0,5	0,3	0,5



**Figura 4.2.** Resultados da variação de perda de massa após o procedimento de envelhecimento à curto prazo (RTFO – LEP/UFCCG).

Em função desses resultados pode-se observar que as amostras do S74 apresentaram uma perda de massa superior ao CAP 50/70. Estes resultados fazem indicar que estas amostras foram mais susceptíveis ao efeito do procedimento que simulou o envelhecimento à curto prazo.

Analisando os resultados referentes às amostras S74 SX 0,1; S74 SX 0,3 e S74 SX 0,5 em relação as amostras do CAP 50/70 e do S74, é notável uma redução no efeito do envelhecimento com a adição do Polímul SX-500. Entretanto, verificou-se que, o aumento do teor de Polímul SX-500 (0,1; 0,3;0,5) nas amostras, não ocasionou uma variação apreciável no efeito do envelhecimento.

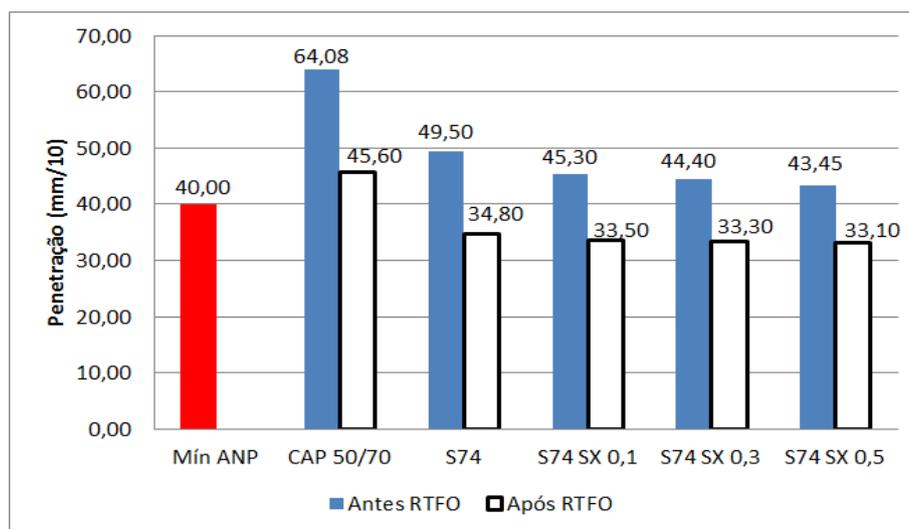
De tal maneira, comparando-se o CAP elastomérico de alto desempenho 60/85-E e considerando-se que o limite máximo de variação de massa estabelecido pelo regulamento técnico da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) n. 32 de 04/2010 para esse CAP é de 1%, verificou-se que todas as amostras do CAP modificado atenderam a supracitada exigência normativa (Figura 4.2).

### 1.14 Ensaio de Penetração

Na Tabela 4.3 e na Figura 4.3 são apresentados e lançados em gráficos, respectivamente, os resultados dos ensaios de penetração realizados nas amostras de CAPs Puros e Modificados, antes e serem submetidos ao envelhecimento à curto prazo (RTFO).

**Tabela 4.3.** Resultados do ensaio de penetração para os CAPs Puros e Modificados com e sem envelhecimento à curto prazo.

Amostra	Penetração (mm/10)	
	Antes do RTFO	Após o RTFO
CAP 50/70	64,08	45,60
S74	49,50	34,80
S74 SX 0,1	45,30	33,50
S74 SX 0,3	44,40	33,30
S74 SX 0,5	43,45	33,10



**Figura 4.3.** Resultados do ensaio de penetração com e sem envelhecimento à curto prazo lançado em gráficos.

Pode-se verificar que com adição dos modificadores (Polímero Reativo, do ácido PPA116% e do PEBD) ocorreu uma redução dos valores da penetração, indicando que houve aumento da rigidez nas amostras do CAP Modificado em relação às amostras do CAP Puro.

A redução significativa nos valores da penetração para as amostras S74 pode ter ocorrido em função da característica específica deste tipo de polímero, que ao reagir quimicamente com os constituintes químicos do tipo asfaltenos formam uma estrutura única.

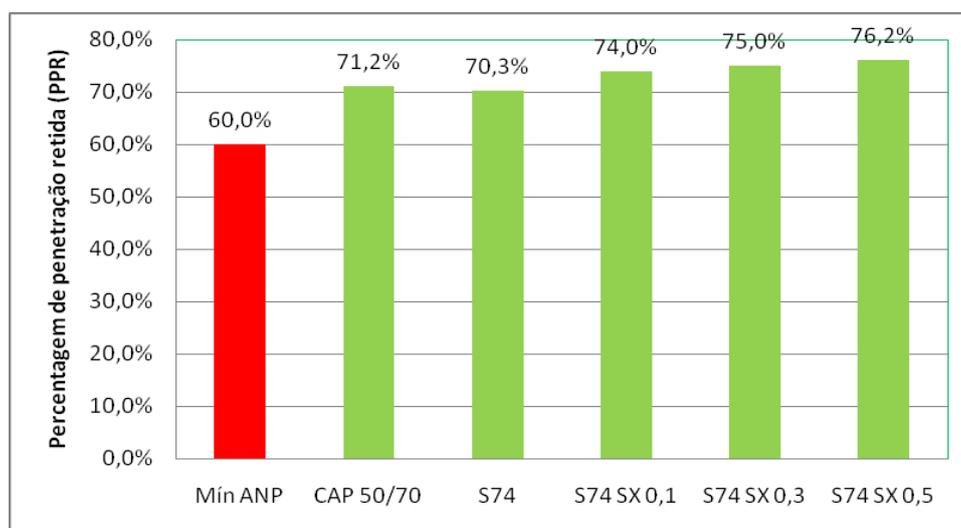
A redução da penetração é menos intensa com a adição do SX500 nas demais amostras. Negrão (2006) também observou uma redução no valor da penetração em estudo realizado no CAP 40 Modificado com a adição do Polímero do tipo Reativo.

Lima (2008) relata que a diminuição da penetração é um resultado importante, pois indica uma maior rigidez do material, resultando em um pavimento mais resistente às cargas do trânsito e a temperatura ambiente mais elevada.

Em relação aos valores de Penetração Retida, ou seja, obtidos pela razão antes e após as amostras serem submetidas ao envelhecimento à curto prazo (RTFO), a mudança na composição química dos CAPs puro e modificado promoveu aumento dos valores da relação (Tabela 4.4 e na Figura 4.4).

**Tabela 4.4.** Penetração Retida para os CAPs puros e modificados.

Amostra	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
Penetração retida (%)	71,2	70,3	74,0	75,0	76,2



**Figura 4.4.** Resultados lançados em gráficos do parâmetro de Penetração Retida.

Dessa forma, constata-se que o valor da penetração retida obtida na amostra CAP 50/70 foi de 71,2%, comparando-se esse valor com o valor da penetração retida obtida nas amostras modificadas, temos: em relação à amostra S74 ocorreu uma redução da penetração retida, o que caracteriza um aumento da sensibilidade do material ao envelhecimento com a adição do PPA 116% e do polímero reativo, em contrapartida, nas amostras de S74 SX 0,1; S74 SX 0,3; S74 SX 0,5, a adição do segundo polímero (Polimul SX500) promoveu um efeito benéfico, que pode ser constatado com o aumento gradativo do valor da penetração retida, com o aumento do teor do polímero.

Segundo o Regulamento Técnico n.3 (RT n. 3) de 04/2010 da ANP, para o CAP elastomérico de alto desempenho, o valor mínimo da penetração antes do envelhecimento à curto prazo é de 40 mm/10. Tomando esse valor como referencial, pode-se inferir que a amostra S74 SX 0,5 apresentou o melhor resultado, entre as amostras estudadas, ficando acima

do limite estabelecido.

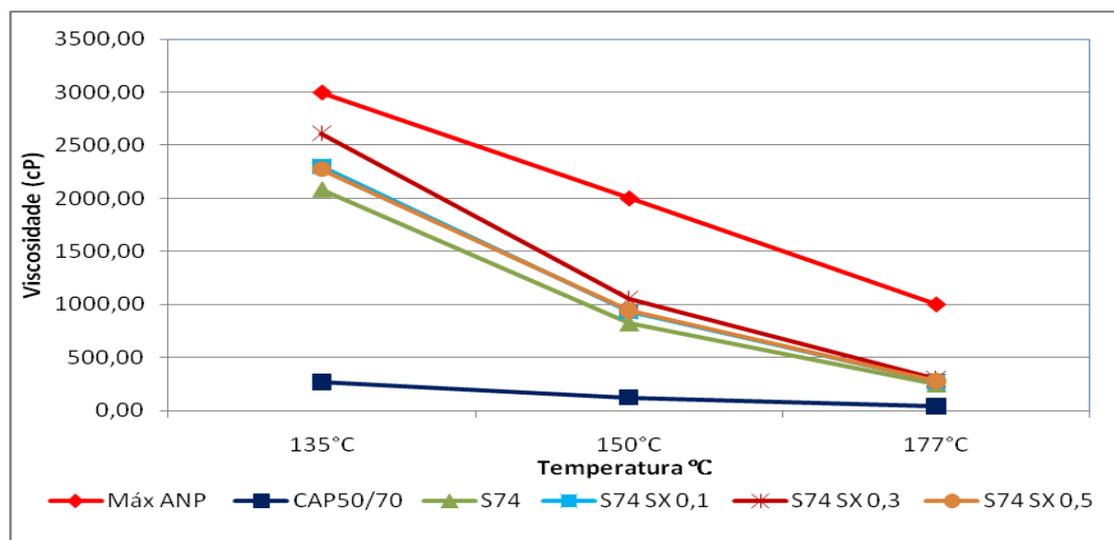
De acordo com o Regulamento da ANP, para a penetração retida este limite mínimo é de 60%, assim, comparando-se esse valor com o valor de 76,2%, obtido para a penetração retida da amostra S74 SX 0,5, constata-se que essa amostra apresentou um melhor resultado, sobre a ótica da penetração retida, em termos de ganho de consistência, rigidez e sensibilidade ao envelhecimento.

### 1.15 Ensaio de Viscosidade Rotacional

Este ensaio é utilizado para mensurar a viscosidade do CAP em temperaturas que simulam as etapas de produção que correspondem ao transporte, a usinagem e a compactação em campo, assegurando assim a adequada trabalhabilidade do material. Os resultados da viscosidade dos CAPs Puro e Modificado são apresentados e lançados em gráfico, respectivamente, na Tabela 4.5 e na Figura 4.5.

**Tabela 4.5.** Resultados da Viscosidade Brookfield.

Amostra/ Leituras	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
135 °C	270,00	2087,50	2300,00	2612,50	2275,00
150 °C	124,00	825,00	935,00	1055,00	945,00
177 °C	41,00	250,00	275,00	300,00	280,00



**Figura 4.5.** Resultados lançados em gráficos da viscosidade rotacional obtidas com o Viscosímetro Brookfield.

A partir dos resultados apresentados pode-se inferir que houve um incremento na viscosidade rotacional do CAP 50/70 com a adição dos agentes modificadores. Este incremento é maior na amostra S74 SX 0,3 atingindo o valor máximo de 2612,50 cP, a temperatura de 135 °C. Com o aumento do teor do segundo polímero (Polimul SX500), na amostra S74 SX 0,5, há uma redução da viscosidade, proporcionando a amostra menor rigidez quando comparada com os resultados obtidos para a amostra S74 SX 0,3, que provavelmente pode ser explicado pela saturação do CAP pela adição a polímero.

Os resultados obtidos neste trabalho corroboram com os obtidos por Tomé et al. (2005). O autor observou um incremento de viscosidade rotacional do CAP 50/60 com a adição do Polímero Reativo e constatou que esse CAP Modificado apresentou uma maior resistência a deformação permanente quando comparado ao CAP50/60 Puro.

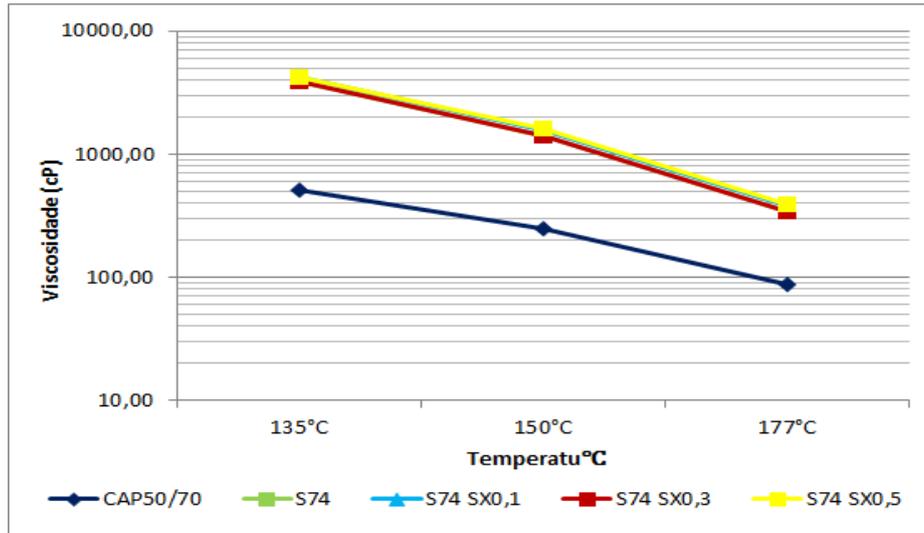
Junior (2004) ressalta que uma maior viscosidade dos CAPs modificados resulta em uma película de CAP mais espessa sobre os agregados, melhorando assim, a adesividade, à resistência aodano por umidade induzida, a resistência a intempéries e conseqüentemente pode sugerir um aumento da vida útil do revestimentos asfáltico.

