

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**CAMPUS I – CAMPINA GRANDE**

**ÁREA GEOTÉCNICA**

**ESTUDOS REOLÓGICOS DE ADITIVOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE  
MISTURAS MORNAS**

Gutemberg Gonçalves da Silva

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Campina Grande – Paraíba

Agosto de 2016

# ESTUDOS REOLÓGICOS DE ADITIVOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE MISTURAS MORNAS

Gutemberg Gonçalves da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
CAMPINA GRANDE, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Orientador

Campina Grande – Paraíba

Agosto de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- S586e Silva, Gutemberg Gonçalves da.  
Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas / Gutemberg Gonçalves da Silva. – Campina Grande, 2015.  
125 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.  
"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena".  
Referências.
1. Pavimentação. 2. Aditivos. 3. Misturas Mornas. 4. Modelagem. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 693.7(043)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Gutemberg Gonçalves da Silva

Título: ESTUDOS REOLÓGICOS DE ADITIVOS UTILIZADOS NA  
FABRICAÇÃO DE MISTURAS MORNAS

Dissertação defendida e aprovada em: 15/08/2016

Banca Examinadora

(Assinatura): Adriano Elísio de F. L. Lucena

Prof. D.Sc. (Orientador) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): J. K. G. R.

Prof. D.Sc. (Examinador Interno) John Kennedy Guedes Rodrigues  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): Lêda Christiane Lopes Lucena

Prof. D.Sc. (Examinadora Interna) Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): Luís Alberto Herrmann do Nascimento

Prof. PhD. (Examinador Externo) Luis Alberto Herrmann do Nascimento  
CENPES/PETROBRAS

## DEDICATÓRIA

*À Deus e, principalmente, ao meu falecido pai, que com muito amor e esforço me preparou para a vida, mostrando que nada é fácil, mas que com determinação somos capazes de mudar o nosso destino. Obrigado pelo amor e todo o apoio incondicional.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por tudo o que Ele proporciona em minha vida.

Aos meus pais, Gilvan Raimundo e Iêda Maria, por toda dedicação e incentivos para conclusão dos meus estudos.

À meu amor Mayara Ramos por ter sido meu porto seguro nos momentos de dificuldade, quando eu não acreditei em mim ela sempre me mostrava algo novo pelo que valia a pena lutar, me apoiando e incentivando sempre.

Ao meu irmão de laboratório, Daniel Bezerra, por ter me ajudado com vários ensaios, por me ensinar a lidar com a vida no laboratório e me acostumar com as longas horas.

Aos meu orientador, Adriano, por todo ensinamento, dedicação, e por fornecerem ferramentas para meu crescimento profissional e pessoal, muito obrigado.

Aos técnicos e amigos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Jadilson e Joseildo, pela ajuda na execução de várias etapas deste trabalho.

Aos demais amigos do LEP, Ana, Denion, Portugal por toda ajuda nas diferentes etapas, obrigado pelo apoio e amizade.

Às minhas 'alunas', Bruna e Thalita pela ajuda, companhia, parceria, pelos bons momentos juntos e pela disposição, espero que também possa ter contribuído um pouco na formação de cada uma tanto quanto vocês contribuíram com a minha.

À meu amigo Robson Kel, por me incentivar a fazer o mestrado e pelo apoio e companheirismo durante a jornada.

À minha tia Girlani, que desde pequeno me ensinou o poder do conhecimento.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela oportunidade e aprendizado.

À todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Pesquisas em pavimentação têm buscado alternativas para reduzir o consumo de combustíveis e a emissão de gases causadores do efeito estufa gerados pelas misturas asfálticas convencionais. A redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas é considerada uma alternativa na produção de revestimentos asfálticos capaz de proporcionar vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Denominadas misturas mornas, várias tecnologias são utilizadas para a sua produção. Estas são capazes de diminuir as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas sem alterar suas características. Dentro deste contexto esta pesquisa realizou um estudo comparativo de 4 aditivos: CCBit, Cera de carnaúba, óleo de girassol e óleo de moringa utilizando teores de 1,0%;1,5%;2,0% e 2,5% visando o estudo de suas propriedades reológicas e análise da potencialidade na produção de misturas mornas. Foi observado que todos os aditivos utilizados obtiveram redução na temperatura de compactação e usinagem destacando-se o óleo de moringa que obteve uma redução de 18,3°C. Quando tratamos do melhoramento da qualidade da mistura asfáltica o CCBit ganha destaque pois por sua vez obteve um aumento em seu módulo complexo ( $G^*$ ) aumentando assim a resistência do material. Quando analisados os resultados de forma geral pode-se afirmar que o CCBit e a cera de carnaúba promovem aumento na resistência do ligante enquanto que os óleos indicam perda de resistência com um aumento de sua trabalhabilidade sendo todas opções viáveis de misturas mornas dependendo do local de aplicação.

**Palavras Chave:** Palavras chave: Aditivos, Misturas mornas, Teores.

## ABSTRACT

Pavement researches have been looking for alternatives to reduce fuel consumption and gas emission that cause the greenhouse effect generated by the conventional asphaltic mixes. The reduction of the machining and compaction temperature of asphalt mixes is considered an alternative in production of asphaltic coatings able to provide technical, economic and environmental benefits. Named warm mixes, several technologies are used in their production. They are capable of decreasing the machining and compaction temperatures of the asphaltic mixes without altering its characteristics. In this perspective this research performed a comparative study of 4 additives: CCBit, carnauba wax, sunflower oil and ben tree oil using levels of 1,0%; 1,5%; 2,0%; and 2,5%, intending the study of its rheological properties and analysis of the potentiality in production of warm mixes. It was observed that every additive that was used obtained temperature decrease in compaction and machining especially ben tree oil that obtained a decrease of 18,3°C. When the purpose is the quality improvement of the asphaltic mix the CCBit stands out because it obtained an increase of its complex module ( $G^*$ ) therefore also increasing the matter resistance. When the results are analyzed in a general way it's possible to affirm that the CCBit and the carnauba wax stimulate increase of the binder resistance while the oils indicate loss of resistance with increase of its workability, consequently all of them are viable options of warm mixes depending on its appliance site.

**Key-words:** Additives, Warm mixes, Levels

## SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Objetivos.....	22
1.1.1 Objetivo Geral.....	22
1.1.2 Objetivos Específicos.....	22
1.2 Justificativa.....	22
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1 Misturas Asfálticas.....	24
2.1.1 Classificação das Misturas Asfálticas Quanto a Temperatura.....	26
2.2 Misturas Mornas.....	28
2.2.1 Histórico.....	29
2.2.2 Classificação das Misturas Mornas.....	32
2.2.2.1 Aditivos Surfactantes.....	32
2.2.2.2 Aditivos Orgânicos.....	35
2.2.2.3 Asfalto Espumado.....	40
2.2.3 Vantagens/Desvantagens das Misturas Mornas.....	44
2.3 Considerações Finais.....	46
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 Materiais.....	48
3.1.1 Ligante asfáltico.....	48
3.1.2 CCBIt 113AD.....	49
3.1.3 Cera de Carnaúba.....	50
3.1.4 Óleo de girassol.....	50
3.1.5 Óleo de moringa.....	51
3.2 Métodos.....	52
3.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	52
3.2.1.1 Mistura do CAP com o CCBIt 113 AD.....	52

3.2.1.2 Mistura do CAP com a cera de carnaúba .....	53
3.2.1.3 Mistura do CAP com óleo de moringa.....	54
3.2.1.4 Mistura do CAP com óleo de girassol.....	54
3.2.2 Ensaio de Penetração.....	54
3.2.3 Ponto de amolecimento .....	56
3.2.4 Viscosidade Rotacional .....	57
3.2.5 Recuperação Elástica.....	58
3.2.6 Adesividade .....	58
3.2.7 RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo).....	59
3.2.8 DSR - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico .....	60
3.2.8.1 Curva Mestre .....	61
3.2.8.2 MSCR ( <i>Multiple Stress Creep Recovery</i> ) .....	62
3.2.8.3 PG - Performance Grade .....	63
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1 Caracterização do CAP .....	65
4.1.1 Ensaio de Penetração.....	65
4.1.1.1 CCBit.....	65
4.1.1.2 Óleo de Girassol .....	66
4.1.1.3 Óleo de Moringa.....	68
4.1.1.4 Cera de Carnaúba .....	69
4.1.2 Ponto de Amolecimento .....	70
4.1.2.1 CCBit.....	70
4.1.2.2 Óleo de Girassol .....	71
4.1.2.3 Óleo de Moringa.....	72
4.1.2.4 Cera de Carnaúba .....	73
4.1.3 Recuperação Elástica.....	74
4.1.4 Viscosidade Rotacional .....	75

4.1.4.1 CCBit.....	75
4.1.4.2 Óleo de Girassol .....	79
4.1.4.3 Óleo de Moringa.....	81
4.1.4.4 Cera de Carnaúba .....	83
4.1.5 Perda de massa .....	85
4.1.6 Adesividade.....	86
4.1.7 PG-Grau de Performance (Performance Grade) .....	87
4.1.8 Ensaio MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) .....	93
4.1.9 Monitoramento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) e da $\tan \delta$ em Varredura de Temperatura. ....	103
4.1.10 Avaliação através das Curvas Mestre .....	113
5.0 CONCLUSÕES .....	118
REFERÊNCIAS .....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização do CAP.....	49
Tabela 2 – Normas dos ensaios de caracterização física do CAP .....	53
Tabela 3-Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO com CCBit.....	65
Tabela 4 - Penetração Retida com CCBit.....	66
Tabela 5 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO com Óleo de Girassol .....	67
Tabela 6 - Penetração Retida com Óleo de Girassol .....	67
Tabela 7 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO com Óleo de Moringa .....	68
Tabela 8 - Penetração Retida com Óleo de Moringa.....	69
Tabela 9 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO com Cera de Carnaúba.....	69
Tabela 10 - Penetração Retida com Cera de Carnaúba.....	70
Tabela 11- Ponto de amolecimento antes e após RTFO CCBit.....	70
Tabela 12 - Ponto de amolecimento antes e após RTFO Óleo de Girassol.....	71
Tabela 13 - Ponto de amolecimento antes e após RTFO Óleo de Moringa .....	72
Tabela 14 - Ponto de amolecimento antes e após RTFO Cera de Carnaúba .....	73
Tabela 15 - Recuperação Elástica Antes e Após RTFO CCBit.....	74
Tabela 16- Recuperação Elástica Antes e Após RTFO Óleo de Girassol .....	74
Tabela 17 - Recuperação Elástica Antes e Após RTFO Óleo de Moringa.....	75
Tabela 18- Recuperação Elástica Antes e Após RTFO Cera de Carnaúba .....	75
Tabela 19- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit antes do RTFO..	76
Tabela 20 - Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit após RTFO .....	76