O Regulamento Técnico de n.32 da ANP para CAPs elastoméricos de alto desempenho (6085/E) determina os limites máximos para a viscosidade rotacional de 3000, 2000 e 1000 Cp para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, respectivamente. Observa-se que nas amostras modificadas os valores não atingiram os limites máximos sugeridos. Pode-se inferir que, apesar do ganho de viscosidade e conseqüentemente aumento de rigidez, estes CAPs, quando adicionados a mistura com os agregados terão trabalhabilidade satisfatória sem restrição nas operações no processo de bombeamento, manuseio e aplicação.

Na Tabela 4.6 e na Figura 4.6 estão inseridos e lançados em gráfico os valores de viscosidade rotacional inerentes aos CAPs Puro e Modificado, após o procedimento de envelhecimento á curto prazo (RTFO).

**Tabela 4.6.** Resultados de Viscosidade Rotacional – Viscosímetro Brookfield após RTFO – LEP/UFCG.

<b>Amostra/ Leituras</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>S74</b>	<b>S74 SX 0,1</b>	<b>S74 SX 0,3</b>	<b>S74 SX 0,5</b>
135 °C	512,50	3862,50	4262,50	3912,50	4200,00
150 °C	249,00	1420,00	1580,00	1405,00	1595,00
177 °C	87,00	342,50	380,00	337,50	390,50



**Figura 4.6.** Resultados lançados em gráficos da viscosidade rotacional obtidas com o Viscosímetro Brookfield após RTFO – LEP/UFCG.

Após o procedimento de envelhecimento à curto prazo as amostras do CAP50/70 e os CAPs Modificados apresentaram maiores valores de viscosidade rotacional em função do efeito deste procedimento. Este efeito pode ser entendido como um aumento da concentração dos constituintes mais pesados dos CAPs (resinas e asfaltenos) que, por sua vez, contribuem para um aumento da viscosidade do asfalto.

Em geral, os resultados indicam que sob baixas temperaturas (135<sup>0</sup>C) as amostras de CAPs modificados apresentaram um incremento acentuado da viscosidade em relação à amostra de CAP50/70 puro. Entretanto, sob a temperatura (177<sup>0</sup>C) as amostras de CAPs modificados não apresentam grandes discrepâncias quando comparadas a amostra de CAP Puro.

Na Tabela 4.7 estão apresentados os valores do índice envelhecimento de viscosidade referentes aos CAPs Puro e Modificados

**Tabela 4.7.** Valores do índice de envelhecimento de viscosidade (VAI).

Amostra/ Leituras	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX0,3	S74 SX 0,5
135 <sup>0</sup> C	89,81	85,03	85,33	49,76	84,62
155 <sup>0</sup> C	100,81	72,12	68,98	33,18	68,78

177 °C	112,20	37,00	38,18	12,50	39,46
--------	--------	-------	-------	-------	-------

.Analisando os resultados pode-se inferir que todas as amostras modificadas apresentam, nas três temperaturas estudadas, menor sensibilidade ao envelhecimento quando comparadas ao CAP 50/70. Entre as amostras modificadas as do tipo S74 SX 0,1 apresentaram uma maior resistência ao envelhecimento, sendo evidenciado por menores valores do parâmetro VAI.

### ***1.16 Ensaio de Ponto de Amolecimento (Método do anel e bola)***

Na Tabela 4.8 e na Figura 4.7 estão inseridos e lançados em gráfico, respectivamente, os resultados do parâmetro “Ponto de Amolecimento” para as amostras do CAP Puro e Modificado, na condição com e sem o envelhecimento á curto prazo (RTFO).

Tabela 4.8. Resultados do ensaio de ponto de amolecimento – LEP/UFCG.

Amostra	Ponto de amolecimento (°C)	
	Antes do RTFOT	Após o RTFOT
CAP 50/70	45,00	47,50
S74	62,50	65,50
S74 SX 0,1	66,63	70,75
S74 SX 0,3	73,75	80,25
S74 SX 0,5	78,50	83,50

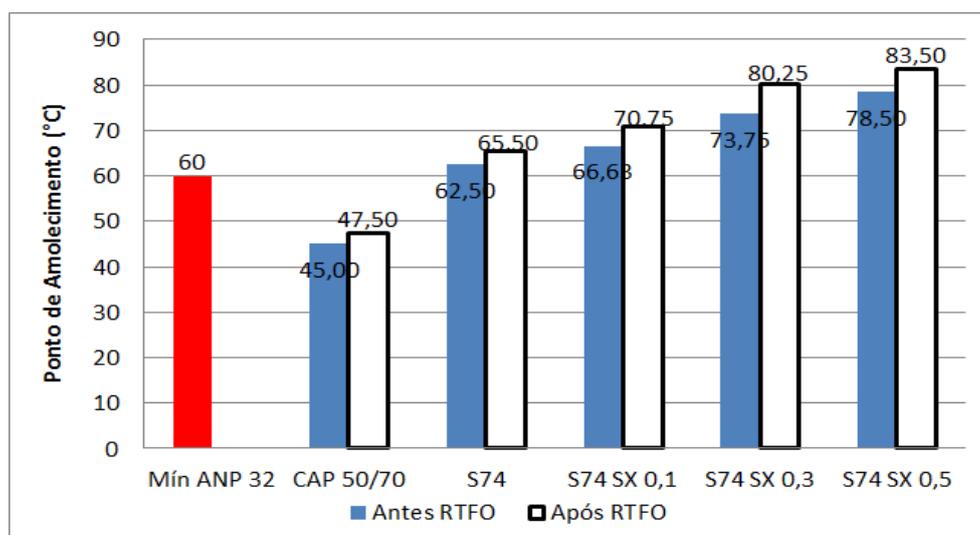


Figura 4.7. Resultados lançados em gráficos do ensaio de ponto de amolecimento.

Pode-se observar que a adição dos agentes modificadores promoveu o aumento gradativo do parâmetro “Ponto de Amolecimento” do CAP até atingir o valor máximo de 78,50 na amostra S74 SX 0,5. Este incremento pode justificar-se pela variação da viscosidade, como observado no item anterior.

Segundo Faxina (2006) esse aumento é considerado um efeito benéfico, tendo em vista que quanto maior o ponto de amolecimento, maior a contribuição do CAP na resistência da mistura asfáltica a deformação permanente.

Silva (2004) relata que altos valores de ponto de amolecimento são favoráveis às condições de uso do material, uma vez que o CAP não amolecerá em dias quentes, porém é necessário maior energia para os trabalhos de aplicação. Em relação ao aumento da rigidez do CAP, os valores de ponto de amolecimento observados estão relacionados ao efeito do envelhecimento à curto prazo.

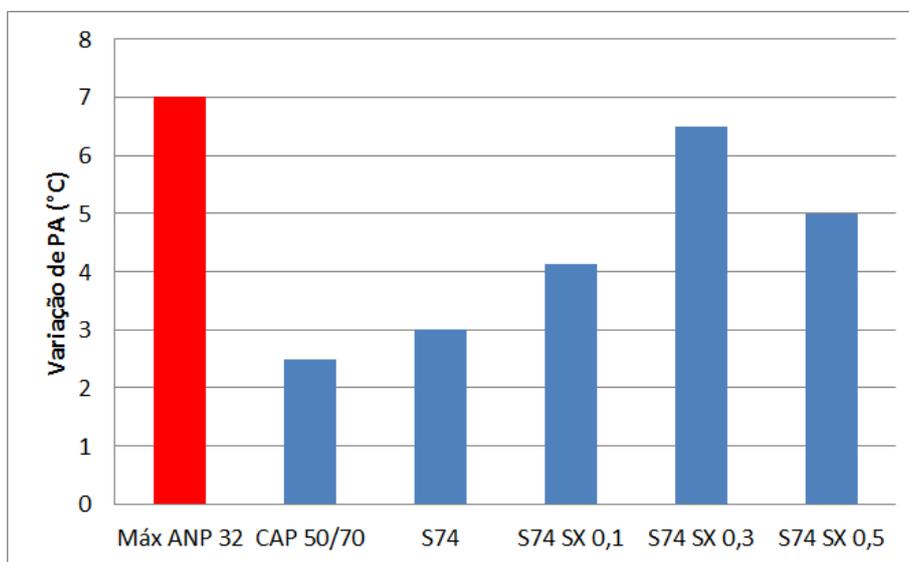
Comparando os resultados de ponto de amolecimento obtidos para as amostras puras e modificadas com o limite mínimo de ponto de amolecimento ( $60^{\circ}\text{C}$ ), estabelecido pela ANP para o CAP elastomérico de alto desempenho, constata-se que: as amostras do tipo CAP 50/70 apresentavam ponto de amolecimento abaixo do limite especificado, entretanto, com a adição dos modificadores todas as amostras superaram o valor limite. Estes resultados indicam que as modificações promovidas pelos aditivos foram positivas e sugerem que, se utilizadas em serviços, podem aumentar a resistência a deformação permanente sob temperaturas elevadas.

Na Tabela 4.9 e na Figura 4.8 são apresentados e lançados em gráfico, respectivamente,

a variação dos valores do Ponto de amolecimento obtidos antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo com o RTFO.

**Tabela 4.9.** Valores da variação de ponto de amolecimento antes e depois do envelhecimento à curto prazo.

Amostra	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
Varição do ponto de amolecimento (°C)	2,5	3,0	4,13	6,5	5,0



**Figura 4.8.** Valores lançados em gráfico da variação de ponto de amolecimento antes e depois do envelhecimento à curto prazo.

Analisando os resultados em relação aos critérios pré-estabelecidos pela ANP, onde a variação do parâmetro supracitado é de -5 a +7 para CAPs elastoméricos de alto desempenho 60/85-E, podemos inferir que amostras estão de acordo com a exigência estabelecidas

### 3.1.13 4.5.1 Avaliação do Índice de Susceptibilidade Térmica

Segundo as especificações brasileiras o Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) ou Índice de Penetração (IP) para CAPs convencionais pode variar entre (-1,5) e (+0,7). Esta limitação se deve ao fato de que estes ao apresentarem valores maiores que (+1) podem estar

oxidados, ou seja, pouco sensíveis a temperaturas elevadas e quebradiços quando a temperatura é baixa. Em relação a valores menores que (-2) os CAPs se tornam sensíveis a altas temperaturas, ou seja, ficam fluidos prematuramente (Gusmão, 2009). Na Tabela 4.10 são apresentados os valores do IST obtidos para as amostras estudadas.

De acordo com Bernuncci et. al. (2010) é desejável que o CAP apresente variações pequenas de propriedades mecânicas nas temperaturas de serviço, ou seja, o CAP deve manter suas características reológicas inalteradas sob uma larga faixa de temperatura.

Araújo (2009) ressalta que, em regiões de clima predominantemente frios o CAP deve ser mais flexível o que minimiza prováveis fissuras por retração térmica nos revestimentos asfálticos. Em regiões de clima quente, como no caso do Brasil, devem ser utilizados CAPs com maior ponto de amolecimento, maior viscosidade e baixa susceptibilidade térmica, o que aumenta a resistência as deformações permanentes. Além disto, os CAPs com alta susceptibilidade térmica não devem ser utilizados em revestimento de pavimentos sujeitos ao tráfego pesado, lento e canalizado e sob temperaturas elevadas.

**Tabela 4.10.** Valores do IST das amostras estudadas.

Amostra	Índice de susceptibilidade térmica (C)	
	Antes do RTFO	Após o RTFO
CAP 50/70	-1,40	-1,20
S74	1,50	1,20
S74SX0,1	2,02	1,98
S74SX0,3	3,12	3,35
S74SX0,5	3,76	3,76

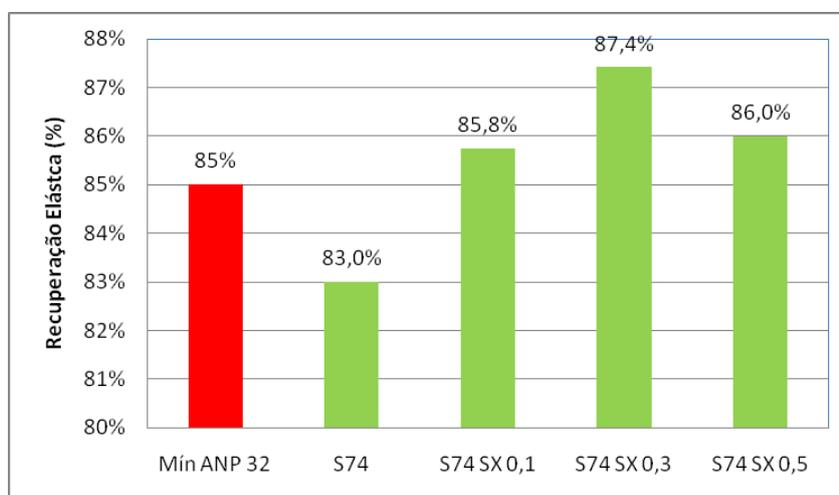
A partir dos dados apresentado acima, verifica-se que, para todas as amostras de CAPs modificado o valor do IST atingiu valores superiores ao limite de +0,7 estabelecido para CAPs Puros. Entretanto, para Negrão (2006) os CAPs Modificados com polímeros do tipo RET são menos sensíveis a temperaturas elevadas do que os CAPs Puros, logo para esses valores de IST superiores a (+0,7) não representam um problema, já que estes CAPs são menos sensíveis a temperaturas elevadas, sem se tornarem quebradiços a temperaturas baixas.

### 1.17 Ensaio de Recuperação Elástica

Os valores encontrados para o parâmetro “Recuperação Elástica”, mensurada a 25 °C, para as amostras dos CAPs Modificados estão apresentados e lançados em gráfico na Tabela 4.11 e na Figura 4.9, respectivamente.

**Tabela 4.11.** Resultados do ensaio de Recuperação Elástica.

Amostra	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
Rec. Elástica (%)	83,0	85,8	87,4	86,0



**Figura 4.9.** Valores lançados em gráfico de Recuperação Elástica.

Verifica-se que com a adição dos modificadores a um aumento da capacidade de retorno do material, indicando maior elasticidade e flexibilidade das amostras modificadas em relação ao CAP 50/70, o qual apresentou retorno elástico a nível desprezível. Contudo, as amostras S74 SX 0,5 obtiveram valor de recuperação elástica de 86,0% caracterizando uma redução de elasticidade, quando comparadas ao valor de 87,4% obtido para as amostras S74 SX 0,3. Essa redução da elasticidade pode possivelmente ser justificada pelo fato do polietileno ser um polímero a base de poliolefina e quando essas são adicionadas ao CAP geralmente incham por absorção de parte dos componentes leves do CAP sendo formada uma estrutura bifásica com uma fase de poliolefina (fase dispersa) e uma fase de asfalto (fase contínua) podendo assim melhorar as propriedades do asfalto consideravelmente. Entretanto com o aumento da quantidade do polietileno (poliolefina) ocorre a saturação do CAP, que pode ser

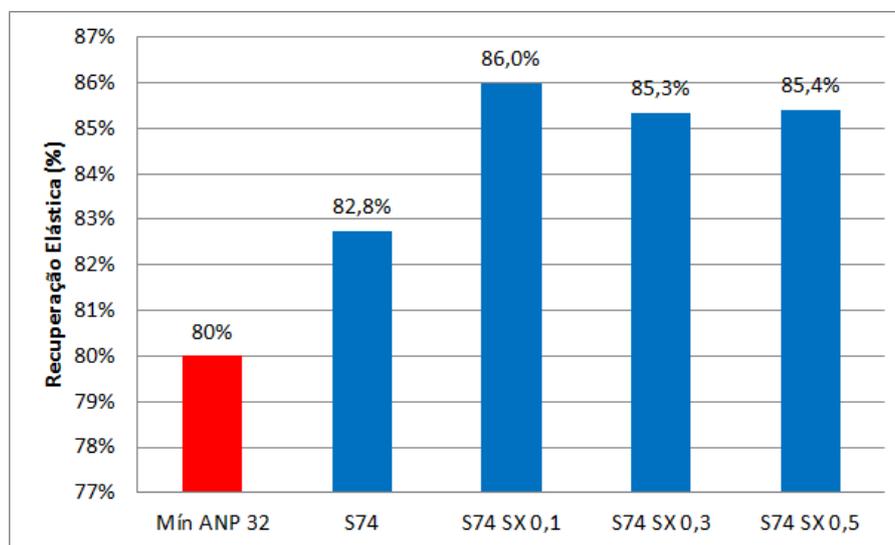
entendida como uma inversão de fase e consequente limitação das melhorias nas propriedades do CAP.

No tocante ao valor limite mínimo da elasticidade de 85%, estabelecido para o CAP elastomérico de alto desempenho 60/85-E, os resultados indicam que esse só é alcançado, e superado, para as amostras S74 SX 0,1; S74 SX 0,3 e S74 SX 0,5, ficando a amostra S74 abaixo do valor especificado.

Na Tabela 4.12 e na Figura 4.10 são apresentados os resultados de recuperação elástica obtidos para as amostras modificadas após o procedimento de envelhecimento à curto prazo (RTFO).

**Tabela 4.12.** Resultados do ensaio de recuperação elástica após envelhecimento à curto prazo.

Amostra	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
Rec. Elástica após RTFO (%)	82,8	86,0	85,3	85,4



**Figura 4.10.** Valores lançados em gráfico dos valores de recuperação elástica após o envelhecimento à curto prazo.

Diante dos resultados expostos, percebe-se que o efeito deste procedimento não afetou de forma significativa a recuperação elásticas das amostras S74; S74 SX 0,1, pois, nestas pode-se considerar que a elasticidade foi minimamente alterado após o envelhecimento à curto

prazo. Em relação, as amostras S74 SX 0,3 e S74 SX 0,5 ocorreu uma notável redução do valor da elasticidade nas duas amostras, podendo-se considerar que esse valor se manteve constante ao atingir 85,3%.

Comparando os valores da elasticidade após o envelhecimento, com o valor mínimo de 80%, estabelecido para o CAP elastomérico de alto desempenho 60/85-E, nota-se que todas as amostras estão acima da exigência mínima.

### ***1.18 Ensaio de Ductilidade***

De acordo com Lima (2008) a ductilidade é uma propriedade importante pois avalia a plasticidade necessária do material quando a base esta sujeita a variações volumétricas.

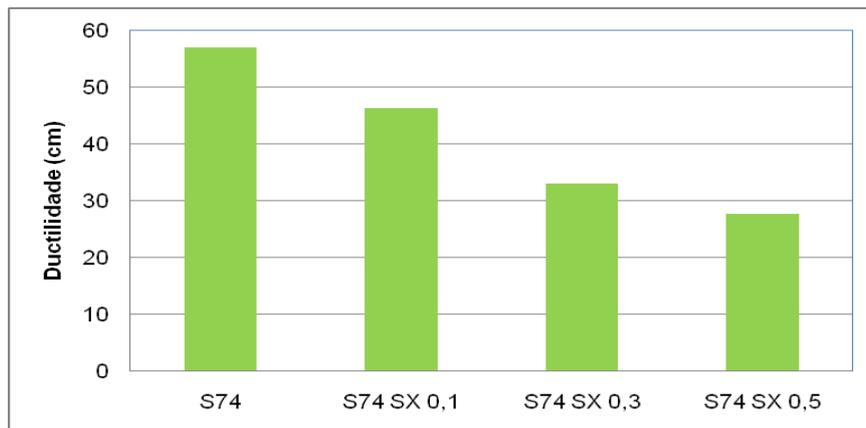
Negrão (2006) ressalta que certa ductilidade é necessária para que o CAP possa acompanhar as variações dimensionais dos materiais nos quais ele esta aplicado, sem fissurar ou gretar (abrir fendas).

Entretanto, cabe evidenciar que, tanto altas como baixas ductilidades, podem provocar defeitos no revestimento. Quando se tem altas ductilidades, o CAP é mais susceptível a temperatura e podem ocorrer ondulações no pavimento devido ao tráfego, enquanto que, na condição de baixa ductilidade, estudos indicam que o CAP pode está oxidado podendo ocorrer fissuras e até o rompimento do revestimento por tração (Amaral, 2000).

Na Tabela 4.13 e na Figura 4.11 são apresentados os resultados obtidos para a ductilidade das amostras que continham os CAPs Modificados.

**Tabela 4.13.** Resultados do ensaio de ductilidade.

<b>Amostra</b>	<b>S74</b>	<b>S74 SX 0,1</b>	<b>S74 SX 0,3</b>	<b>S74 SX 0,5</b>
<b>Ductilidade (cm)</b>	57,00	46,33	33,00	27,70



**Figura 4.11.** Valores lançados em gráfico dos valores do ensaio de ductilidade.

O CAP 50/70 apresentou uma ductilidade superior a 150 cm, assim observando os resultados verifica-se que a ductilidade está diminuindo com a adição dos polímeros, chegando a um valor mínimo de 27,70 cm. Esses resultados indicam que a adição dos polímeros reduz a plasticidade dos CAPs.

Negrão (2006) também obteve uma redução no valor da ductilidade em CAPs modificados com polímero do tipo RET quando comparados com o CAP convencional. Entretanto, segundo esse autor, o essencial é que os CAPs apresentem, mesmo após a adição do polímero RET, valores de ductilidade superiores a 10 cm garantindo que esses não estão oxidados.

### ***1.19 Ensaios Reológicos no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)***

A seguir serão apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos estudos das propriedades reológicas especiais com o auxílio do DSR.

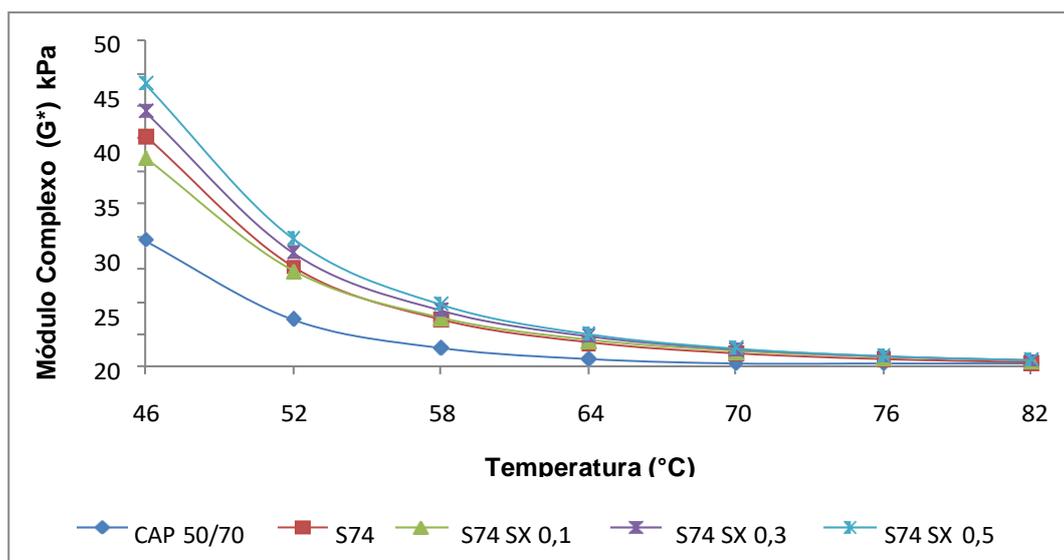
#### *✓ Monitoramento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) e da $\tan \delta$ em Varredura de Temperatura*

Como já mencionado, o Módulo Complexo está relacionado com a rigidez do CAP e representa a resistência imposta pelo material à deformação permanente. Na Tabela 4.14 e na Figura 4.12 estão apresentadas as variações do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da

temperatura, para o CAP Puro e Modificado.

**Tabela 4.14.** Módulo Complexo ( $G^*$ ) versus temperatura.

Amostra/Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
	Módulo complexo ( $G^*$ )				
46	19,40	35,3	32,00	39,20	43,50
52	7,35	15,3	14,70	17,60	19,80
58	2,99	7,22	7,45	8,75	9,68
64	1,30	3,72	4,06	4,77	5,13
70	0,61	2,02	2,35	2,77	2,91
76	0,61	1,14	1,43	1,69	1,75
82	0,61	0,65	0,89	1,07	1,10



**Figura 4.12.** Curvas do Módulo Complexo ( $G^*$ ) versus temperatura.

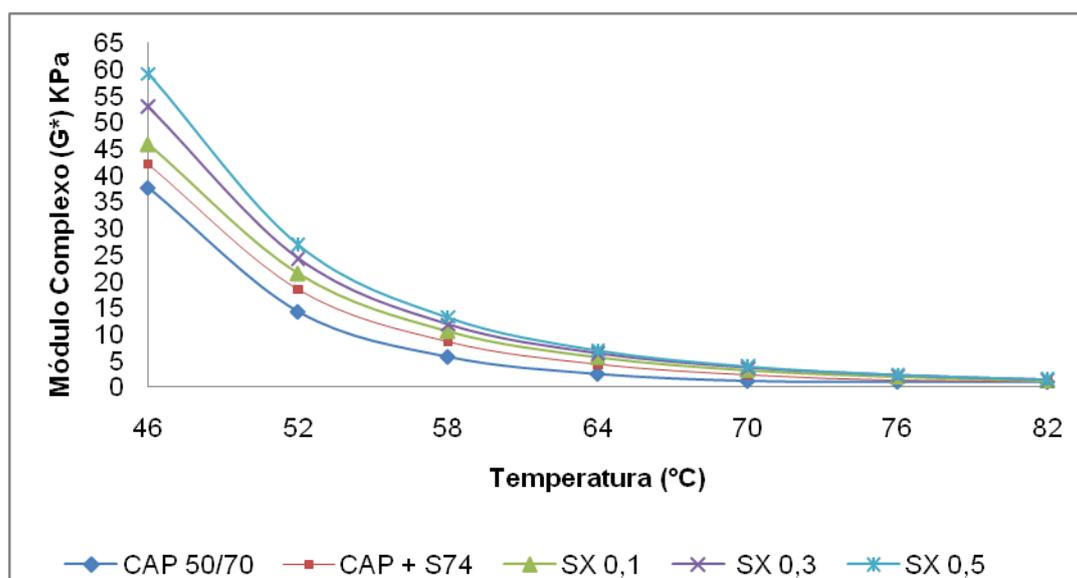
Observa-se um incremento expressivo no valor do Módulo Complexo para a amostra S74 em relação ao CAP50/70 Puro. Possivelmente este incremento é atribuído a mudança na estrutura química do CAP com a adição do polímero reativo. Para as demais amostras S74 SX 0,1; S74 SX 0,3 e S74 SX 0,5 a adição do segundo polímero (Polimul SX500) proporcionou variações no Módulo Complexo, de tal maneira que os maiores valores deste parâmetro são percebidos nos valores para a amostra S74 SX 0,5.