Tabela 21– Temperaturas de usinagem e compactação do CAP Puro e com incorporação do CCBit.....	78
Tabela 22- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Girassol antes do RTFO.....	79
Tabela 23- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Girassol após o RTFO.....	79
Tabela 24– Temperaturas de mistura e compactação do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Girassol.....	80
Tabela 25- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Moringa antes do RTFO.....	81
Tabela 26- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Moringa antes do RTFO.....	81
Tabela 27 – Temperaturas de mistura e compactação do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Moringa.....	83
Tabela 28- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação da Cera de Carnáúba antes do RTFO.....	83
Tabela 29- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação da Cera de Carnáúba após o RTFO.....	83
Tabela 30 – Temperaturas de mistura e compactação do CAP Puro e com incorporação da Cera de Carnáúba.....	85
Tabela 31- Variações de Temperaturas (Usinagem e Compactação).....	85
Tabela 32 – Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO.....	86
Tabela 33 - Resumo do ensaio da de adesividade.....	87
Tabela 34 – Resultados de PG do CAP Puro e com incorporação dos aditivos.....	88
Tabela 35 - Resumo Ensaio MSCR.....	94
Tabela 36 - Resumo Ensaio MSCR.....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva granulométrica com os tipos de graduação: a) Representação convencional de curvas granulométricas; b) Representação de curvas granulométricas pelo SHRP – Superpave (BERNUCCI et al. 2008).....	25
Figura 2– Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção (D´ANGELO et al., 2008).....	26
Figura 3 – Misturas quente e morna recém produzidas (PROWELL E HURLEY, 2007) .....	27
Figura 4 – Imagens infravermelho de pavimentos em construção: a) mistura quente; b) mistura morna (PROWELL E HURLEY, 2007).....	28
Figura 5 – Amostra de Rediset WMX (PEREIRA, 2010).....	34
Figura 6 – Sasobit, em forma de flocos e de pastilha, respectivamente. (PROWELL E HURLEY, 2005).....	36
Figura 7 – Carnaúba (SOARES, 2013).....	38
Figura 8 – Tipos de Cera Provenientes da Carnaúba (D’ALVA, 2004).....	38
Figura 9 – Árvore de moringa (a), vagens (b), flores (c) e sementes (d) (OLIVEIRA, 2010).....	39
Figura 10 – Estrutura Molecular de uma Zeólita (PEREIRA, 2010).....	41
Figura 11 – Sistema Double Barrel® Green Instalado em Usina retirado de <a href="http://www.astecinc.com">www.astecinc.com</a> .....	42
Figura 12– Amostra de Aspha Min .....	43
Figura 13– Esquema de produção e aplicação WMA Foam. (MOTTA, 2011).....	44
Figura 14 - Fluxograma de Caracterização dos Materiais .....	47
Figura 15 – CAP 50/70 .....	48
Figura 16 – CCBIt 13AD .....	49

Figura 17 – Cera de Carnaúba .....	50
Figura 18 – Óleo de Girassol .....	51
Figura 19 – Óleo de Moringa (OLIVEIRA, 2010) .....	52
Figura 20 - Misturador (FISATOM, Modelo 72) com CAP e CCBit .....	52
Figura 21 – Inserção do CCBit no misturador com CAP .....	53
Figura 22– Penetrômetro .....	56
Figura 23 – Realização do ensaio (início, durante e fim, respectivamente) .....	57
Figura 24– Viscosímetro Rotacional .....	57
Figura 25– Ensaio de Recuperação Elástica.....	58
Figura 26– Ensaio de Adesividade .....	59
Figura 27– Aparelho de RTFO .....	60
Figura 28 – DSR modelo Discovery Hybrid Rheometer- DHR 1 .....	61
Figura 29 – Funcionamento do DSR (BERNUCCI et al, 2010) .....	61
Figura 30 – Exemplo de Curva Mestre Antes (a) e Após a Linearização (b).....	62
Figura 31– Classificação SUPERPAVE de ligante asfáltico baseada no PG (Fonte: PAVEMENT INTERACTIVE, 2015).....	64
Figura 32-Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO CCBit.....	65
Figura 33 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO Óleo de girassol	67
Figura 34 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO Óleo de Moringa .....	68
Figura 35 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO Cera de Carnaúba .....	69
Figura 36- Ponto de amolecimento antes e após RTFO CCBit.....	71
Figura 37- Ponto de amolecimento antes e após RTFO Óleo de Girassol .....	72



Figura 56 - Curvas do $G^*/\sin\delta$ versus temperatura antes do RTFO-Cera de Carnaúba.	92
Figura 57 - Curvas do $G^*/\sin\delta$ versus temperatura após o RTFO-Cera de Carnaúba....	93
Figura 58 - Valores do percentual de recuperação CCBit .....	96
Figura 59 - Valores do percentual de recuperação Óleo de Girassol .....	96
Figura 60 - Valores do percentual de recuperação Óleo de Moringa .....	97
Figura 61 - Valores do percentual de recuperação Cera de Carnaúba.....	97
Figura 62 - Valores da compliância não-recuperável (Jnr)- CCBit.....	98
Figura 63 - Valores da compliância não-recuperável (Jnr)- Óleo de Girassol .....	98
Figura 64 - Valores da compliância não-recuperável (Jnr)- Óleo de Moringa.....	99
Figura 65 - Valores da compliância não-recuperável (Jnr)- Cera de Carnaúba.....	99
Figura 66 - Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável- CCBit .....	101
Figura 67 - Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável- Óleo de Girassol .....	101
Figura 68 - Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável- Óleo de Moringa .....	102
Figura 69 - Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável- Cera de Carnaúba.....	102
Figura 70 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura antes do RTFO- CCBit .....	103
Figura 71 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura após o RTFO- CCBit .....	103
Figura 72 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura antes do RTFO- Óleo de Girassol.....	104

Figura 73 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura após o RTFO- Óleo de Girassol .....	105
Figura 74 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura antes do RTFO- Óleo de Moringa .....	106
Figura 75 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura após o RTFO- Óleo de Moringa .....	106
Figura 76 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura antes do RTFO- Cera de Carnaúba.....	107
Figura 77 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura após o RTFO- Cera de Carnaúba.....	107
Figura 78 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura antes do RTFO- CCBit .....	108
Figura 79 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura após o RTFO- CCBit .....	109
Figura 80 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura antes do RTFO-Óleo de Girassol .....	110
Figura 81 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura após o RTFO- Óleo de Girassol .....	110
Figura 82 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura antes RTFO- Óleo de Moringa .....	111
Figura 83 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura após o RTFO- Óleo de Moringa.....	111
Figura 84 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura antes RTFO- Cera de Carnaúba.....	112
Figura 85 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura após o RTFO- Cera de Carnaúba .....	113
Figura 86 - Curva Mestre CCBit .....	114

Figura 87 - Curva Mestre Óleo de Girassol.....	115
Figura 88 - Curva Mestre Óleo de Moringa .....	116
Figura 89 - Curva Mestre Cera de Carnaúba .....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS

%R	Percentual de recuperação
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
ASTM	American Society for Testing Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CT1	Cera tipo 1
CT3	Cera tipo 3
CT4	Cera tipo 4
DAT	Dispersed Asphalt Technology
diff	Diferença percentual entre as compilâncias não-recuperáveis
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
ET	Evotherm™
FHWA	Federal Highway Administration
G*	Módulo complexo de cisalhamento
G'	Componente elástica recuperável
G''	Componente viscosa não recuperável
H	Tráfego pesado
Jnr	Compilância não-recuperável
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PG	Performance Grade
RCRT	<i>Repeated Creep and Recovery Test</i>
RTFO	Estufa de Filme Fino Rotativo
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFS	Universidade Federal de Sergipe
WMX	Rediset™
$\delta$	Ângulo de fase

# CAPÍTULO 1

---

## 1.0 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a preocupação com o meio ambiente está cada vez mais em evidência. A busca por sustentabilidade é constante, ou seja, produtos, materiais e métodos que nos permitam ser eficientes causando o mínimo de danos ao meio ambiente.

O aumento gradativo do número de veículos que circulam, juntamente com a grande parte da malha rodoviária ainda não pavimentada no Brasil impulsionam a busca por novas tecnologias capazes de gerar pavimentos de boa qualidade, menor custo e que nos permitem reduzir os gases que potencializam o efeito estufa, contribuindo assim, com as questões ambientais.

De forma geral a produção de misturas asfálticas ocorre com temperaturas entre 140°C e 180°C para garantir estabilidade e durabilidade fazendo-se necessário a queima de combustíveis durante sua usinagem. As misturas mornas mornas (em inglês Warm Mix Asphalt) surgiram visando reduzir as temperaturas, a queima de combustíveis e conseqüentemente da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa (BUDNY, 2012).

Preocupados em cumprir as metas estabelecidas pelo protocolo de Kyoto em 1997, e com a exposição de seus trabalhadores a fumos de asfalto nos anos 90, vários países da Europa começaram a utilizar as misturas mornas e no começo dos anos 2000 os norte-americanos, por meio do FHWA (*Federal Highway Administration*), em conjunto com a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e a NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) buscaram essa tecnologia visando os benefícios ambientais e humanitários (MOTTA, 2011).

Diversos autores (Motta, 2011; Budny, 2012; etc) afirmam que a redução das temperaturas de usinagem e compactação das misturas mornas proporcionam grandes benefícios em relação ao meio ambiente, o ambiente de trabalho e a qualidade final do material. Contudo é necessário uma análise completa das novas propriedades do material, mecânicas e reológicas para garantir assim a sua viabilidade técnica e econômica.

No Brasil o estudo desta tecnologia teve início junto a institutos de pesquisas com fins acadêmicos, e existe atualmente, trechos experimentais ao longo da malha rodoviária. Assim o desenvolvimento de diferentes pesquisas capazes de validar estes métodos no Brasil é de suma importância tendo em vista a necessidade e a capacidade de aplicação presente neste país. Dentro desse contexto a pesquisa propõe um estudo sobre a adição de quatro modificadores ao CAP puro: CCBIt, Cera de Carnaúba, Óleo de Girassol e Óleo de Moringa.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Estudar a influência da adição de CCBIt, óleo de girassol, óleo de moringa e cera de carnaúba para a redução da temperatura de usinagem de ligantes asfálticos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Desenvolver um asfalto modificado utilizando os aditivos mencionados;
- Avaliar os efeitos da adição dos modificadores sobre as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos;
- Verificar e quantificar a redução da temperatura de compactação e usinagem com a incorporação de diversos teores de aditivo à mistura asfáltica;
- Avaliar as misturas modificadas, com o aditivo, em comparação às de referência, por meio de ensaios experimentais;

## **1.2 Justificativa**

Considerando a malha rodoviária existente em nosso país pode-se afirmar que existe um espaço para as misturas mornas tendo em vista os benefícios que elas trazem. As misturas mornas apresentam uma redução significativa de emissão de poluentes atmosféricos pois são emitidos menos vapores e fumos durante a usinagem e aplicação devido ao fato de parte do combustível que seria utilizado nesses processos deixar de ser queimado.

A utilização de misturas mornas também possibilita melhorias ao ambiente de trabalho deixando os operários menos expostos às emissões além de reduzir o envelhecimento por oxidação do ligante asfáltico tornando-o mais flexível e resistente a trincas por fadiga.

Outra situação que traz preocupações quando trata-se de pavimentação é a perda de temperatura da mistura asfáltica durante seu transporte. Nesse contexto as misturas mornas se destacam pois apresentam uma taxa de resfriamento menor do que as misturas usinadas a quente apresentando assim um maior potencial de tempo de estocagem e de transporte evitando o desperdício de misturas asfálticas.

Considerando que o objetivo das misturas asfálticas mornas é ser equivalente, ou melhor do que as misturas usinadas a quente, pode-se afirmar que esta pesquisa que procura trabalhar com 4 aditivos diferentes para desenvolver um asfalto de qualidade que possa reduzir emissões de gases, bem como o gasto de energia e temperatura durante o transporte, além de proporcionar um ambiente de trabalho mais propício ao operário, é de suma importância tendo em mente o potencial que o Brasil tem a oferecer no quadro da pavimentação considerando que uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte apontou que apenas 12% da malha rodoviária nacional é pavimentada. Entre as rodovias pavimentadas, 44,7% apresentam desgastes e 19,1% exibem trincas e remendos. Para o estudo, foram percorridos quase 100 mil quilômetros. Deste total, apenas 32,4% apresentavam perfeitas condições.

## CAPÍTULO 2

---

### 2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados estudos bibliográficos de relevância para o desenvolvimento desta pesquisa, abordando tópicos como, misturas asfálticas convencionais, diversos tipos de aditivos modificadores e misturas mornas.

#### 2.1 Misturas Asfálticas

As rodovias no Brasil apresentam desde 2001 um progressivo aumento no tráfego de veículos, resultando na necessidade de suportar esforços constantes e, cada vez, de maior intensidade. A camada de revestimento é a responsável por absorver a maior parte do esforço. Estabilidade, durabilidade e flexibilidade estão entre as principais características para um bom desempenho da camada de revestimento (BERNUCCI *et al.* 2008).