De acordo com Fernandes (2009) a faixa de serviço do pavimento limita-se a temperatura de 70<sup>0</sup>C, assim, torna-se válido salientar que todas as amostras modificadas apresentaram um aumento significativo do Módulo Complexo até essa temperatura. Entretanto, após esta, pode-se considerar que o aumento gradativo da temperatura proporcionou a formação de um patamar, indicando que sob altas temperaturas essas amostras terão praticamente o mesmo nível de qualidade, em termos de rigidez.

Na Tabela 4.15 e a Figura 4.13 estão inseridas as variações do valor do Módulo Complexo (G\*) em função da temperatura, para os CAPs Puro e Modificados, após o envelhecimento a curto prazo.

**Tabela 4.15.** Módulo Complexo (G\*) versus temperatura após envelhecimento à curto prazo.

Amostra/Temperatura ( <sup>0</sup> C)	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
	Módulo complexo (G*)				
46	37,70	35,5	45,80	53,00	65,30
52	14,20	14,8	21,40	24,30	30,00
58	5,65	6,74	10,50	11,80	15,00
64	2,41	3,28	5,60	6,32	8,09
70	1,08	1,70	3,15	3,61	4,66
76	1,08	0,91	1,91	2,17	2,82
82	1,08	0,50	1,15	1,36	1,79



**Figura 4.13.** Curvas de  $G^*$  versus temperatura após envelhecimento à curto prazo.

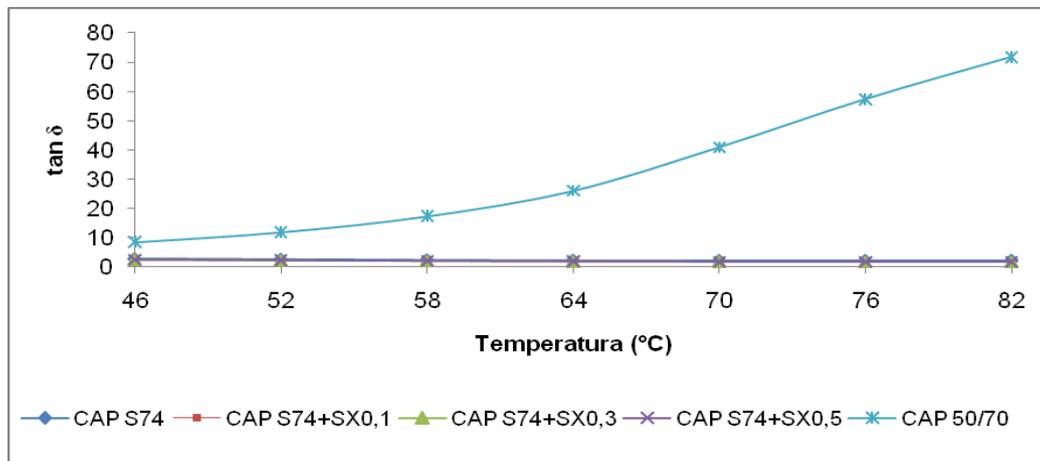
Após o envelhecimento à curto prazo, observa-se, em geral, um aumento no valor do Módulo Complexo das amostras estudadas. De forma clara, os valores do Módulo Complexo de todas as amostras de CAPs Modificados permaneceram com valores superiores aos da amostra de CAP Puro, indicando um ganho de rigidez, refletido e intensificado pós envelhecimento.

Em relação à  $\tan \delta$  pode-se resumir que esse parâmetro é utilizado para avaliar as melhorias nas propriedades elásticas do CAP Modificado, sendo esta indicada por uma redução dos valores deste parâmetro, em relação ao CAP Puro. Na Tabela 4.16 e na Figura 4.14 estão inseridos as variações do parâmetro  $\tan \delta$  versus temperatura, para os CAPs Puro e Modificados.

**Tabela 4.16.** Valores da variação da  $\tan \delta$  versus temperatura.

Amostra/Temperatura (°C)	CAP50/70	S74	S74 SX0,1	S74 SX0,3	S74 SX0,5
	$\tan \delta$				
46	8,51	2,66	2,55	2,45	2,41
52	11,91	2,46	2,31	2,24	2,25
58	17,35	2,28	2,12	2,03	2,06
64	26,04	2,14	1,97	1,87	1,91
70	40,94	2,08	1,89	1,77	1,80

76	57,33	2,07	1,86	1,72	1,74
82	71,68	2,12	1,87	1,70	1,72

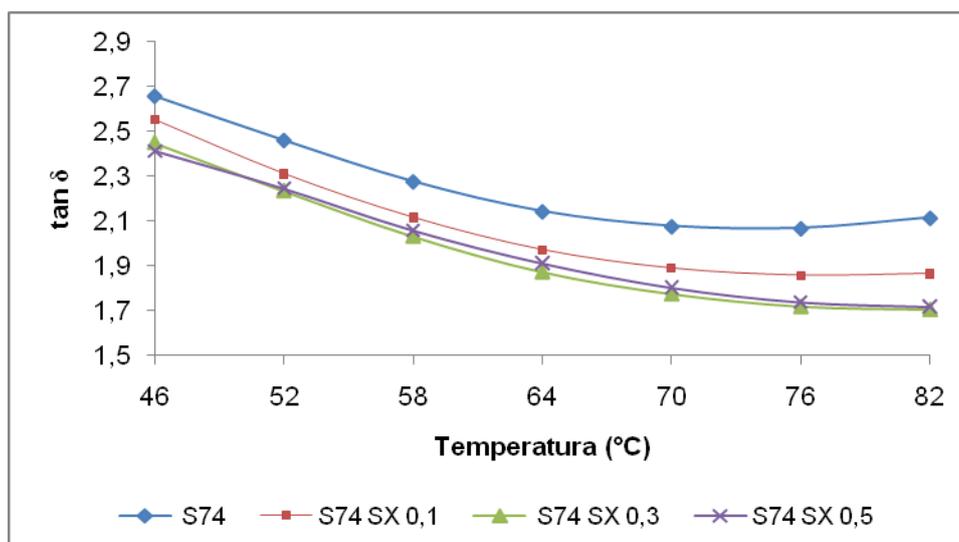


**Figura 4.14.** Variação da  $\tan \delta$  versus temperatura lançada em gráfico.

Os resultados obtidos permitem uma análise comparativa entre a elasticidade dos CAP Puro e Modificados. Verifica-se, para o CAP Puro um incremento contínuo do valor da  $\tan \delta$  com o aumento da temperatura. Isto faz indicar a perda gradativa da elasticidade do material. Por outro lado, em geral, os CAPs com adição dos modificadores apresentaram uma redução dos valores da  $\tan \delta$  indicando uma melhoria na elasticidade do material.

Com o objetivo de melhorar a visualização dos resultados obtidos, destaca-se na Figura 4.15 a variação de  $\tan \delta$  versus temperatura para o CAP Modificado.

**Figura 4.15.** Variação da  $\tan \delta$  versus temperatura no CAP Modificado.

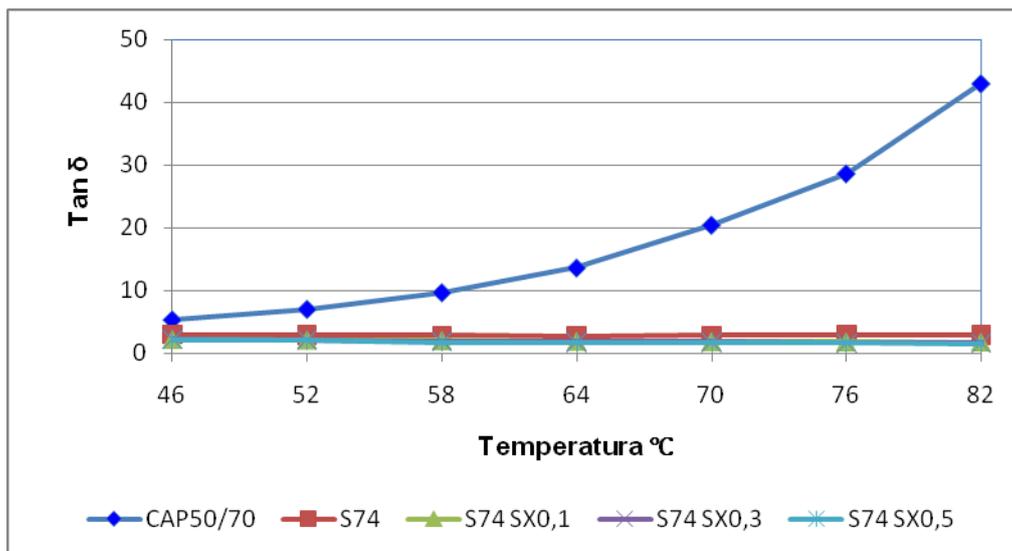


Observando os resultados para as amostras modificadas percebe-se que a redução nos valores da  $\tan \delta$  se dá simultaneamente com o incremento dos teores do SX500. Entretanto, é perceptível um leve aumento nos valores da  $\tan \delta$  para a amostra S74 SX 0,5 em relação à amostra S74 SX 0,3, o que pode ser um indicativo da possível saturação do CAP pelo Polímero SX500.

Na Tabela 4.17 e nas Figuras 4.16 e 4.17 estão inseridas as variações do parâmetro  $\tan \delta$  versus temperatura, para os CAPs Puro e Modificado após o envelhecimento à curto prazo.

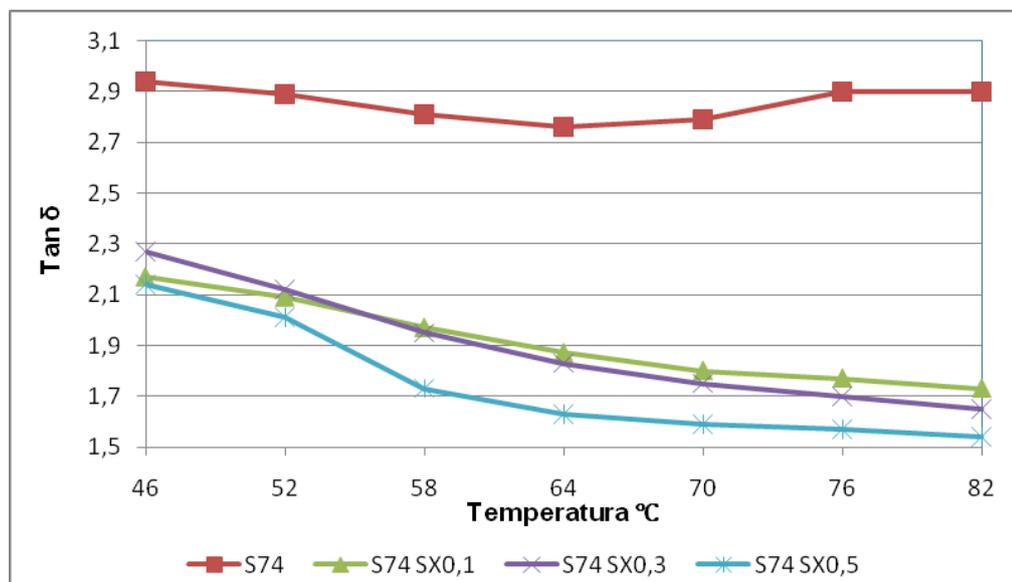
**Tabela 4.17.** Variação da  $\tan \delta$  versus temperatura, após envelhecimento à curto prazo.

Amostra/Temperatura (°C)	CAP50/70	S74	S74 SX0,1	S74 SX0,3	S74 SX0,5
	$\tan \delta$				
46	5,34	2,94	2,17	2,27	2,14
52	7,03	2,89	2,09	2,12	2,01
58	9,68	2,81	1,97	1,95	1,73
64	13,62	2,76	1,87	1,83	1,63
70	20,45	2,79	1,80	1,75	1,59
76	28,65	2,90	1,77	1,70	1,57
82	29,10	2,90	1,73	1,65	1,54



**Figura 4.16.** Variação de  $\tan \delta$  versus temperatura dos CAPs Puro e Modificado após envelhecimento à curto prazo.