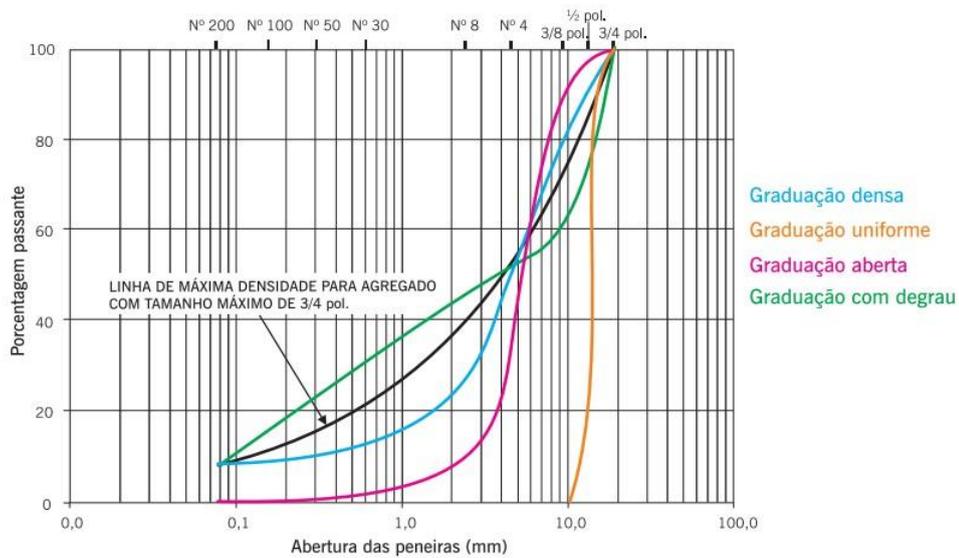
Existem vários métodos de produção e tipos de misturas asfálticas que são utilizadas nas camadas de revestimento do pavimento, e podem ser preparadas na própria pista ou em usinas móveis. As misturas asfálticas são produzidas conforme um projeto, que pode ser elaborado de acordo com o método Marshall, o mais utilizado no Brasil atualmente, ou o método SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*), em fase inicial de uso no Brasil, mas bastante conhecido nos Estados Unidos, onde foi desenvolvido.

Segundo Bernucci *et. al.* (2008) as misturas asfálticas à quente possuem subdivisões de acordo com a graduação dos agregados e fíler, como ilustrado na Figura 01:

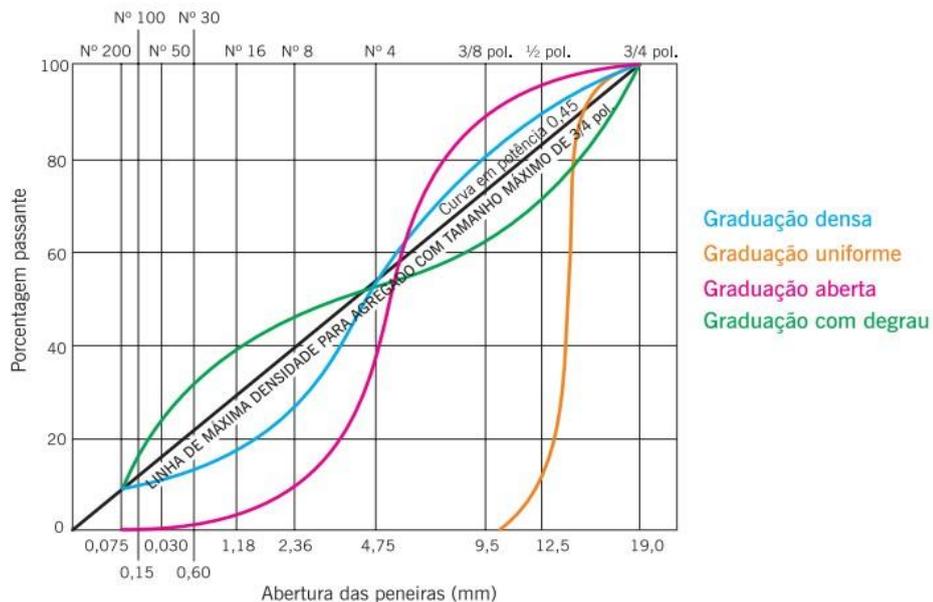
- graduação densa: apresenta poucos vazios, visto que sua curva granulométrica é contínua e bem graduada;
- graduação aberta: possui característica drenante, devido à presença de muitos vazios, tem curva granulométrica uniforme e agregados com dimensões parecidas;

- graduação uniforme: curva granulométrica com faixa estreita, há pequena diferença de tamanho entre as partículas; e
- graduação descontínua ou com degrau: curva granulométrica descontínua, maior presença de grãos com dimensões maiores e menores e menor presença de grãos com dimensões intermediárias.

Figura 1 - Curva granulométrica com os tipos de graduação: a) Representação convencional de curvas granulométricas; b) Representação de curvas granulométricas pelo SHRP – Superpave (BERNUCCI et al. 2008)



(a) Representação convencional de curvas granulométricas



(b) Representação de curvas granulométricas pelo SHRP-Superpave

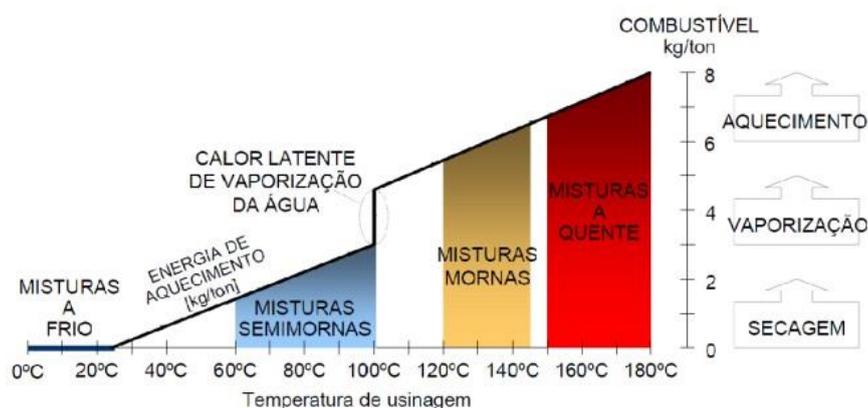
As propriedades do ligante asfáltico sofrem alterações em função do tempo desde sua fabricação na refinaria até o final de sua vida útil em uma rodovia. Esta evolução é traduzida pela perda de suas propriedades mecânicas e é conhecida como envelhecimento. Este é o principal fator que ocasiona problemas nas misturas asfálticas a quente (CEZARO JUNIOR et al. 2008).

A durabilidade de uma mistura asfáltica pode ser definida como a sua habilidade em manter as propriedades reológicas, coesão e a adesão ao longo do tempo de uso. Entre os principais fatores que afetam a durabilidade de um revestimento asfáltico, podemos citar os endurecimentos oxidativo, evaporativo e exsudativo.

### 2.1.1 Classificação das Misturas Asfálticas Quanto a Temperatura

As misturas asfálticas podem ser divididas em quatro grupos distintos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio, baseado na temperatura de usinagem como podemos observar na Figura 02. Na Figura 02 observa-se os tipos de misturas asfálticas, classificadas de acordo com a temperatura de usinagem e quantidade de combustível utilizados no processo de produção. As misturas semimornas e mornas são consideradas misturas de baixa energia. Verifica-se ainda o alto consumo de combustível na usinagem da mistura a quente, tendo em vista a necessidade da secagem dos agregados pétreos, manutenção da temperatura e redução da viscosidade do asfalto.

Figura 2– Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção (D'ANGELO et al., 2008)



As misturas à quente são preparadas a partir do aquecimento dos agregados e do ligante asfáltico com temperaturas variando entre 150°C e 180°C, sendo também a mais utilizada em pavimentação já que garantem uma boa resistência e durabilidade.

As misturas mornas e semimornas são produzidas utilizando temperaturas intermediárias às das misturas a quente e a frio. O que diferencia estes dois tipos são a tecnologia empregada e a temperatura final de usinagem donde pode-se afirmar que entre 60°C e 100°C a mistura é semimorna e entre 100°C e 150 °C a mistura é morna.

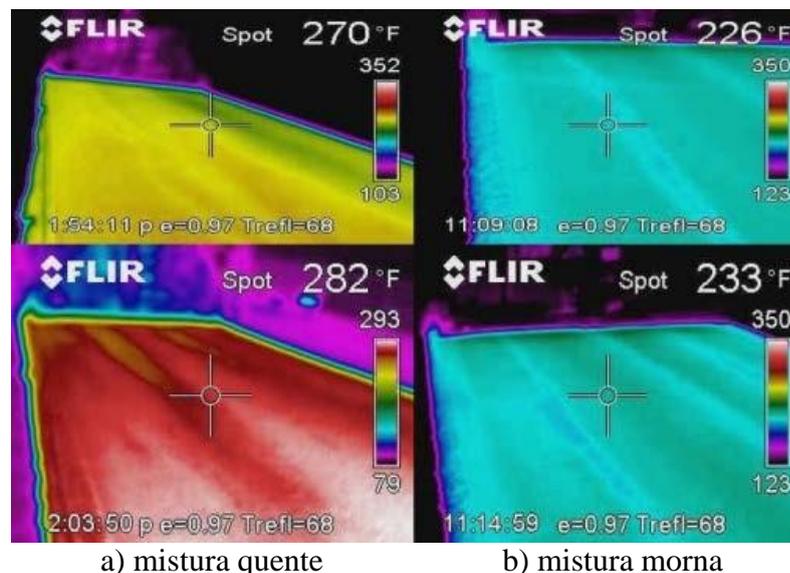
Por fim, as misturas a frio são produzidas sem a necessidade de aquecimento utilizando emulsões asfálticas, tendo seu uso geralmente restrito a pavimentos de baixo volume de tráfego, por não serem tão resistentes quanto as demais.

A Figura 03 demonstra a redução de emissões de fumos asfálticos quando utilizamos as misturas mornas e na Figura 04 é nítida a diferença de temperatura na construção do pavimento utilizando misturas a quente e misturas mornas.

Figura 3 – Misturas quente e morna recém produzidas (PROWELL E HURLEY, 2007)



Figura 4 – Imagens infravermelho de pavimentos em construção: a) mistura quente; b) mistura morna (PROWELL E HURLEY, 2007)



A temperatura tem participação direta na qualidade do asfalto tendo em vista que tanto a temperatura do ligante asfáltico quanto a do agregado a ser utilizado devem estar em harmonia e aquecidos o suficiente para que a mistura se mantenha fluída na fase do recobrimento. O ligante asfáltico, por sua vez, quando aquecido em temperaturas superiores a 100°C dobra a taxa de oxidação a cada aumento de 10°C, o que o torna mais frágil, menos dúctil, menos elástico e consequentemente mais susceptível ao trincamento. Todavia a redução da temperatura de fabricação, que apresentam as misturas mornas e semimornas, pode levantar algumas preocupações como a perda de propriedades físicas do asfalto como coesão e adesão, além de poder prejudicar a secagem do agregado que por sua vez pode aumentar o consumo de combustível da usina e gerar problemas com a adesividade do material (BUDNY, *et al.* 2012).

Entretanto várias técnicas existem e vem sendo desenvolvidas com o intuito de contornar tais situações como o uso de aditivos capazes de melhorar a adesividade do ligante, seu recobrimento, reduzir a deformação permanente, além de reduzir sua viscosidade.

## 2.2 Misturas Mornas

Para a produção de misturas asfálticas convencionais deve-se aquecer o ligante asfáltico bem como os agregados em temperaturas que variam entre 150°C e 200° para que o ligante seja capaz de envolver os agregados formando assim uma mistura

homogênea. Para a obtenção de tais temperaturas existe um processo de usinagem que requer uma alta quantidade de energia, que geralmente ocorrem devido a queima de combustíveis fósseis, que por sua vez liberam uma grande quantidade de gases tóxicos nocivos ao homem e ao meio ambiente. Torna-se evidente então a necessidade de redução deste consumo de energia e por consequência a emissão destes gases, o que abre espaço para as misturas asfálticas mornas. Estas são capazes de manter as mesmas qualidades de uma mistura a quente gerando melhores ambientes de trabalho, melhor trabalhabilidade, maiores lucros, qualidade, durabilidade e menos danos ao meio ambiente.

Para a obtenção das misturas asfálticas mornas, existem vários processos que podem ser utilizados, variando assim, desde a tecnologia empregada à escolha do ligante asfáltico.

### **2.2.1 Histórico**

Em 1956, o professor Csanyi, da Universidade do Iowa, fez uma avaliação do potencial de aplicação da espuma de betume, que se forma introduzindo vapor de água no betume quente podendo ser utilizado como ligante para solos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Em 1968 a empresa Mobil Oil na Austrália, detentora da patente da descoberta de Csanyi, adotou o caminho inverso, passando a injetar água fria no lugar do vapor agilizando a produção do betume-espuma (KRISTJANSDOTTIR *et al.*, 2007).

Em 1977 a empresa Chevron publica o manual *Bituminous Mix* contendo informações sobre a metodologia de dimensionamento, a formulação e a produção de misturas betuminosas estabilizadas com emulsões (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Posteriormente são publicados manuais sobre o assunto: *A Federal Highway Administration* (FHWA) em 1979 e a *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA) em 1981 (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

Passados 15 anos, Maccarone *et al.* (1994) realizaram estudos sobre as misturas asfálticas a frio com betume espuma como ligante, e as misturas asfálticas com elevado conteúdo de emulsão, chegando à conclusão que este tipo de mistura é de grande sucesso devido à eficiência energética e às baixas emissões geradas, todavia também se concluiu que apesar da redução dos impactos ao meio ambiente as misturas

asfálticas a frio jamais possuiriam o mesmo desempenho que as misturas asfálticas a quente (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

Em 1995, A empresa Shell patenteou uma técnica que utiliza dois componentes, o que resultaria no desenvolvimento da tecnologia *WAM-Foam* (HARRISON e CHRISTODULAKI, 2000 *apud* CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Ainda no mesmo ano, na Alemanha, são executadas as primeiras rodovias com revestimento composto por mistura morna, por meio da adição de Aspha-Min®, uma zeólita sintética. Posteriormente esta tecnologia é aplicada também na Noruega e na Dinamarca (PROWELL e HURLEY, 2007). A União Europeia começou a buscar formas de cumprir as metas estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, e o Ministério do Trabalho e das Relações Sociais alemã passou a considerar limites máximos de exposição para os trabalhadores expostos a fumos de asfalto em 1996 (MOTTA, 2011).

Em 1997 foi dado início a comercialização do aditivo Sasobit® na Europa, pela empresa *Sasol Wax International AG* (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Ainda em 1997, a Alemanha inicia o programa Low Temperature Asphalt que tem como objetivo investigar métodos para produção de misturas asfálticas à temperaturas mais baixas que aquelas a quente (BARTHEL *et al.*, 2004).

Em 1999 Jenkins *et al.* (1999) pôde verificar os benefícios do aquecimento do agregado a temperaturas abaixo de 100°C, antes da aplicação da espuma de asfalto. De acordo com os pesquisadores, o pré-aquecimento dos agregados elevou o recobrimento, a coesão da mistura, a resistência à tração e à compactação (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

No ano de 2000, durante uma Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidney, Harrison e Christodulaki apresentaram o processo de produção das misturas mornas (OTTO, 2009).

Mais tarde em 2006, no Brasil, é publicado um dos primeiros trabalhos a respeito de misturas mornas por Souza Filho. Um ano depois em 2007 os norte-americanos, por meio do FHWA (*Federal Highway Administration*), em conjunto com a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e a NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) buscaram essa tecnologia

visando os benefícios ambientais e humanitários (MOTTA, 2011).

Em 2009 Otto (2009) realiza estudo para verificar a fadiga e o módulo complexo em misturas asfálticas mornas. Cavalcanti (2010) fez um estudo com diversos aditivos em misturas asfálticas avaliando o efeito destes materiais na vida de fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. O autor concluiu que houve uma melhoria na trabalhabilidade e em sua compactação, uma redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante e uma consequente melhoria no desempenho em termos de resistência a formação de trincas.

Em 2011 foi concluído o relatório NCHRP 691 visando apresentar métodos e procedimentos a serem utilizados em misturas mornas. Motta (2011) elabora um estudo visando avaliar a diminuição do consumo energético e da emissão de poluentes gerados pela mistura morna em comparação com as misturas produzidas a temperaturas convencionais, onde alguns resultados obtidos em estudos na Europa mostram uma queda da ordem de 30 a 40% de gás carbônico - CO<sub>2</sub> (relacionado aos GEE) e dióxido de enxofre - SO<sub>2</sub> (ligado às chuvas ácidas), 50% de compostos orgânicos voláteis - COVs (precursores do ozônio<sup>1</sup> e associados aos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos - HPAs), 10 a 30% de monóxido de carbono - CO (indicadores de eficiência de queima), 60 a 70% de óxidos de nitrogênio - NO<sub>x</sub> (precursores de ozônio) e 20 a 25% de materiais particulados.

Budny (2012) realizou um estudo com o intuito de avaliar o comportamento mecânico das misturas mornas, onde então foram adotados aditivos como CCBit113AD e o AD-WARM, e pode-se comprovar que as misturas resultantes apresentaram boa resistência com relação a esforços prolongados como os de tráfego.

Na UFCG, Sales (2015) concluiu que utilização do aditivo CCBit proporcionou uma mistura em termos volumétricos e mecânicos satisfatória, podendo ser considerada uma alternativa promissora e interessante por apresentar boas propriedades ao ligante asfáltico, quanto ambiental por promover redução de emissão de gases causadores do efeito estufa com a redução da queima de combustíveis.

## **2.2.2 Classificação das Misturas Mornas**

Atualmente, a produção de misturas asfálticas mornas é possível devido as seguintes técnicas: espumejo do asfalto, introdução de aditivos orgânicos e aditivos surfactantes.

### **2.2.2.1 Aditivos Surfactantes**

Aditivos Surfactantes são tecnologias que se baseiam na introdução destes no ligante asfáltico, ou em emulsões com elevado teor de resíduo asfáltico com o intuito de produzir misturas mornas e semimornas. Estes produtos, geralmente atuam fortemente na adesividade do material melhorando a ligação entre o agregado e o ligante, além de melhorar o processo de recobrimento. Verificou-se que os aditivos surfactantes não causam alteração nas propriedades de consistência do asfalto, que são medidas nos ensaios de viscosidade, penetração e ponto de amolecimento. Hanz et al. (2010) realizaram testes de viscosidade de ligantes com e sem um aditivo (Revix™) em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e de fato, verificou-se, que não houve mudança nesta propriedade porém, foram verificadas várias diferenças quando voltados os olhos para a propriedade de lubrificação do asfalto (MOTTA, 2011).

A introdução dos aditivos surfactantes pode ser realizada antes e durante a usinagem possuindo um sistema de utilização simples que não necessita de alterações na planta de usina evitando assim custos iniciais. De acordo com a tecnologia utilizada se torna-se possível a redução da temperatura de usinagem por volta de 30°C à 40°C.

Dentre os aditivos pertencentes a classe surfactante pode-se citar alguns exemplos como: Cecabase RT®, Evotherm™, Gemul XT14, Rediset™ WMX, Revix™.

#### **Evotherm™**

A tecnologia de mistura morna Evotherm™ utiliza um “pacote químico” misturado a uma emulsão ou a um ligante, tendo sido desenvolvida pela empresa norte-americana MeadWestvaco. A tecnologia Evotherm™ permite uma redução da temperatura de usinagem e de compactação de misturas mornas seja da ordem de 50 a 75°C em comparação com uma mistura em temperatura convencional (D'ANGELO et al., 2008).

O pacote químico anteriormente citado possui como finalidade, melhorar a adesividade, o recobrimento e a trabalhabilidade das misturas asfálticas podendo ser alterado de acordo com o agregado a ser utilizado (D'ANGELO et al., 2008). Denominado Evotherm™ *Emulsion Technology (ET)*, o pacote químico é misturado a uma emulsão com alto resíduo de asfalto (70%) e, posteriormente, a estocagem deve ser feita a 80°C. Na usinagem esta emulsão deve ser misturada com os agregados aquecidos, visando fabricar misturas asfálticas com temperaturas que variam entre 85 e 115°C, sendo que nesta etapa a maior parte da água contida na emulsão sofre vaporização ao entrar em contato com os agregados quentes. Por fim, estes últimos ficam bem recobertos e a mistura morna resultante aparenta uma cor negra, característica de misturas a quente (PROWELL e HURLEY, 2007; D'ANGELO et al., 2008).

Posteriormente, o Evotherm™ ET passou a ser substituído por um novo processo denominado Evotherm™ *Dispersed Asphalt Technology (DAT)*, no qual o pacote químico passou a ser diluído com uma pequena quantidade de água e injetado no ligante asfáltico, e não mais em uma emulsão, sendo esta injeção realizada diretamente na linha de asfalto, imediatamente antes do misturador de usinas drum- mixer ou diretamente no pugmill de usinas gravimétricas (D'ANGELO et al., 2008).

No caso da tecnologia ET, o pacote químico é vendido já misturado à emulsão, enquanto na DAT o cliente apenas recebe o produto para incorporá-lo ao ligante, ocasionando uma redução dos custos de transporte, permitindo assim que a usina transite rapidamente entre os processos de fabricação da mistura morna e da mistura convencional (D'ANGELO et al., 2008).

No caso do método ET, a emulsão pode ser bombeada diretamente da carreta ou estocada em um tanque, mas deve-se atentar para a quantidade de asfalto residual na emulsão, podendo haver a necessidade de aumento do seu teor para que a quantidade de água fique em 30%. Na técnica DAT se faz necessário a instalação de uma bomba volumétrica para o pacote químico e de um ponto de injeção na linha existente de asfalto (D'ANGELO et al., 2008).

### Rediset™

O Rediset™ WMX é um aditivo surfactante desenvolvido pela empresa holandesa Akzo Nobel, que combina agentes surfactantes e aditivos orgânicos, sendo

comercializado em forma de pastilhas. Possui elementos capazes de melhorar o recobrimento do ligante sobre a superfície dos agregados, proporcionando efeito antistripping à mistura asfáltica por atuarem como melhoradores de adesividade e que ainda conferem alguma redução da viscosidade do ligante, reduzindo a temperatura da mistura asfáltica final em cerca de 30°C comparada à de uma mistura em temperatura convencional (PROWELL e HURLEY, 2007).

Figura 5 – Amostra de Rediset WMX (PEREIRA, 2010)



Em geral, este produto é empregado utilizando-se uma taxa de 1,5 a 2,5% em massa de ligante, o que não é suficiente para alterar significativamente as propriedades de consistência do asfalto em que é adicionado. A incorporação do Rediset<sup>TM</sup> WMX na produção de misturas mornas é simples e não requer alterações na planta de usina, podendo ser feita diretamente no tanque de asfalto aquecido ou na mistura em usinas gravimétricas ou drum-mixer.

#### Revix<sup>TM</sup>

O Revix<sup>TM</sup> é uma tecnologia de misturas mornas produzidas com aditivos surfactantes, que foi desenvolvida pelas empresas norte-americanas Mathy Technology and Engineering Services e Paragon Technical Services. Este sistema é baseado na utilização de uma variedade de surfactantes, ceras, auxiliares de processo, polímeros, ácidos e outros materiais, o que permite que haja uma redução do atrito interno entre as partículas de agregados e as finas películas de ligante quando estes materiais se encontrarem submetidos às altas taxas de cisalhamento durante o processo de mistura e à grandes tensões de cisalhamento na compactação (PROWELL e HURLEY, 2007).

## Cecabase RT<sup>®</sup> e o Gemul XT14

O Cecabase RT<sup>®</sup> é produzido pela empresa francesa Ceca do grupo Arkema, enquanto que o Gemul XT14 é um produto da empresa brasileira Quimigel. De acordo com o fornecedor do Gemul XT14, este aditivo é um agente tensoativo composto de amidas sintéticas.