Constata-se que após o envelhecimento à curto prazo, ocorreu um incremento na elasticidade do CAP. Percebe-se, que o aumento da elasticidade é proporcional ao aumento do teor do Polimul SX500. Este comportamento pode ser associado ao incremento da proporção de óleos aromáticos, que por sua vez oxidam facilmente durante o procedimento de envelhecimento, e dessa forma, enrijecem a amostrade CAP Modificada.



**Figura 4.17.** Variação da  $\tan \delta$  versus temperatura no CAP Modificado após envelhecimento a curto prazo.

Comparando os resultados obtidos nos ensaios de Módulo Complexo e  $\tan \delta$  em varredura de temperatura com os resultados dos ensaios Convencionais, (penetração, viscosidade, ponto de amolecimento, recuperação elástica) embora a maioria desses sejam realizados a 25 °C, percebe-se de maneira geral que esses ensaios apresentam resultados similares, ou seja, em todos, as amostras do tipo S74 SX 0,5 demonstram ter maior rigidez e maior elasticidade que as demais amostras estudadas.

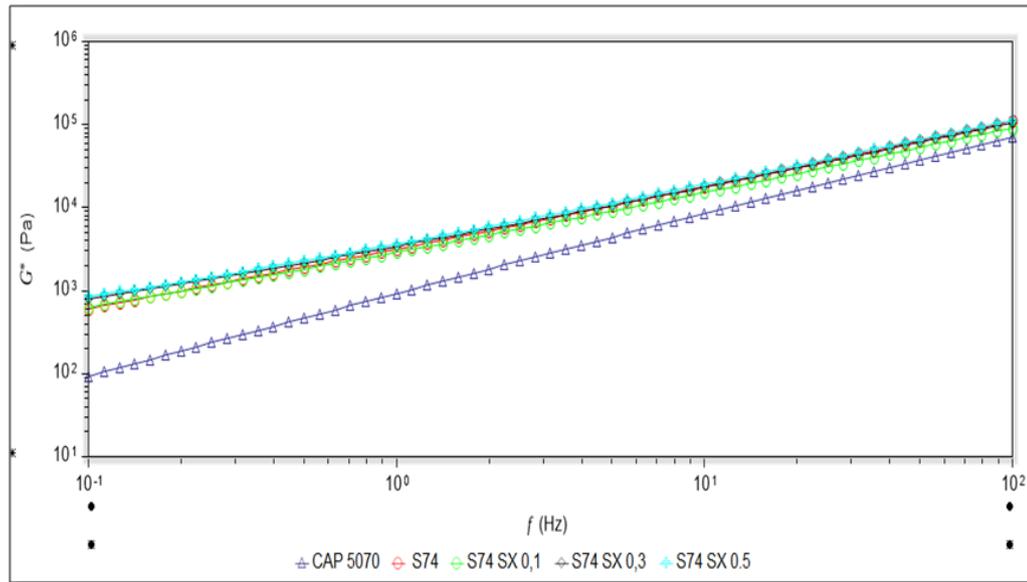
Logo, considerando o comportamento do CAP com adição dos modificadores em varredura de temperatura pode-se definir que a baixas temperaturas ocorreu aumento da rigidez e aumento da elasticidade, tal fato podendo ser justificado pelo aumento do módulo complexo ( $G^*$ ) do material e com o aumento da temperatura ocorreu uma redução dessa rigidez e acréscimo na elasticidade inicial que pode ser justificado pela redução do módulo viscoso ( $G''$ ).

✓ *Monitoramento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) e da  $\tan \delta$  em Varredura de Frequência*

Na Tabela 4.18 e na Figura 4.18 estão inseridas as variações do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da frequência, para os CAPs Puro e Modificados.

Tabela 4.18. Variação do Módulo complexo ( $G^*$ ) em função da frequência.

Amostra/Frequência (Hz)	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
	<b>Módulo complexo (<math>G^*</math>) (KPa)</b>				
0,1	0,093	0,61	0,63	0,79	0,85
1,0	0,93	3,17	2,91	3,43	3,64
10,0	8,52	17,91	15,24	17,75	19,14
100,0	69,86	110,5	91,64	106,18	113,43



**Figura 4.18.** Lançamento em gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da frequência.

Observa-se que, os CAPs apresentaram um comportamento reológico típico, caracterizado pelo aumento da rigidez com o incremento da frequência de carregamento.

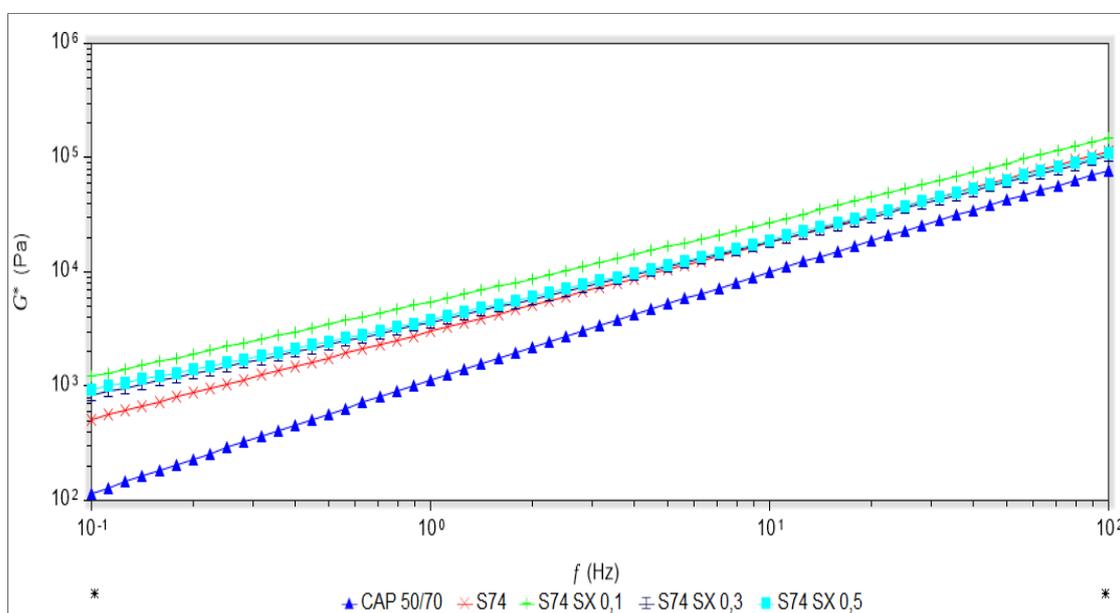
Constata-se, que quando comparadas ao CAP Puro, todas as amostras de CAPs modificados apresentaram, além do aumento do Módulo Complexo, uma menor variação deste parâmetro função da frequência, que pode ser perceptível devido a menor “*inclinação*” das curvas e ser um indicativo do desempenho mais regular do material para as possíveis solicitações de tráfego.

Entre as amostras modificadas as S74 e S74 SX 0,1 apresentaram comportamento similar, em relação ao Módulo Complexo, quando solicitadas por baixas frequências. Entretanto, o incremento nos valores de frequência tem como efeito a redução nos valores deste parâmetro para a amostra S74 SX 0,1. As amostras S74 SX 0,3 e S74 SX 0,5, apresentaram além de um comportamento similar, um melhor desempenho, e, quando comparadas as amostras S74, percebe-se que o efeito do polímero do tipo Polimul SX500 se fez significativo, principalmente a baixas frequências, aumentando o valor do Módulo Complexo.

Na Tabela 4.19 e na Figura 4.19 estão inseridas as variações do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da frequência, para os CAPs Puro e Modificados sob ação do envelhecimento à curto prazo.

**Tabela 4.19.** Variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da frequência, após envelhecimento à curto prazo.

Amostra/Frequência (Hz)	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
	Módulo complexo ( $G^*$ ) (KPa)				
0,1	0,11	0,51	1,22	0,84	0,94
1,0	1,13	3,02	5,51	3,64	3,83
10,0	9,97	18,16	27,28	18,02	19,10
100,0	77,34	114,16	149,59	104,00	109,00



**Figura 4.19.** Curvas da Variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da frequência após envelhecimento à curto prazo.

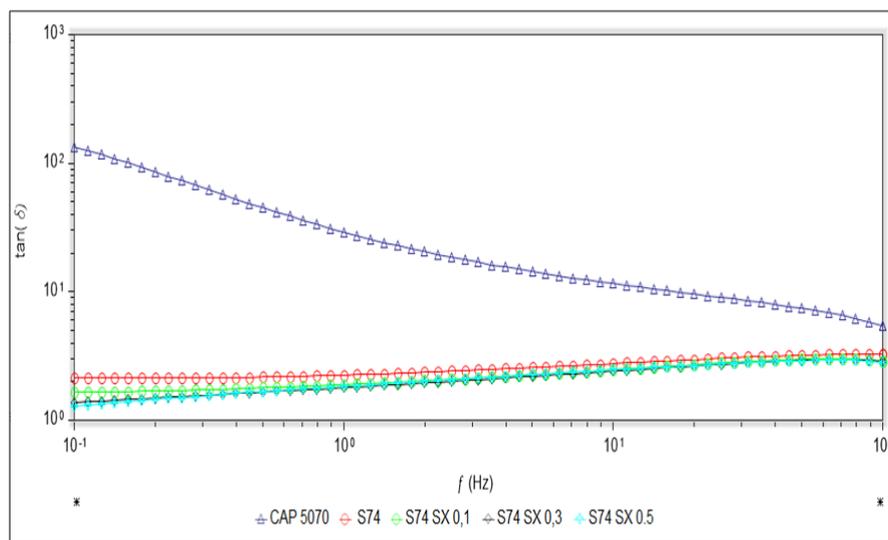
Pode-se observar que, após o envelhecimento à curto prazo, todas as amostras modificadas apresentaram maiores valores do Módulo Complexo quando comparadas a amostra de CAP Puro, indicando uma maior rigidez das amostras modificadas.

Ao analisar o comportamento individual das amostras, observa-se que, o aumento do Módulo Complexo na amostra de CAP Puro se faz presente em toda a faixa de frequência avaliada. Entre as amostras modificadas a S74 SX 0,1 apresenta uma maior elevação deste parâmetro, indicando um melhor desempenho sob o efeito do envelhecimento à curto prazo.

Na Tabela 4.20 e na Figura 4.20 apresenta-se a variação da  $\tan \delta$  em função da frequência, para os CAPs Puro Modificado.

**Tabela 4.20.** Variação da  $\tan \delta$  em função da frequência.

Amostra/Frequência (Hz)	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
	$\tan \delta$				
0,1	134,55	2,15	1,64	1,37	1,28
1,0	29,23	2,25	1,90	1,80	1,84
10,0	11,59	2,76	2,43	2,42	2,47
100,0	5,49	3,27	2,90	2,90	2,85



**Figura 4.20.** Curvas com a variação da  $\tan \delta$  em função da frequência.

Observa-se que a adição dos modificadores favorece o aumento da elasticidade do CAP, com a redução dos valores da  $\tan \delta$ , principalmente a baixas frequências. Segundo Pamplona (2013) tal fato é vantajoso em termos de durabilidade da camada asfáltica, já que um material mais elástico favorece tanto a resistência à deformação permanente, quanto à vida de fadiga e ao trincamento ocasionado para variação térmica.

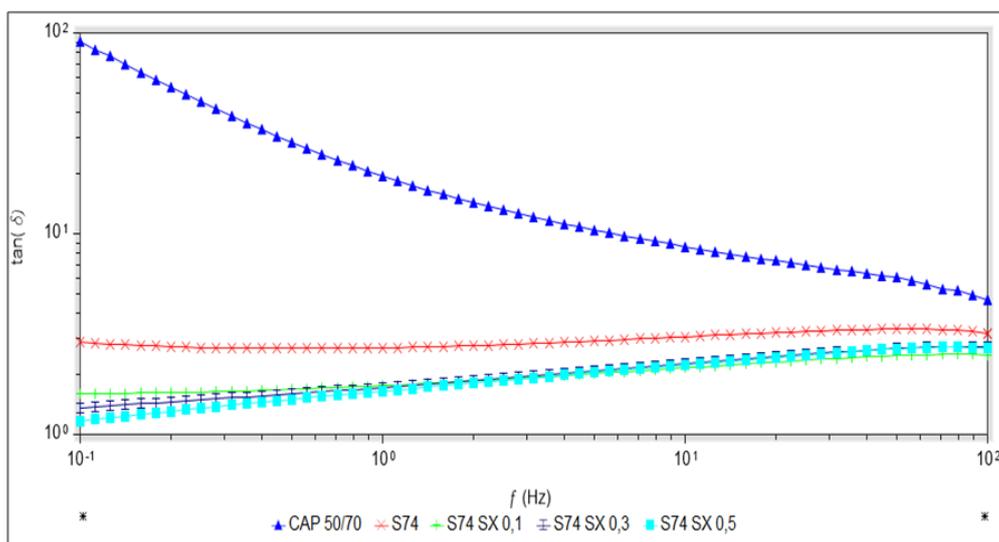
Entretanto, nas amostras com adição dos modificadores ocorreu ao longo do espectro de frequência uma pequena redução da elasticidade, evidenciada pelo aumento dos valores da  $\tan \delta$ . Além disso, observa-se ainda, que as amostras dos CAPs Modificados apresentaram uma menor variação da  $\tan \delta$  em função da frequência, indicando um desempenho mais regular do material as possíveis solicitações de tráfego em campo.