O Cecabase RT<sup>®</sup> e o Gemul XT14 são aditivos encontrados em forma líquida, que atuam como tensoativos ou agentes de superfície (surfactantes), que permitem que o ligante possa recobrir os agregados de forma adequada quando a usinagem ocorre em temperaturas mais baixas que o habitual para a produção de misturas mornas, além disso, atuam como melhoradores de adesividade (MOTTA, 2011).

O Cecabase RT<sup>®</sup> e o Gemul XT14 podem ser utilizados em misturas mornas com ligantes convencionais ou modificados, permitindo que a temperatura da mistura asfáltica final seja cerca de 30°C inferior à de uma mistura em temperatura convencional.

### **2.2.2.2 Aditivos Orgânicos**

Os aditivos orgânicos ao serem misturados com o ligante asfáltico possuem a capacidade de modificar suas propriedades reológicas resultando principalmente na redução de sua viscosidade. Tais mudanças ocorrem ao elevar-se a temperatura do ligante acima do seu ponto de amolecimento. A escolha do tipo e da taxa de aditivo orgânico utilizados para a produção de uma mistura morna deve ser feita de modo cauteloso, visando à temperatura na qual ocorre o ponto de amolecimento destes produtos e à temperatura esperada na vida de serviço do pavimento, a fim de se obter uma redução do risco de deformação permanente e também minimizar o potencial de trincamento por baixas temperaturas (PROWELL e HURLEY, 2007). Isto se deve ao fato de que pode haver uma redução drástica da viscosidade do ligante, além de existir o risco de um forte enrijecimento da mistura asfáltica devido a grandes quantidades de aditivo utilizado.

Os aditivos orgânicos podem ser incorporados antes e durante a usinagem, resultando em uma redução da temperatura de mistura em cerca 30 a 40°C. Após o resfriamento da mistura asfáltica, estes elementos passam por um processo onde os mesmos se cristalizam de modo disperso no ligante, resultando num aumento da rigidez deste asfalto e, por consequência, da mistura como um todo (RÜHL, 2008). Entre alguns

tipos de aditivos orgânicos encontram-se: Asphaltan B<sup>®</sup>, CCBIt 113AD, Licomont BS 100<sup>®</sup> e Sasobit<sup>®</sup>.

### Sasobit<sup>®</sup>

Sasobit é uma cera parafínica, tipo Fischer-Tropsch (F-T), produzida pela empresa alemã Sasol Wax GmbH que permite a produção de misturas mornas por redução da viscosidade do ligante, consequentemente reduzindo as temperaturas de trabalho de 18°C a 54 °C. As ceras F-T são obtidas a partir da gaseificação do carvão na presença de um catalisador e caracterizam-se por uma longa cadeia de hidrocarbonetos alifáticos de polimetileno (HURLEY e PROWELL, 2005b).

Figura 6 – Sasobit, em forma de flocos e de pastilha, respectivamente.  
(PROWELL E HURLEY, 2005)



Os processos de mistura asfálticas com Sasobit<sup>®</sup> vem sendo realizados do mesmo modo que os de misturas convencionais, havendo somente a incorporação do produto na mistura e a redução da temperatura de usinagem. Sua adição pode ser feita tanto ao ligante antes da usinagem, quanto à mistura imediatamente antes da entrada do ligante ou em conjunto com este (PROWELL e HURLEY, 2007).

A temperatura final da mistura asfáltica morna com Sasobit<sup>®</sup> chega a ser até 30°C menor do que a temperatura de uma mistura convencional (MALLICK et al., 2009; WASIUDDIN et al., 2007).

## CCBit

De acordo com Hutschenreuther (2010) o CCBit é um éster metílico de ácido graxo, fornecido na forma de pó, que pode também ser encontrado na forma de grânulos ou flocos possui cor amarela esbranquiçada e não possui odor. O seu ponto de liquefação é de aproximadamente 139°C e ponto de fulgor de 279°C, sendo insolúvel em água à 20°C e com densidade variando entre 0,99 – 1,01 g/cm<sup>3</sup> (23°C). Seu pH é 9 (10g diluídos em 100 ml de água) e sua viscosidade dinâmica é de aproximadamente 15mPa.s (150°C).

OLIVEIRA (2014) fez um estudo analisando os efeitos do CCBit 113AD no comportamento mecânico de misturas asfálticas e ficou constatado que a adição de 2,5% de aditivo era capaz de reduzir a temperatura de usinagem e compactação em até 40°C. Esta redução de temperatura ocorre sem que haja perdas das propriedades originais do CAP gerando uma melhor trabalhabilidade do material.

## Cera de Carnaúba

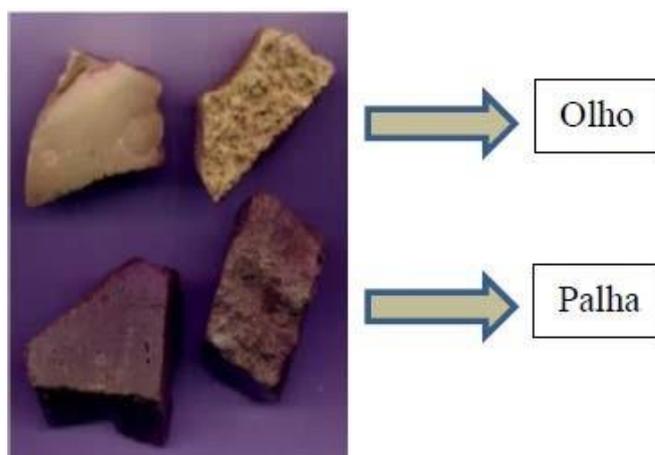
A carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma palmeira nativa da região semiárida do Nordeste brasileiro. Esta é encontrada em grande quantidade no estado do Ceará sendo considerada uma planta xerófila, ou seja, capaz de resistir às secas. A carnaúba tem folhas em forma de leque, cobertas em ambas as superfícies, por uma camada cerosa. Os sertanejos têm diferentes denominações para as folhas da carnaúba: as folhas novas que ainda não abriram são os “olhos”, as folhas verdes maduras são as “palhas”, as folhas intermediárias ou olhos recém-abertos são as “medianas ou bandeiras” e as folhas velhas secas aderidas à carnaúba são as “palhas bravas” (D’ALVA, 2004).

Figura 7 – Carnaúba (SOARES, 2013)



De acordo com a denominação da folha em que a cera é produzida e do processo de refino há uma subdivisão na sua nomenclatura. Assim a cera tipo 1 (CT1) de coloração clara, é obtida pela filtragem da cera “olho”, enquanto que a partir da filtragem da cera “palha” são obtidas as ceras CT3 (filtrada e clareada), a CT4 (filtrada) e a CT4 obtida pelo processo de centrifugação (D’ALVA, 2004).

Figura 8 – Tipos de Cera Provenientes da Carnaúba (D’ALVA, 2004)



Wargha Filho (2013) apresentou um estudo que concluiu que utilizando um teor de 5% de cera de carnaúba em relação ao peso do CAP se torna possível a utilização da mistura asfáltica a 125°C, ou seja, quando comparado com o CAP de referência o aditivo proporcionou uma redução de 20°C para a temperatura de compactação. O CAP

modificado com Cera CT4 proporcionou uma expressiva redução da viscosidade quando comparado aos CAP puro, aumento na resistência ao envelhecimento e maior resistência a tração por compressão, comprovando assim sua eficácia como aditivo orgânico.

### Óleo de Moringa

A *Moringa Oleífera Lam*, ilustrada na Figura 09, é uma espécie perene da família Moringa, sendo classificada como uma leguminosa arbórea adaptada às condições áridas e semi-áridas que vem sendo cultivada e difundida em toda a área denominada “polígono das secas”, devido, o potencial que suas sementes têm apresentado no tratamento de água para uso doméstico, uma vez que seu efeito coagulante serve para clarificar água (OLIVEIRA, 2010). Portanto, como o óleo da *Moringa Oleífera Lam* é oriundo de fonte renovável e biodegradável, ele pode ser utilizado como um aditivo ecologicamente correto. Por possuir características antioxidantes e propriedades tensoativas o mesmo se mostra promissor como redutor de viscosidade dos ligantes. Tais características se dão ao fato da presença do ácido Oleico que por sua vez faz com que a mistura adquira uma resistência a oxidação (ABDULKARIM, 2007).

Figura 9 – Árvore de moringa (a), vagens (b), flores (c) e sementes (d) (OLIVEIRA, 2010).



### Óleo de Girassol

O óleo de girassol é produzido industrialmente a partir das sementes de girassol.

Estas são limpas, secas, descascadas, trituradas e extraídas com solvente. Finalmente, o produto assim obtido é dessolventizado e sofre todo um processo de refinação, com diferentes etapas que incluem processos químicos e físicos de tratamento, como por exemplo: desgomagem, branqueamento, desodorização. Como todos os óleos vegetais, o óleo de girassol é essencialmente constituído por triacilgliceróis (98 a 99%). Tem um elevado teor em ácidos insaturados (cerca de 83%), mas um reduzido teor em ácido linolénico ( $\leq 0,2\%$ ). O óleo de girassol é essencialmente rico no ácido gordo essencial (AGE), ácido linoleico. As variações no seu teor são consequência não só da variedade, mas também das diferenças climáticas durante o seu cultivo. O óleo de girassol apresenta como constituinte maioritário da sua fracção tocoferólica a forma alfa-tocoferol, ao contrário da maioria dos óleos vegetais que têm a forma gama-tocoferol. O alfa-tocoferol presente no óleo de girassol apresenta, a temperaturas elevadas, menor actividade antioxidante do que o gama-tocoferol dos óleos em que é mais abundante. Por outro lado, o óleo de girassol apresenta maior actividade em vitamina E (alfa-tocoferol tem 1,49 IU/mg) do que os óleos onde predomina a forma gama-tocoferol (0,14 IU/mg).

### **2.2.2.3 Asfalto Espumado**

O asfalto espumado é uma tecnologia que tem por objetivo proporcionar uma reação térmica entre a água em sua temperatura ambiente e o CAP aquecido, gerando a espuma de asfalto que por sua vez irá auxiliar no recobrimento do asfalto e na trabalhabilidade da mistura asfáltica. A reação entre o ligante e a água altera a viscosidade do CAP, permitindo desta forma a redução da temperatura de usinagem e facilitando a compactação em campo (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Diferente dos aditivos surfactantes pode se fazer necessário mudanças na planta de usina como a implantação de tubulação para injeção de água. Nas tecnologias que fazem uso deste recurso, a água deve ser introduzida no processo de usinagem por injeção direta, por agregado úmido ou na forma de material hidrofílico como as zeólitas. Quando esta água se dispersa no asfalto aquecido tornando-se vapor ocorre a expansão do ligante, que resulta na diminuição da viscosidade da mistura (PROWELL e HURLEY, 2007).

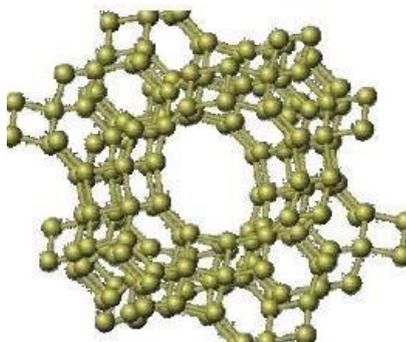
Dentre alguns exemplos de técnicas de espumejo do asfalto têm-se: LEA<sup>®</sup> LT Asphalt<sup>®</sup> (misturas semimornas), Advera<sup>®</sup> WMA, AQUABlack<sup>®</sup> Warm Mix Asphalt,

Aspha-Min<sup>®</sup>, Double Barrel<sup>®</sup> Green, LEA B<sup>®</sup>, Ultrafoam GX2<sup>™</sup>, WAM- Foam<sup>®</sup>, WMA Terex<sup>®</sup>.