No que diz respeito ao desempenho individual, as amostras S74 apresentaram, entre todas as amostras estudadas, um maior valor da  $\tan \delta$  e conseqüentemente uma menor elasticidade em todas as frequências observadas, em contrapartida, a amostra S74 SX 0,5 apresentou um menor valor da  $\tan \delta$  e conseqüentemente uma maior elasticidade em todas as frequências observadas.

Na Tabela 4.21 e a Figura 4.21 estão inseridas as variações do parâmetro  $\tan \delta$  em função da frequência, para o CAP Puro e Modificado após o envelhecimento á curto prazo.

**Tabela 4.21.** Variação da  $\tan \delta$  em função da frequência após o envelhecimento á curto prazo.

Amostra/Frequência (Hz)	CAP 50/70	S74	S74 SX 0,1	S74 SX 0,3	S74 SX 0,5
	$\tan \delta$				
0,1	90,94	2,87	1,61	1,36	1,16
1,0	19,37	2,70	1,76	1,72	1,65
10,0	8,63	3,00	2,15	2,25	2,23
100,0	4,71	3,19	2,49	2,74	2,69



**Figura 4.21.** Variação da  $\tan \delta$  em função da frequência após o envelhecimento á curto prazo.

Observa-se que a amostra de S74 apresenta um incremento nos valores da  $\tan \delta$  indicando que, mesmo apresentando características superiores a amostra de CAP Puro, após o envelhecimento, ocorre uma redução no desempenho dessa amostra

em toda a faixa de frequência avaliada. Nas demais amostras de CAPs Modificados é visível que o envelhecimento teve um efeito benéfico promovendo a redução dos valores da  $\tan \delta$  e conseqüentemente o aumento da elasticidade.

✓ *Avaliação dos CAP's segundo a Metodologia Superpave*

O grau de desempenho ou “Performance Grade” (PG) das amostras do CAP foram obtidos com base nos valores do parâmetro  $G^*/\sin \delta$ , ou seja, a temperatura máxima do PG foi definida como a temperatura na qual os valores do  $G^*/\sin \delta$  são superiores a 1,0 KPa e a 2,2 KPa, respectivamente para as amostras virgens e envelhecidas à curto prazo. Segundo a metodologia, estes valores são capazes de garantir a adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes. Nas Figuras 4.22 e 4.23, respectivamente, são ilustradas as curvas do  $G^*/\sin \delta$  versus temperatura na faixa de 46 a 82 °C para as amostras de CAPs Puro e Modificado, antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo.

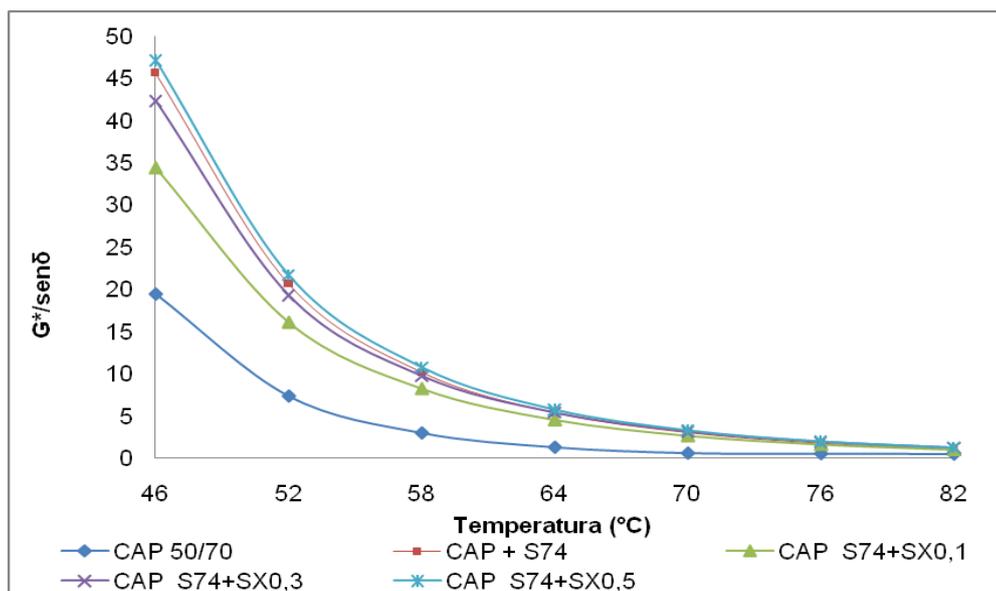
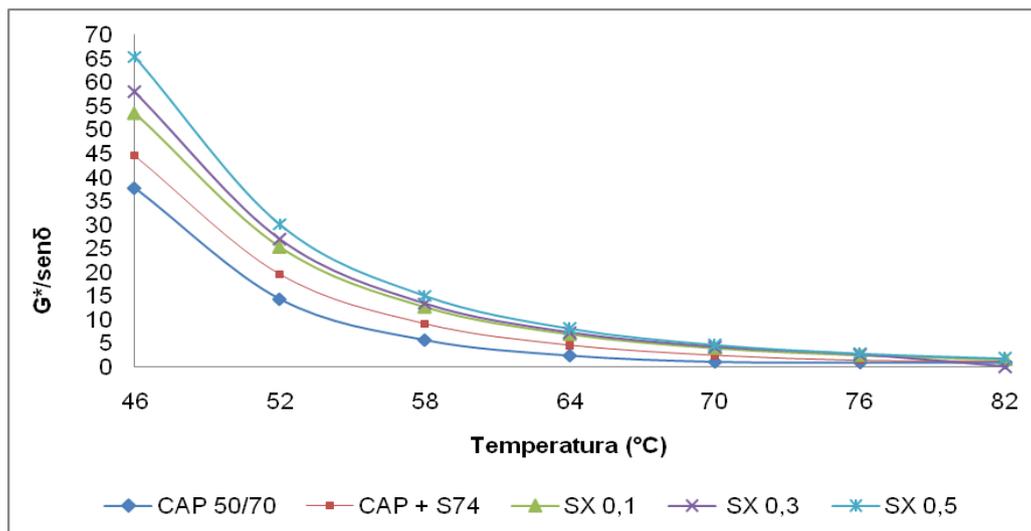


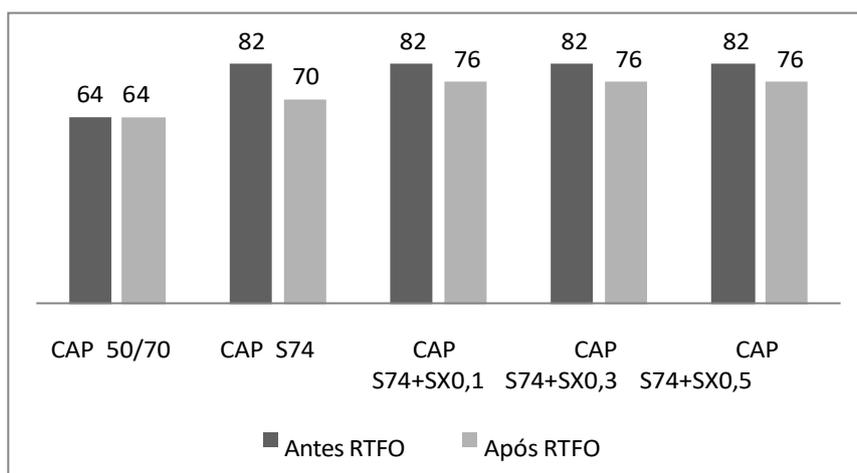
Figura 4.22. Curvas do  $G^*/\sin \delta$  versus temperatura.



**Figura 4.23.** Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura após envelhecimento à curto prazo.

Sabe-se que quanto melhor for à modificação do CAP pela adição dos aditivos, mais alta poderá ser a temperatura de utilização do mesmo ou a temperatura máxima indicada para sua aplicação ou uso. Assim, observando as curvas apresentados as Figuras 4.22 e 4.23 verifica-se que com a adição dos modificadores há o aumento na temperatura máxima de uso do CAP, em relação à temperatura máxima de uso do CAP Puro.

Pelos valores de  $G^*/\sin\delta$  observados, antes e após o envelhecimento à curto prazo, respectivamente, apresentado nas Figuras 4.22 e 4.23, foram lançadas em gráfico as temperaturas máximas para os CAPs Puro e Modificado na Figura 4.24.



**Figura 4.24.** Temperatura máxima do CAP Puro e com adição dos modificadores

A adição dos modificadores proporcionou o aumento do  $G^*/\sin\delta$  e, portanto, um incremento da temperatura máxima do PG para 82 °C (PG 82-XX). Este aumento do PG indica que com a adição dos modificadores o acréscimo no Módulo Complexo ( $G^*$ ) foi maior que o acréscimo no  $\sin\delta$ , o que leva a inferir que o aumento da viscosidade, da rigidez, nas amostras modificadas, permitiu a obtenção de um bom Grau de Performance (PG).

Com os resultados da Figura 4.25 verifica-se, também, que após o envelhecimento á curto prazo, as amostras do CAP Modificado apresentaram uma redução nos valores do parâmetro  $G^*/\sin\delta$  e consequentemente redução da temperatura máxima do PG. Esta redução foi mais expressiva para amostra S74, nesta a temperatura máxima estabelecida para o PG foi de 70°C (PG 70-XX). Nas demais amostras modificadas, S74 SX 0,1; S74 SX 0,3 e S74 SX 0,5 a temperatura máxima obtida para o PG foi de 76°C (PG 76-XX). Finalmente, pode-se inferir, a partir desses resultados, que todas as amostras com adição dos agentes modificadores podem apresentar em serviço uma maior resistência à deformação permanente, quando comparadas as possíveis misturas asfálticas com a utilização de CAP Puro.

✓ *Ensaio de Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (MSCR)*

Com o objetivo de avaliar os resultados do ensaio de MSCR serão apresentados aqui, para os CAPs Puro e Modificados, nos níveis de tensão de 100Pa e 3200Pa, os valores médios da compliância não-recuperável, os valores médios do percentual de recuperação e a relação entre as compliâncias não- recuperáveis a 100Pa (Jnr100) e 3200Pa (Jnr3200).

Na Tabela 4.22 e na Figura 4.25 estão apresentados os valores percentuais da recuperação obtidos para os CAPs Puro e Modificado..

**Tabela 4.22.** Valores do percentual de recuperação.

Amostra	Percentual de Recuperação (%)	
	100Pa	3200Pa
<b>CAP 50/70</b>	15,7	2,4
<b>S74</b>	51,2	50,0
<b>S74 SX 0,1</b>	75,0	73,0
<b>S74 SX 0,3</b>	89,7	84,0

S74 SX 0,5	95,8	91,5
------------	------	------

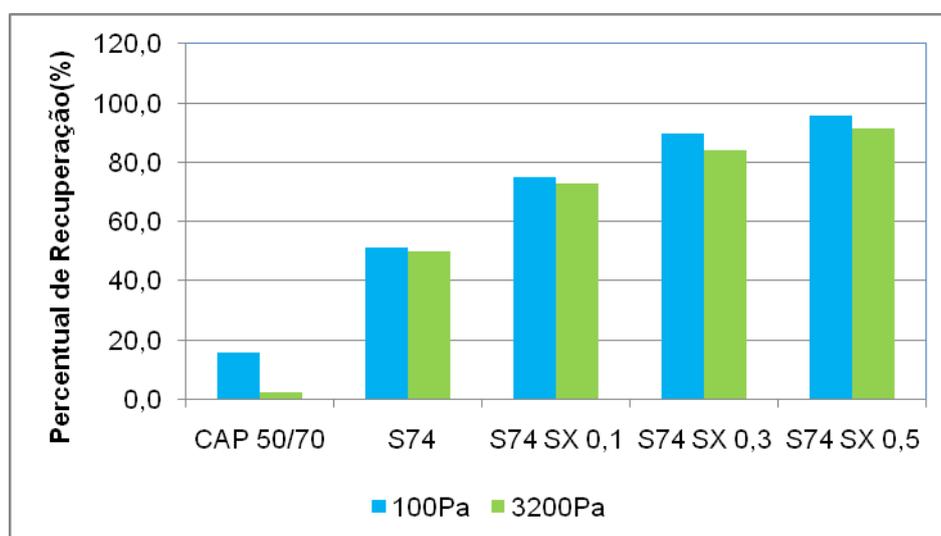


Figura 4.25. Valores do percentual de recuperação.

Em linhas gerais, a adição dos modificadores promoveu o incremento do percentual de recuperação do material, em ambos os níveis de tensões de 100Pa e 3200Pa. Ao nível de tensão de 100Pa os percentuais de recuperação variam entre 15,7% e 95,8%, respectivamente, para a amostra dos CAPs Puro e Modificada tipo S74 SX 0,5. Em relação ao nível de tensão de 3200Pa, os percentuais de recuperação variam entre 2,4% e 91,5%, respectivamente, para a amostra do CAP Puro e Modificada do tipo ‘S74 SX 0,5.