### Zeólitas

Zeólita, do grego zein + lithos, significa “pedra que ferve”. As zeólitas englobam um grande número de minerais naturais e sintéticos que apresentam características comuns. Em virtude de sua estrutura, a zeólita apresenta: alto grau de hidratação; baixa densidade; grande volume vazios quando desidratada; alta estabilidade da estrutura cristalina, mesmo quando desidratada; propriedades de troca catiônica; canais de dimensões uniformes nos cristais desidratados; propriedades catalíticas; adsorção seletiva de gases e vapores (SOUSA FILHO, 2006). As zeólitas são bastante utilizadas na produção de misturas asfálticas mornas por sua capacidade de liberar a água gradativamente a temperaturas crescentes a 100 °C causando o efeito de espuma.

Figura 10 – Estrutura Molecular de uma Zeólita (PEREIRA, 2010)



As zeólitas podem ser naturais ou sintéticas. As zeólitas naturais são formadas em regiões onde rochas e cinzas vulcânicas reagem com água alcalina, geralmente apresentam certo grau de impureza devido à presença de outros minerais, metais e quartzo. As zeólitas sintéticas podem ser fabricadas ou por via úmida (hidrotérmico) ou por via seca (higrogel), ambos são semelhantes aos processos de formação natural das zeólitas, havendo uma pequena variação entre o hidrotérmico e hidrogel (PÉREZ et al. 2013).

## Double Barrel<sup>®</sup> Green

Double Barrel<sup>®</sup> Green aborda a produção de mistura morna por formação de espuma, mas não se trata de um aditivo e sim de um processo. É indicada para usinas drum-mixer, sendo produzida pela empresa norte-americana Astec Industries. O processo Double Barrel Green têm sido realizado do mesmo modo que os de misturas a quente convencionais, mas para reproduzir as condições de campo é necessário que haja a instalação de um equipamento de espumejo em laboratório, recomendando-se ainda que as temperaturas de usinagem sejam da ordem de 120 a 135°C (PROWELL e HURLEY, 2007).

Figura 11 – Sistema Double Barrel<sup>®</sup> Green Instalado em Usina retirado de [www.astecinc.com](http://www.astecinc.com).



Normalmente, as misturas mornas no sistema Double Barrel<sup>®</sup> Green são usinadas entre 120 e 135°C e compactadas em até 115 a 110°C (MIDDLETON e FORFYLOW, 2009; D'ANGELO et al., 2008; PROWELL e HURLEY, 2007).

## Aspha Min

Aspha Min é um tipo de zeólita sintética em pó fabricado pela alemã Eurovia Services GmbH. Tanto a usinagem quanto o lançamento e compactação das misturas com Aspha Min são executados da mesma maneira que as misturas convencionais, com a liberação gradual da água. O tempo de trabalhabilidade destas misturas pode chegar de

seis a sete horas. Existem diversas experiências com a utilização deste produto nos Estados Unidos e na Europa (MOTTA, 2011).

Figura 12– Amostra de Aspha Min

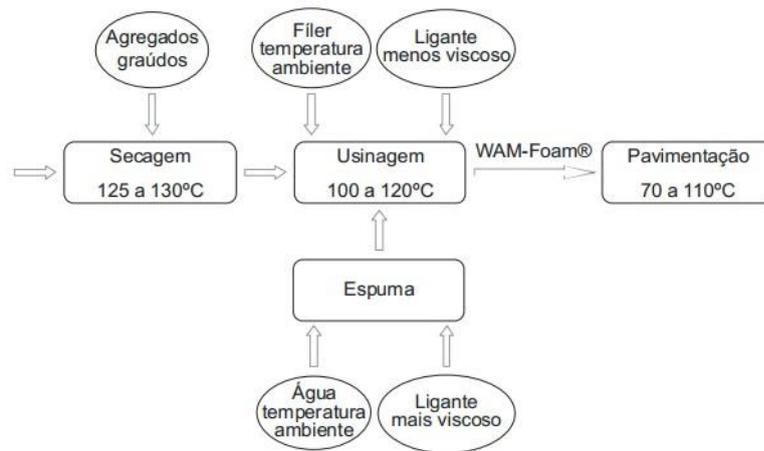


A taxa de incorporação desta zeólita é de 0,3% em massa de mistura, proporcionando uma redução da temperatura final da mistura de cerca de 30 °C se comparada as misturas convencionais (D'ANGELO et al., 2008; PROWELL e HURLEY, 2007).

#### WAM Foam

WAM Foam está associada à produção de mistura morna por formação de espuma, tendo sido desenvolvida em conjunto pela empresa inglesa Shell Bitumen e pela norueguesa Kolo-Veidekke. Esta técnica é um processo que considera a adição de dois tipos de ligantes asfálticos, sendo um asfalto de baixa e outro de alta viscosidade (este último entra espumado no sistema), para produzir um ligante final com uma determinada consistência (MOTTA, 2011). O processo de produção WAM Foam é iniciado pela secagem dos agregados pétreos graúdos à temperaturas entre 125 e 130°C e em seguida são cobertos pelo ligante menos viscoso como ilustrado a seguir.

Figura 13– Esquema de produção e aplicação WMA Foam. (MOTTA, 2011)



Os projetos de mistura com a tecnologia WAM-Foam® requerem a instalação de um equipamento de espumejo em laboratório. Além disso, deve-se fazer tentativas para se determinar a temperatura “ótima” em que o asfalto de maior consistência possa ser espumado de maneira satisfatória e os agregados devem ser aquecidos à temperatura requerida pelo ligante com menor ponto de amolecimento (PROWELL e HURLEY, 2007).

### 2.2.3 Vantagens/Desvantagens das Misturas Mornas

De acordo com Budny (2012) várias vantagens podem ser citadas tais como:

- redução no envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação – as temperaturas de usinagem e compactação mais baixas reduzem a perda de componentes nobres do ligante (como os maltenos) reduzindo o risco de oxidação do ligante e por consequente retarda o processo de fissuramento do mesmo;
- melhoria na trabalhabilidade da mistura asfáltica e facilidade da compactação;
- redução do consumo de combustível da usina em até 30% - devido a queda do consumo de energia necessária para o processo de produção da mistura;
- diminuição considerável da emissão de gases – a menor quantidade de combustível queimado para a produção das misturas faz com que melhore a qualidade do ar durante a produção e aplicação da mistura asfáltica;

- redução da exposição dos trabalhadores aos fumos e odores tanto na usina quanto na aplicação – proporcionando melhores condições de trabalho;
- possibilidade de aplicação em regiões mais frias;
- aumento na distância de transporte de mistura asfáltica, além de remendos e aplicações de camadas mais delgadas com melhor qualidade, devido ao menor potencial de resfriamento – isso se dá por estas apresentarem menor taxa de esfriamento e conseqüente menor gradiente térmico;
- abertura ao tráfego mais rápida sobre a mistura asfáltica recém compactada – devido ao menor tempo de resfriamento da mesma;
- possibilidade de utilização de maior volume de material de fresagem quando se usa em reciclagem – as temperaturas das misturas mornas proporciona menor possibilidade de oxidação do asfalto contido no fresado.

Entretanto, as misturas mornas também podem apresentar alguns problemas, tais como:

- trincamento precoce – o uso de temperaturas mais baixas pode ocorrer de o agregado não expulsar toda a água presente na sua estrutura, assim a umidade residual na interface ligante-agregado prejudica o potencial adesivo do ligante sobre a superfície do agregado;
- insuficiência de dados – algumas técnicas e produtos que vêm sendo testadas são muito recentes para aprovar ou rejeitar seu uso;
- redução de custos – é necessário verificar se a redução no consumo de energia é suficiente para diminuir os custos de produção, a depender do valor do aditivo utilizado talvez não haja compensação, em termos financeiros;
- normas – por ainda serem produtos e tecnologias, relativamente, recentes a falta de normas dificulta a comparação entre estudos por não haver um procedimento e controle de execução padronizado.

## **2.3 Considerações Finais**

Durante esta revisão bibliográfica foi possível observar a importância e a necessidade de novas tecnologias para a produção de misturas asfálticas mornas que buscam reduzir os efeitos negativos causados ao meio ambiente e aos operários presentes no local de execução.

Como mostrado anteriormente pode-se afirmar, com base nos estudos realizados, que o uso destas novas tecnologias é viável pois além de diminuir as temperaturas de aplicação e compactação, reduzem também o envelhecimento dos ligantes asfálticos e algumas são responsáveis ainda por melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Portanto torna-se evidente a necessidade da normatização de tais produtos e tecnologias para que possamos padronizar a utilização dos mesmos.

## CAPÍTULO 3

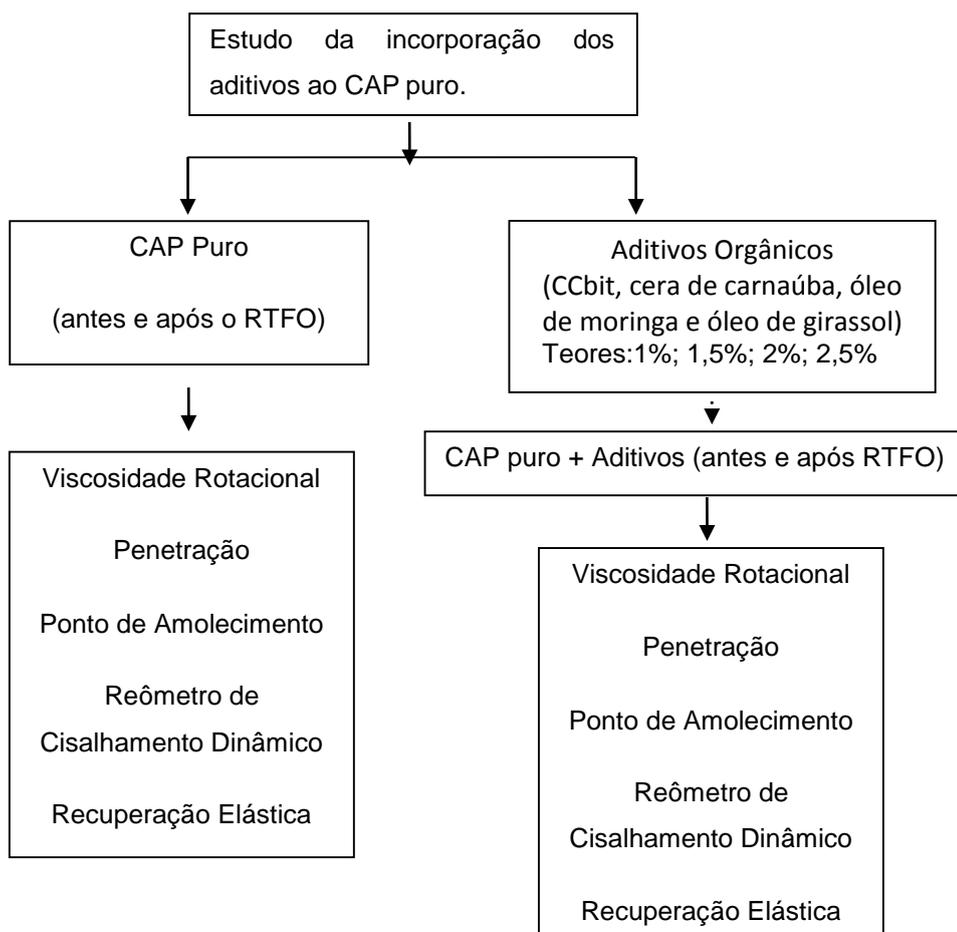
---

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa, bem como a metodologia empregada para a realização dos ensaios.

Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da ASTM (American Society for Testing Materials), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). A metodologia adotada está apresentada no Fluxograma da Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma de Caracterização dos Materiais



Os teores adotados nesta pesquisa de 1%;1,5%;2,0% e 2,5% foram escolhidos devidos a uma análise das conclusões de Wargha Filho (2013) e Sales (2015). Wargha Filho (2013) trabalhou com a cera de carnaúba com um teor de 5,0% obtendo bons resultados, entretanto estes não eram econômicos, o que sugeriu uma pesquisa com teores mais baixos. Sales (2015) trabalhou com o CCBit com os teores de 2,0%;2,5%; e 3,0% porém teve sua pesquisa voltada para caracterização mecânica da mistura, e as pesquisas com óleos por sua vez trabalham com teores geralmente abaixo de 2,0% de aditivo. De posse dessas informações decidiu-se então por optar em teores que possam englobar todos os aditivos de forma a enquadrar adequadamente seus teores e também permitir um comparativo entre aditivos industriais como o CCBit e aditivos naturais como a cera de carnaúba e os óleos de moringa e girassol.