Tanto a amostra Pura como as Modificadas apresentaram melhores percentuais de recuperação ao nível de tensão de 100Pa, entretanto, percebe-se que para as amostras modificadas ocorre uma redução na diferença entre os valores da recuperação nos níveis de tensões de 100Pa e 3200Pa, o que pode ser visto como o efeito positivo da adição dos modificadores na recuperação do CAP sob altas tensões.

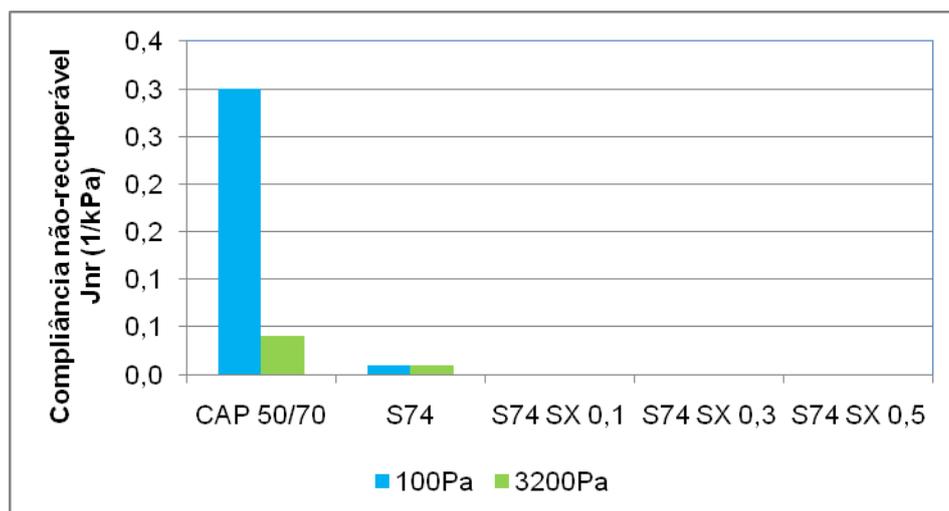
Dessa forma, considerando que o percentual de recuperação fornece uma indicação da resposta elástica retardada do CAP, o aumento dos valores para esta propriedade sinaliza uma componente elástica significativa do material, ressaltando assim, o efeito benéfico da adição dos modificadores ao CAP50/70.

Na Tabela 4.23 estão apresentados os valores da compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) e os valores das diferenças percentuais entre as compliâncias ( $J_{nr,dif}$ ) para os CAPs Puro e Modificado.

**Tabela 4.23.** Valores de  $J_{nr}$  e  $J_{nr, dif}$ .

Amostra	Complância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) $KPa^{-1}$		$J_{nr, dif}$ (%)
	100 Pa	3200 Pa	
CAP 50/70	0,30	0,04	86,7
S74	0,08	0,07	12,5
S74 SX 0,1	0,01	0,01	0,00
S74 SX 0,3	0,00	0,00	0,00
S74 SX 0,5	0,00	0,00	0,00

Na Figura 4.26 estão apresentados os valores da complância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) para o CAP Puro e Modificado.



**Figura 4.26.** Valores da complância não-recuperável ( $J_{nr}$ ).

Para ambos os níveis de tensões de 100 Pa e 3200 Pa, os valores da complância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) diminuem com a adição dos modificadores e atingem um valor nulo nas amostras S74SX 0,1; S74 SX 0,3 e S74 SX 0,5. Assim, em geral, tendo em vista que os valores de  $J_{nr}$  estão relacionados à susceptibilidade do CAP a deformação permanente, pode-se definir que independente do nível de tensão todas as amostras modificadas apresentaram uma menor susceptibilidade quando comparadas ao CAP Puro.

Em relação aos resultados do  $J_{nr, dif}$  observa-se que após a adição dos modificadores todas as amostras modificadas apresentam diferenças de percentuais inferiores a 75%. Sendo que as amostras tipo S74, entre as amostras modificadas, são as que apresentam valores do

Jnr,dif mais elevados, apesar de distantes do valor de 75%. Pode-se então definir que quando comparadas ao CAP 50/70 todas amostras modificadas são menos sensíveis a variação de tensões.

Considerando os resultados obtidos para o Jnr a 3200 Pa apresenta-se na Tabela 4.24 a classificação das amostras do CAP Puro e Modificado quanto ao critério de tráfego do FHWA.

**Tabela 4.24.** Classificação do CAP segundo critério da FHWA.

<b>AMOSTRA</b>				
<b>CAP 50/70</b>	<b>S74</b>	<b>S74 SX 0,1</b>	<b>S74 SX 0,3</b>	<b>S74 SX 0,5</b>
.....	E	E	E	E

onde: S=padrão, H=pesado, V= muito pesado e E= extremamente pesado.

Verifica-se que, as amostras do CAP Puro e todas as amostras modificadas apresentaram valores de compliância não-recuperável (Jnr), a 3.200Pa, inferiores a 0,5 KPa<sup>-1</sup>, de tal forma que em principio seriam indicadas para um tráfego extremamente pesado (E). Entretanto, ao se analisar o percentual mínimo de recuperação das amostras CAP 50/70 pode-se observar que não se encontram dentro do intervalo de classificação estabelecido pelo FHWA.

Nas amostras modificadas é observado nitidamente o efeito benéfico e eficaz dos agentes modificadores, uma vez que as amostras de CAPs modificados passaram a apresentar um valor de percentual de recuperação igual e superior a 50%, estando assim, aptas a serem submetidas a um tráfego extremamente pesado (E).

Com o objetivo de analisar o nível elasticidade das amostras estudadas é apresentado na Figura 4.27 os valores percentual de recuperação em versus a compliância não-recuperável (Jnr).

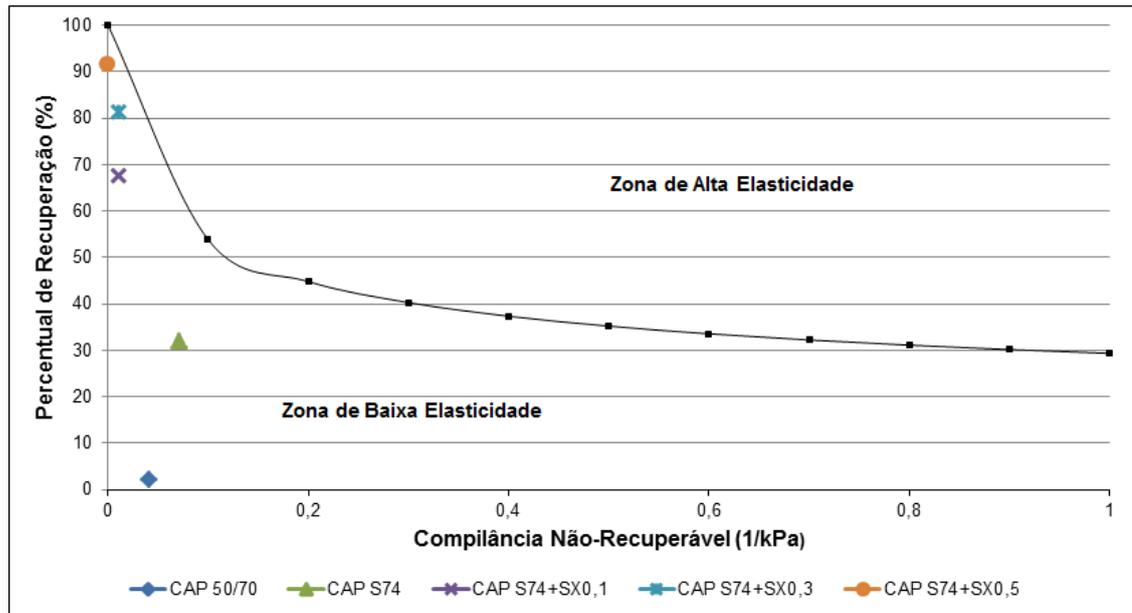


Figura 4.27. Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável.

Observando os resultados percebe-se que todas as amostras estão localizadas na zona de baixa elasticidade. Entretanto, é perceptível que a adição e o aumento do teor dos modificadores promove incremento do percentual de recuperação das amostras, redução dos valores da compliância não- recuperável e conseqüentemente aproximação das amostras modificadas a zona da alta elasticidade.

✓ *Avaliação através das “Curvas Mestre”*

Em geral, na literatura corrente sobre o assunto, a temperatura definida para o traçado da curva- mestre é de 25<sup>0</sup>C, entretanto, neste estudo a “Curva Mestre” foi construída a 60<sup>0</sup>C, por ser essa temperatura considerada típica de uso dos revestimentos asfálticos.

Na Figura 4.28 são lançadas em gráficos “Curvas Mestre” obtidas para os CAPs Puro e Modificado, nas quais os valores de Módulo Complexo (G\*) são relacionados em função da frequência utilizada

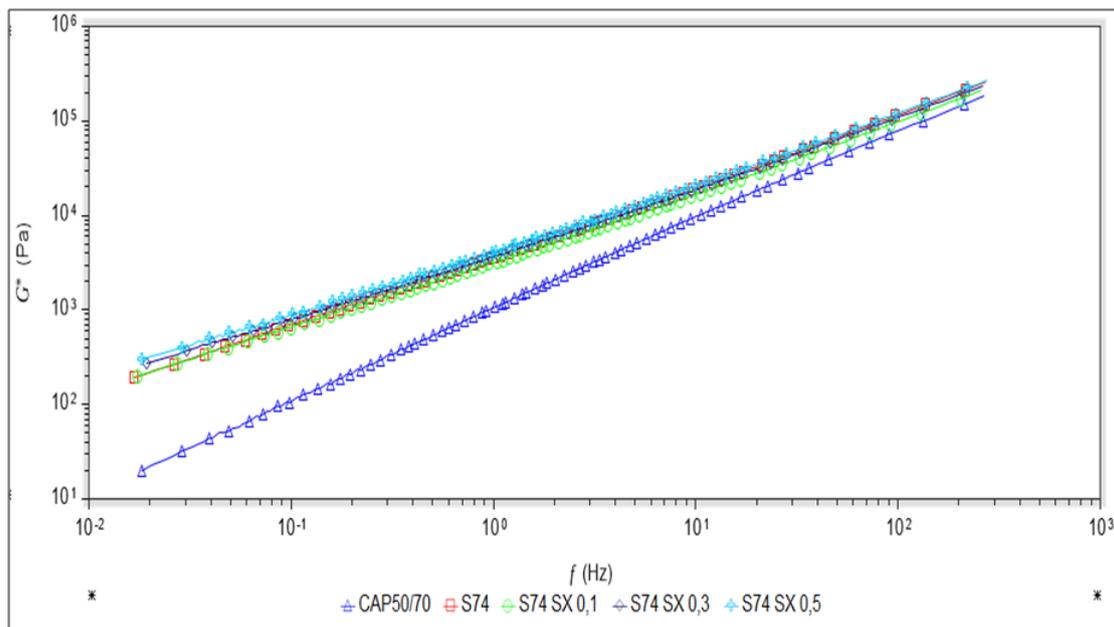


Figura 4.28. “Curvas Mestre” - Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da frequência.

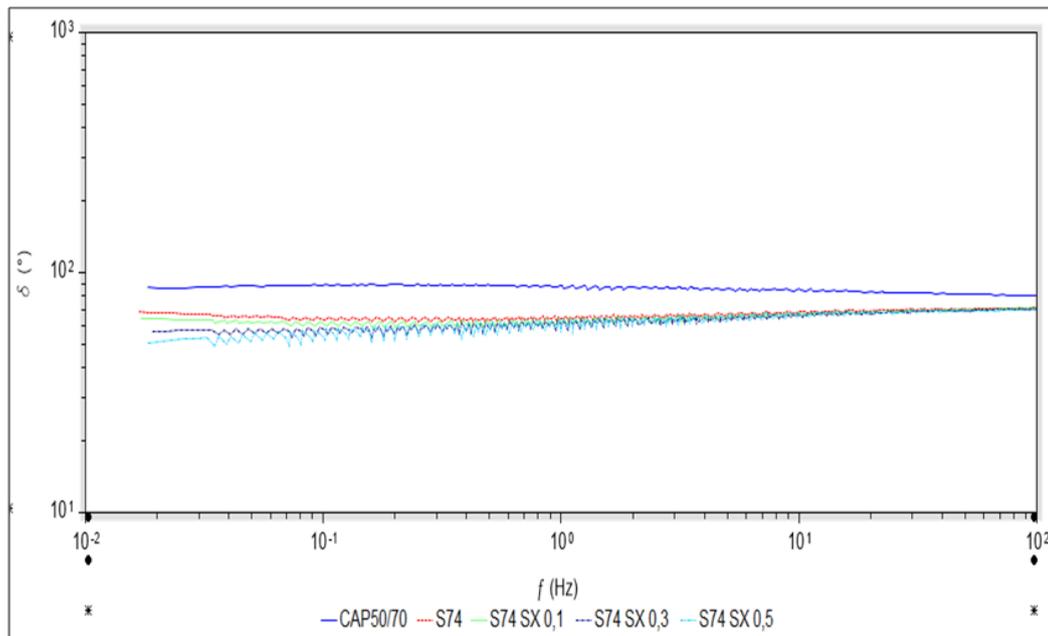
Tanto para amostra de CAP Puro como nas modificadas, ocorre um aumento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) com o aumento da frequência utilizada, destacando um aumento da rigidez dos CAPs em geral com a redução do tempo de aplicação da carga.