### **3.1 Materiais**

#### **3.1.1 Ligante asfáltico**

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi CAP 50/70 fornecido pela Refinaria Abreu e Lima (RNEST), com caracterização física apresentada na Tabela 01.

Figura 15 – CAP 50/70



Tabela 1 – Caracterização do CAP

Característica	CAP PURO	Limites	Norma
Penetração(0,1mm)	52	50 -70	NBR-6576
Ponto de amolecimento(°C)	48	46(mín.)	NBR-6560
Ponto de fulgor (°C)	324	235(mín.)	NBR-11341
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	435,0	274 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	215,0	112 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	78,0	57 – 285	NBR-15184

### 3.1.2 CCBit 113AD

O aditivo CCBit-113AD (Figura 16) utilizado nesta pesquisa foi fornecido na forma de pó, com cor amarelo esbranquiçada e é inodoro, produzido na Alemanha pela empresa Dr. Hutschenreuther. Sendo um material pouco estudado no Brasil, foram seguidas as recomendações de uso indicadas pelo fabricante.

Segundo dados do fabricante, a empresa Dr. Hutschenreuther, a temperatura ideal para misturar em laboratório o CAP e o CCBit é de 190 °C. Essa temperatura de mistura deve ser constante. O tempo de mistura deve ser entre 25 e 40min. Sugere-se que a quantidade de CCbit a ser adicionada ao ligante comum deve estar entre 2,0 a 3,5% do peso do ligante. A mistura deve ser feita com equipamento de alta rotação, e o aditivo deve ser adicionado lentamente, em frações pequenas. Considerando o desgaste sofrido pela oxidação do CAP sujeito a tal temperatura resolveu-se adotar uma temperatura inferior a sugerida, adotou-se então, a temperatura de 180°C.

Figura 16 – CCBit 13AD



### 3.1.3 Cera de Carnaúba

O aditivo cera de carnaúba utilizado nesta pesquisa foi adquirido por meio da empresa Ceras Microcristal possuindo tom amarelado (Figura 17). O tipo de cera adotado nesta pesquisa foi a CT4 obtida pelo processo de centrifugação, levando em consideração que este é seu estado de maior maturação e que suas propriedades pouco variam em relação as outras. A cera possui um ponto de fusão de 86°C e pode reduzir a viscosidade do CAP no processo de usinagem e compactação aumentando a rigidez da mistura asfáltica nas temperaturas de serviço.

No laboratório a cera foi moída com o auxílio da mão de gral e peneirada na peneira de número 40(0,42mm) visando facilitar a fusão do CAP com este produto. Empregou-se uma temperatura de mistura de 130°C durante 40 minutos e uma velocidade de 1015 rpm (WARGHA FILHO 2013).

Figura 17 – Cera de Carnaúba



### 3.1.4 Óleo de girassol

O óleo de girassol utilizado nesta pesquisa foi obtido no comércio local e adotado devido ao seu potencial como aditivo orgânico redutor de viscosidade (Figura 18).

Durante o processo de mistura em, virtude de não existir referência na literatura do uso de óleo de girassol, adotou-se como referência a pesquisa de Souza (2012) que trabalhou com uma mistura asfáltica com adição do óleo de mamona como aditivo utilizando-se uma temperatura de 135°C para o início da mistura, onde gradativamente foi-se adicionando o óleo ao CAP, e uma velocidade máxima de 410 rpm no misturador mecânico durante 20 minutos.

Figura 18 – Óleo de Girassol



### 3.1.5 Óleo de moringa

O óleo de moringa utilizado nesta pesquisa foi cedido pela UFS (Universidade Federal de Sergipe) para ser empregado como aditivo orgânico neste trabalho. Como citado anteriormente a moringa é natural de climas áridos e semi-áridos o que a torna um bom candidato para esse tipo de pesquisa tendo em vista o clima do Brasil.

Durante o processo de mistura, também utilizou-se a referência de Souza (2012), onde um misturador mecânico atuando com velocidade de 410 rpm e uma temperatura constante de 135°C durante 20 minutos proporcionando assim uma boa incorporação do material ao CAP. Os resultados obtidos por Lucena et al (2016), que utilizou óleo de Moringa Oleífera Lam, com teores de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0%, apresentaram diminuição de temperaturas de 10°C, verificou-se que a adição do óleo da Moringa em percentuais acima de 1,5% pode vir a comprometer o comportamento reológico do ligante asfáltico e que a alteração dos parâmetros de consistência do CAP com adição do óleo da *Moringa Oleífera Lam* é influenciada pelas propriedades do ácido oléico e graxo presente nesta.

Figura 19 – Óleo de Moringa (OLIVEIRA, 2010).



## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

#### 3.2.1.1 Mistura do CAP com o CCBit 113 AD

O processo de produção do CAP modificado com CCBit foi realizado seguindo as instruções do fabricante, com exceção da temperatura, e foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72 (Figura 20). O CAP foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 180°C. Adicionou-se o CCBit em teores de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5%, e a mistura foi agitada em 544 rotações por minuto (rpm), por 40 minutos, com adição lenta e fracionada do material durante os primeiros 20 minutos. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação.

Figura 20 - Misturador (FISATOM, Modelo 72) com CAP e CCBit



Para a inserção do aditivo no misturador com o CAP, manteve-se a tampa do misturador entreaberta, pois o CAP 50/70 à temperatura de 180 °C fica muito fluido e isto poderia causar respingos e prováveis acidentes, como queimaduras. A Figura 21 ilustra o modo como inserido o CCBIt no misturador.

Figura 21 – Inserção do CCBIt no misturador com CAP



Realizaram-se novamente os ensaios de caracterização física das amostras de CAP em laboratório com o intuito de verificar as propriedades tanto para o CAP 50/70 puro quanto para o modificado com diferentes teores de CCBIt. Na Tabela 02 estão as normas utilizadas para a realização dos ensaios.

Tabela 2 – Normas dos ensaios de caracterização física do CAP

Ensaio	Métodos
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/04
Adesividade	DNER ME 078/94
Recuperação Elástica	DNIT ME 130/2010
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/2010
Penetração	DNIT ME 155/2010
RTFO	ASTM D 2872-97

### 3.2.1.2 Mistura do CAP com a cera de carnaúba

O CAP foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 130°C. Adicionou-se a cera em teores de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% e a mistura foi agitada em 1015 rotações por minuto

(rpm), por 20 minutos, com adição lenta e fracionada do material durante os primeiros 7 minutos. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação. Os mesmos ensaios citados na tabela 02 também foram utilizados nesta mistura.

### **3.2.1.3 Mistura do CAP com óleo de moringa**

O CAP foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 135°C. Adicionou-se o óleo em teores de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% e a mistura foi agitada em 410 rotações por minuto (rpm), por 20 minutos, com adição lenta e fracionada do material durante os primeiros 5 minutos. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação. Os mesmos ensaios citados na tabela 02 também foram utilizados nesta mistura.

### **3.2.1.4 Mistura do CAP com óleo de girassol**

O CAP foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 135°C. Adicionou-se o óleo em teores de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% e a mistura foi agitada em 410 rotações por minuto (rpm), por 20 minutos, com adição lenta e fracionada do material durante os primeiros 5 minutos. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação. Os mesmos ensaios citados na Tabela 02 também foram utilizados nesta mistura.

## **3.2.2 Ensaio de Penetração**

O ensaio de penetração determina a consistência do ligante asfáltico no estado semi-sólido, quanto menor o valor da penetração mais duro é o ligante. A norma que regulamenta o ensaio é a DNIT-ME 155 (2010), e consequente classificação, que se dá pela medida, em décimos de milímetros, da profundidade que a agulha penetra durante 5 segundos em uma amostra de ligante a temperatura de 25 °C. O aparelho utilizado para a realização do ensaio é o Penetrômetro (Figura 22). Para a realização do ensaio deve-se transferir a amostra para o recipiente de penetração, de modo a ter uma altura de material, após o resfriamento, à temperatura de ensaio, em no mínimo 120% de profundidade da penetração esperada. Quando variarem as condições de ensaio, preparar uma amostra para cada variação. Se o recipiente possuir um diâmetro menor que 65 mm e a penetração esperada maior que 200, preparar três amostras distintas para cada ensaio. Coloca-se a tampa no recipiente, para proteger a amostra contra poeira, deixar esfriar numa atmosfera

cuja temperatura esteja entre 15 °C e 30 °C, durante o tempo de 60 a 90 minutos para o recipiente menor (55 x 35 mm) e de 90 a 120 minutos, para recipientes maiores. Coloque a amostra e a cuba de transferência no banho d'água, mantido na temperatura de ensaio  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , durante os mesmos intervalos de tempo, para resfriamento à temperatura ambiente. Quando as condições de ensaio não forem mencionadas, subentendem-se como 25 °C, 100 g e 5 segundos. Examine a luva da agulha e a haste, para certificar a ausência de água e outros materiais estranhos. Limpe a agulha com solvente adequado, seque com pano limpo e insira no penetrômetro. Usando um indicador de nível, certifique-se de que o penetrômetro está nivelado. A menos que sejam especificadas condições especiais, coloque o peso de 50 g acima da agulha, fazendo com que a carga total seja de 100 g para o “conjunto de penetração”, incluindo a agulha. Coloque o recipiente da amostra dentro da cuba de transferência, encha a cuba com água do banho d'água de tal modo que a amostra fique totalmente submersa. Coloque a cuba de transferência, com água, sobre o prato do penetrômetro e ajuste imediatamente a agulha na haste, já devidamente carregada, à superfície da amostra, de forma que sua ponta não exerça nenhuma pressão sobre o material, o que pode ser observado quando a imagem da agulha refletida através do meio aquoso coincida com a imagem verdadeira. A imagem refletida pode ser visualizada com o auxílio de uma fonte luminosa que ilumine adequadamente a superfície da amostra. Anote-se a leitura do mostrador do penetrômetro ou traze o seu ponteiro para a posição zero. Após o ajuste da agulha à superfície da amostra e da leitura do mostrador do penetrômetro, libere rapidamente a agulha durante o tempo especificado, ajuste o instrumento para medir a distância penetrada, em décimos de milímetro, e anote esse valor. Deve-se fazer, pelo menos, três determinações em pontos da superfície da amostra, distantes entre si e da borda do recipiente de 10 mm, no mínimo. Após cada penetração, retire-se a cuba de transferência e o recipiente da amostra, do penetrômetro.

Figura 22– Penetrômetro



### 3.2.3 Ponto de amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento determina a temperatura em que o material que envolve a bola tocar a placa inferior, como pode ser observado na Figura 23, em que uma esfera metálica atravessa um anel com material betuminoso até encontrar uma base metálica, todo o material utilizado é padronizado pela norma DNIT ME 131/201 onde deve-se encher os anéis com a amostra fluida, de forma a permanecer um ligeiro excesso de material acima do topo dos anéis, após o resfriamento; deve ser evitado que haja transbordamento do material; Resfriar durante 30 minutos ao ar, então retira-se o excesso de material asfáltico com uma espátula aquecida, de forma que a superfície fique na mesma altura das bordas dos anéis. Após o resfriamento de 30 minutos ao ar, desprender os anéis da chapa e limpá-lo exteriormente. Levar a um banho à temperatura de  $(5 \pm 1)$  °C por 15 minutos, colocar uma bola em cada anel, utilizando uma pinça aquecendo a uma razão de  $(5 \pm 0,5)$  °C por minuto. Se após 3 minutos, a velocidade de aquecimento especificada não for possível de ser ajustada, abandonar o ensaio. Deve-se então ser anotada, para cada bola, a temperatura indicada pelo termômetro no instante em que o material que envolve a bola tocar a placa inferior e se a diferença entre os valores obtidos nas determinações em duplicata excederem a 1°C, deve-se repetir o ensaio.