Este comportamento pode ser justificado em função da relação frequência versus temperatura, ou seja, como o CAP é um material visco-elástico, quando submetido a baixas frequências ou a temperaturas altas a viscosidade se torna mais evidente, do contrário, quando submetido a altas frequências ou temperaturas baixas esse reage como sólido elástico.

É perceptível que com o incremento da frequência ocorre aproximação dos valores do Módulo Complexo das amostras com os CAPs Puro e Modificado, indicando que a influência dos agentes modificadores na viscosidade do CAP foi mais expressiva quando utilizada baixas frequências.

O efeito da adição dos agentes modificadores foi mais eficaz na amostra do tipo S74 SX 0,5. Esta apresentou, entre todas as amostras de CAP modificados, e em toda a faixa de frequência avaliada, os maiores valores de Módulo Complexo.

Na Figura 4.29 estão lançadas em gráfico as “Curvas Mestre” obtidas para os CAPs Puro e Modificado, nas quais os valores de  $\tan \delta$  estão relacionados em função da frequência.



**Figura 4.29.** “Curvas Mestre” versus  $\tan \delta$  em função da frequência.

A Figura 4.29 permite inferir que, para as amostras modificadas, houve uma redução dos valores de  $\delta$  em toda a faixa de frequência, o que significa um aumento de elasticidade em relação à amostra com CAP Puro. Ressalta-se, mais uma vez, o efeito positivo da adição dos agentes modificadores sobre CAP.

Considerando-se a relação frequência versus temperatura, observa-se que sob baixas frequências ou altas temperaturas a amostra S74 SX 0,5 apresentou uma maior elasticidade que as demais amostras. Entretanto, sob altas frequências ou sob baixas temperaturas, todas as amostras modificadas apresentaram um comportamento elástico similar.

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

### CONCLUSÕES

- em todos os parâmetros inerentes as Propriedades Reológicas, obtidos com os ensaios convencionais, o CAP Modificado superou os limites pré-estabelecidos pela ANP, para o CAP Elastomérico de Alto Desempenho (60/85-E), evidenciando o bom desempenho desse material quando associado ou funcionalizado pelos aditivos nas proporções estudadas;
- em relação as “*Propriedades Reológicas Especiais*”, pode-se inferir que: os parâmetros mensurados com a realização dos ensaios do DSR, especificamente, o incremento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) e a Redução da  $\text{Tan } \delta$ , indicam, respectivamente, um aumento da rigidez e nas propriedades elásticas do CAP Modificado, o que em síntese é constatado com o aumento da componente elástica ( $G'$ ) do Módulo Complexo ( $G^*$ ).
- é conclusivo que a adição associada aos Modificadores: Terpolímero de Etileno, Acrilato de Metila e Metacrilato de Glicidila (EMA-GMA), Ácido Polifosforico PPA(116%) e Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), respectivamente, nos teores de 1,8%, 0,15% e 0,5%, ao CAP50/70 é viável do ponto reológico.
- por fim, foi possível estabelecer as proporções destes aditivos que melhor se adequam ao Comportamento Reológico do CAP Modificado, fazendo com que a utilização deste em Misturas Asfálticas, com o CAP 50/70, seja viável e atenda aos requisitos pré- estabelecidos pelas as normas da ANP.

### SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- estudos de Propriedades Reológicas de CAPs Modificados com aditivos pesquisados, nas proporções encontradas, a partir de amostras submetidas ao envelhecimento a longo prazo;
- estudos de Dosagens Marshall e Superpave a partir de parâmetros como: Módulo de Resiliência; Módulo Dinâmico e Vida de Fadiga;
- estudo e execução de um trecho experimental utilizando o CAP Modificado,

a partir de dosagens Superpave e Marshall.

- análise das propriedades químicas segundo o procedimento SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos).

## REFERÊNCIAS

---

- ABNT NBR 15184 (2004). Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.
- ABNT NBR 15166 (2007). Asfalto Modificado – Ensaio de separação de fase, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.
- ABNT NBR 15235 (2009). Materiais Betuminosos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.
- ASTM D7175 – 08 (2005). Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7405 – 10a (2008). Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D6373 – 15 (2008). Specification for Performance Graded Asphalt Binder. American Society for Testing and Materials.
- Amaral SC (2000). Estudo de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando o CAP convencional (CAP-40) e CAP modificado com SBS (Betuflex B65/60). 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Azevedo PN et al. (2009). Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica do Salvador, Salvador.
- Bringel RM (2007). Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos. 2007. Dissertação (Mestre em Química Orgânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Bernucci, LB et al. (2007). Pavimentação asfáltica – formação básica para Engenheiros. 1ed., ABEDA, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010). ME 131/2010 Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola, Departamento Nacional De Infraestrutura E Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010). ME 130/2010 Materiais Asfálticos – Determinação da Recuperação elástica dos materiais asfálticos pelo ductilômetro, Departamento Nacional De Infraestrutura E Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010). ME 155/2010 Material Asfáltico – Determinação da penetração, Departamento Nacional De Infraestrutura E Transporte, Rio de Janeiro.

- DNIT (1998). ME 163/1998 Materiais Betuminosos – Determinação da ductilidade, Departamento Nacional De Infraestrutura E Transporte, Rio de Janeiro.
- D’Angelo JA (2012). Effect of Polyphosphoric Acid on Asphalt Binder Properties. *Transportation Research*, 27–39.
- Domingos MDI et al. (2013). Avaliação do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com SBS e ácido polifosfórico. *Transportes*, 51-58.
- Faxina AL (2006). Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Fernandes MRS (2009). Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de CAPs modificados com SBS. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Grande WR (2011). Efeito da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Gusmão M (2009). Restauração Rodoviária utilizando asfalto modificado por polímeros. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Gama DA (2013). Avaliação do potencial de uso do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Gonzales SM (2006). *Diseno Moderno de Pavimentos Asfálticos*. 2ed., Lima.
- Iten DOVF (2011). Estudo das Misturas Asfálticas em CBUQ utilizando Asfalto Convencional e Asfalto Modificado por Polímeros. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.
- De Cezaro Junior T (2008). Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas Asfáltica Convencionais e Modificadas. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Junior AM (2004). Estudo sobre a ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Kodrat I (2007). Comparison of polyphosphoric acid-modified asphalt binders with straight and polymer-modified materials. *Transportation Research Record*. Washington, 47-55.

- Lima CKM (2008). Estudo da Incorporação de Resíduo Industrial Polimérico ao CAP. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Leite LFM et al. (2004). Efeito do Ácido Polifosfórico no Desempenho dos Ligantes Rodoviários. XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis.
- Lucena MCC et al. (2004). Reologia de Asfaltos Brasileiros Puros e Modificados por SBS. XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis.
- Mothé MG (2009). Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Miranda LV et al. (2014). Estudo das Propriedades Físicas do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) Modificado com o Terpolímero Reativo, Ácido Polifosfórico e Polietileno para Aplicação em Misturas Asfálticas. XI Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Moraes R (2007). Estudo Químico e Reológico dos Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos. Dissertação (Mestre em Química Inorgânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Negrão DP (2006). Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do tipo RET para Aplicações em Pavimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Negrão DP (2012). Contribuição para Calibração da Curva de Evolução de Afundamentos em Trilha de Roda de Revestimentos Asfálticos com Utilização de Resíduos Obtidos de Simulador de Tráfego em Escala Real. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Oda S (2000). Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-borracha em Obras de Pavimentação. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Pamplona TF (2013). Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Pamplona TF et al. (2012). Propriedades Reológicas sob altas temperaturas de ligantes asfálticos de diferentes fontes modificados com ácido polifosfórico. Revista TRANSPORTES.
- Polacco G et al. (2004). Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. Journal of Colloid and Interface Science, 366-373.

- Pinto MF (2014). Estudo de Ligantes e Misturas Asfálticas com Nanomodificadores, Polímeros e Resíduos. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Sobreiro FP (2014). Efeito a adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Specht LP (2004). Avaliação das misturas asfálticas com borrachas recicladas de pneus. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Silva LS (2004). Study of Rheological Properties of Pure and Polymer-Modified Brazilian Asphalt Binders. *Journal of Materials Science*, 539–546. doi: <https://dx.doi.org/10.1023/B:JMSC.0000011509.84156.3b>.
- Tomé LGA et al. (2005). Estudo do Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado pelo Terpolímero de Etileno-Butilacrilato-Glicidilmetacrilato. 3<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás-IBP.
- Zhu J et al. (2014). Polymer Modification of Bitumen Advances and Challenges, *European Polymer Journal*. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

aditivos, 8, 17, 33, 36, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 59,  
77, 86  
aglutinante, 14  
agregado, 8, 14, 17  
amolecimento, 12, 15, 19, 20, 23, 35, 39, 41, 42,  
48, 49, 58, 59, 60, 61, 71, 88  
ângulo de fase, 26, 27, 46  
asfaltenos, 12, 13, 18, 20, 22, 52, 57  
asfalto modificado, 19, 20, 89, 91

### B

betuminoso, 19

### C

cisalhamento, 8, 24, 26, 28, 36, 45, 47  
compactação, 8, 14, 25, 55  
composição química, 12, 13, 21, 22, 53

### D

deformações, 7, 14, 16, 17, 18, 20, 29, 30, 41, 44,  
61, 76  
degradações, 7  
desempenho, 8, 16, 20, 21, 23, 28, 38, 47, 50, 53,  
56, 59, 60, 62, 63, 72, 73, 74, 75, 76, 86  
ductilidade, 7, 12, 23, 44, 63, 64, 89

### E

elasticidade, 13, 17, 21, 22, 28, 32, 62, 63, 68, 70,  
71, 74, 75, 82, 83, 85  
elastômeros, 16, 17  
estabilidade, 20, 39, 48, 49

### F

fadiga, 7, 16, 17, 18, 19, 23, 29, 74  
fissuras, 7, 19, 60, 64  
flexibilidade, 14, 19, 62  
fluência, 19, 21, 22, 24, 29, 30, 31, 38, 47, 89

frequência, 8, 22, 26, 33, 46, 47, 71, 72, 73, 74,  
75, 83, 84, 85

### M

maltenos, 12, 13, 22  
mistura asfáltica, 14, 20, 21, 59  
modificadores, 7, 8, 13, 16, 17, 18, 35, 52, 56,  
59, 62, 68, 71, 74, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 85  
Módulo Complexo, 26, 27, 46, 65, 66, 67, 71, 72,  
73, 78, 83, 84, 86

### P

pavimentos, 4, 7, 16, 23, 46, 61, 88  
penetração, 12, 14, 15, 20, 23, 39, 40, 42, 50, 52,  
53, 55, 71, 89  
polietileno, 7, 8, 16, 35, 62  
Polímero Reativo, 8, 52, 56  
polímeros, 3, 4, 7, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 33, 35,  
49, 61, 64, 89, 91  
propriedades, 3, 4, 7, 8, 9, 16, 17, 18, 19, 20, 21,  
22, 23, 25, 26, 28, 33, 34, 37, 40, 48, 49, 60,  
62, 65, 67, 86, 87, 89

### R

recuperação elástica, 7, 19, 21, 23, 42, 62, 63, 71  
Reologia, 3, 9, 21, 90  
resistência, 7, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 26,  
28, 47, 56, 58, 59, 61, 65, 74, 76, 78  
restauração, 7, 19  
revestimento, 4, 7, 14, 19, 61, 64, 88  
rigidez, 16, 20, 22, 26, 28, 52, 55, 56, 59, 65, 66,  
67, 71, 72, 73, 78, 84, 86

### T

temperatura, 8, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 25,  
26, 27, 28, 31, 33, 36, 39, 41, 42, 43, 44, 46,  
47, 49, 52, 56, 57, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69,  
70, 71, 76, 77, 78, 83, 84, 85

ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP50/70)  
MODIFICADO COM POLÍMEROS FUNCIONALIZADOS

tensões, 8, 17, 19, 21, 25, 29, 30, 38, 47, 80, 81,  
82

termoplásticos, 16, 17

termorrígidos, 16

tráfego, 7, 14, 17, 22, 23, 26, 28, 29, 31, 61, 64,  
72, 74, 82

**U**

usinagem, 12, 22, 40, 55

**V**

vida útil, 7, 19, 22, 56

viscosidade, 12, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 39, 41,  
43, 44, 55, 56, 57, 59, 61, 71, 78, 84, 88

## SOBRE O AUTOR



  **José Manoel Rosa Júnior**

Engenheiro civil, graduado em Engenharia Civil (2011) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Mestre em Engenharia Civil e Ambiental (2015) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Especialista em Projeto, Execução e Desempenho de Estruturas e Fundações (2020) – Instituto de Pós-Graduação e Graduação (IPOG).

Atualmente é professor no Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Possui artigo publicado em revista internacional, tem orientações de conclusão de curso (TCC) na área de engenharia civil.



ISBN 978-658831965-9



**Pantanal Editora**

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000  
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil  
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp)  
<https://www.editorapantanal.com.br>  
[contato@editorapantanal.com.br](mailto:contato@editorapantanal.com.br)