Figura 23 – Realização do ensaio (início, durante e fim, respectivamente).



### 3.2.4 Viscosidade Rotacional

Uma medida importante na caracterização dos CAPs puros e modificados é a viscosidade, pois contém informações sobre processamento, mistura e lançamento do CAP, incluindo utilização nos serviços de pavimentação. O ensaio foi realizado em viscosímetro da marca Brookfield, modelo DVII+ (Figura 24) com controlador de temperatura THERMOSEL. O ensaio tem como finalidade determinar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos convencionais e modificados durante o manuseio e a usinagem da mistura asfáltica a altas temperaturas.

O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 15184/2007 considerando as temperaturas de 135, 150 e 177°C e velocidades de 20, 50 e 100 rpm, respectivamente.

Figura 24– Viscosímetro Rotacional



### 3.2.5 Recuperação Elástica

Recuperação elástica é o ensaio que determina a medida de capacidade de retorno do material asfáltico, após a interrupção da tração mecânica especificada. Três amostras de CAP devem ser despejadas em moldes apropriados e deixar esfriar a temperatura ambiente por 30 minutos, após esse tempo, deve-se submeter o conjunto ao banho d'água por mais 30 minutos. Deve-se então desformar parte do molde e inseri-lo novamente na água por 85 minutos. Após estes processos deve-se encaixar os orifícios do molde em cada extremidade e acionar o ductilômetro, como demonstra a Figura 25, até que o corpo-de-prova se alongue  $(20,0 \pm 0,5)$  cm. Para-se a tração, desligando o equipamento. Imediatamente após, o material asfáltico distendido deve ser cortado no centro, com auxílio da tesoura. Deixar o material no ductilômetro em repouso por 60 min, mantendo a temperatura constante. Em seguida, acionar o ductilômetro em sentido contrário, até que as duas extremidades do corpo-de-prova encostem uma na outra, quando, então, é feita a leitura na escala do equipamento, em centímetros. Salvo indicação em contrário, o ensaio deve ser realizado a  $(25,0 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$ , com alongamento de 20 cm e velocidade de  $(5,00 \pm 0,25)$  cm /min.

Figura 25– Ensaio de Recuperação Elástica



### 3.2.6 Adesividade

Este ensaio verifica a adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso. 500 gramas de material passando na peneira 19mm e retido na 12,7mm devem ser misturados com 17,5 g de CAP, posteriormente é realizada a imersão em água destilada a  $40^{\circ}\text{C}$

durante 72 horas e por fim é verificado se não houve nenhum deslocamento da película betuminosa ao fim do prazo para ser considerado satisfatório (Figura 26).

Figura 26– Ensaio de Adesividade

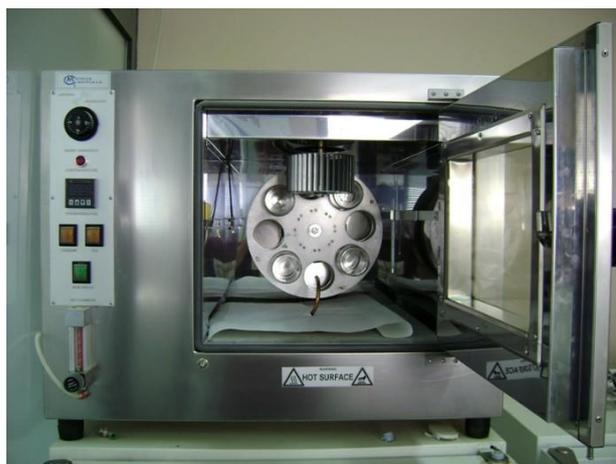


### 3.2.7 RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

O procedimento RTFO que segue a norma ASTM D 2872-97 avalia o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico em movimento. Uma fina película de asfalto de 35g é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163°C por 85 minutos, com injeção de ar. Os efeitos do calor e do ar são determinados a partir de alterações nos valores das análises físicas como medidos antes e depois do tratamento no forno (Figura 27).

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

Figura 27– Aparelho de RTFO



### 3.2.8 DSR - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico

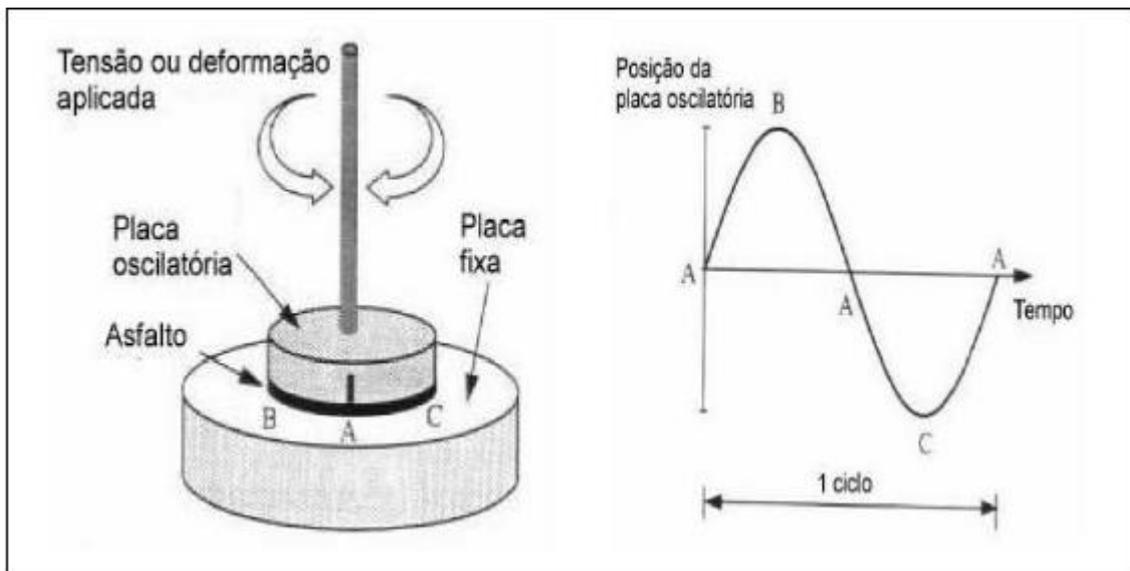
O reômetro de cisalhamento dinâmico, ilustrado na Figura 28, é utilizado na determinação de parâmetros viscoelásticos do ligante a temperaturas elevadas e intermediárias. O equipamento mede o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperaturas e frequências de carregamentos desejados. O parâmetro  $G^*$  possui uma componente elástica recuperável ( $G'$ ) e uma componente viscosa não recuperável ( $G''$ ). Em resumo, o módulo  $G^*$  pode ser relacionado com a resistência do material em diferentes velocidades de cisalhamento e o ângulo  $\delta$  fornece informação sobre a razão entre a resposta elástica e viscosa durante o processo de cisalhamento. (MOTTA *et al*, 1996, LIMA, 2003.)

O procedimento baseia-se na prensagem de uma amostra de ligante entre uma placa fixa e outra giratória. Aplica-se um torque girando a placa de um ponto A para um ponto B, em seguida para um ponto C, retornando em fim para o ponto A. A Figura 29 ilustra o procedimento que segue SHRP (*Strategic Highway Research Program*) que usa o parâmetro  $[G^*]/\text{sen } \delta$  para temperaturas altas ( $>46^\circ\text{C}$ ) e  $[G^*]\text{sen } \delta$  para temperaturas intermediárias (entre  $7^\circ\text{C}$  e  $34^\circ\text{C}$ ). (BERNUCCI *et al*, 2010).

Figura 28 – DSR modelo Discovery Hybrid Rheometer- DHR 1



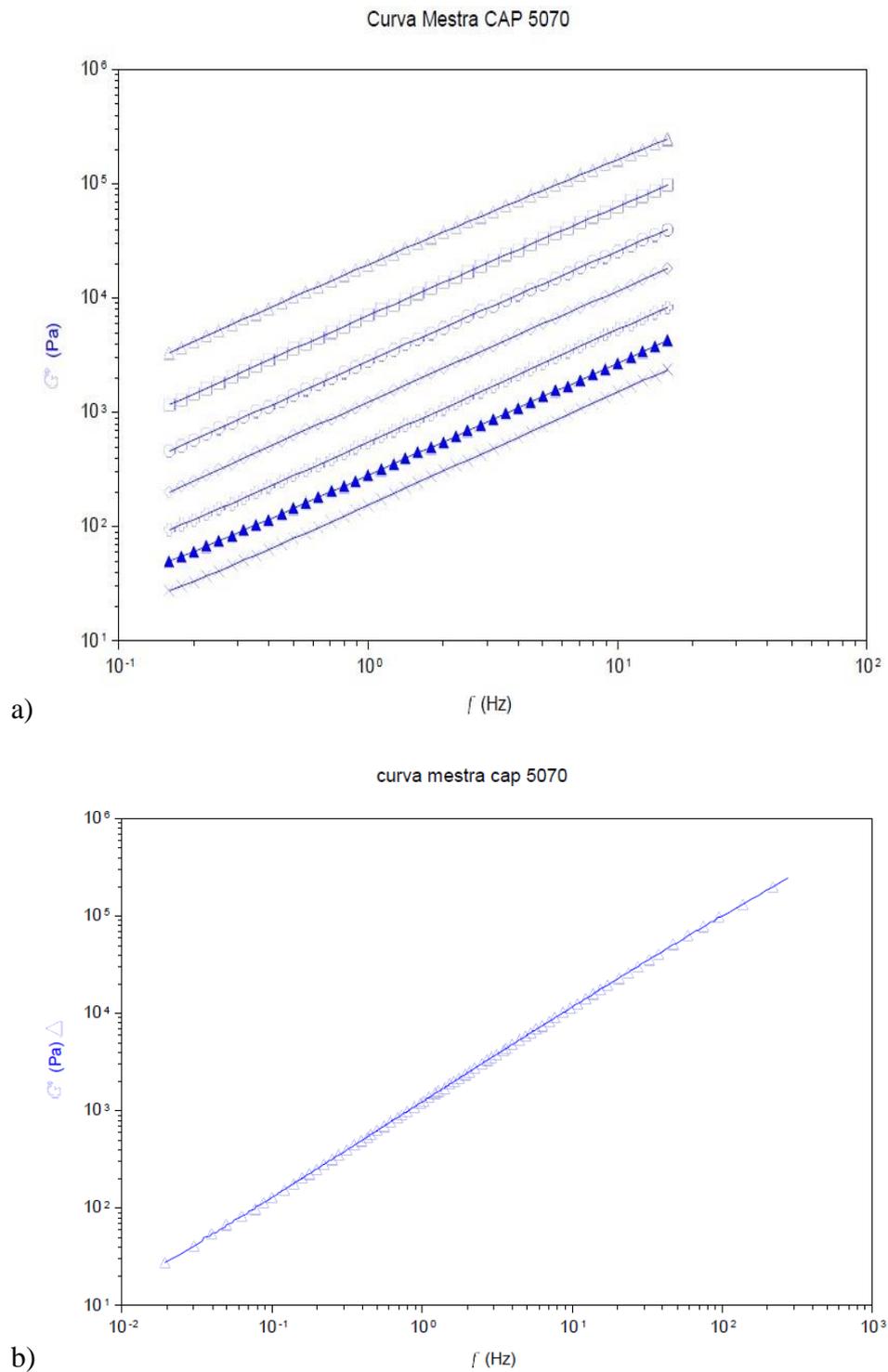
Figura 29 – Funcionamento do DSR (BERNUCCI et al, 2010)



### 3.2.8.1 Curva Mestre

A curva mestre expressa uma propriedade reológica do ligante asfáltico em função da frequência ou do tempo de aplicação do carregamento, descrevendo seu comportamento reológico para uma única temperatura em um espectro amplo de tempos ou frequência de carregamento. Os efeitos da temperatura e da frequência de carregamento são separados por meios de curvas de deslocamento horizontal da temperatura e de curvas mestre. Na obtenção desta curva admite-se que a temperatura e o tempo ou frequência de aplicação de carga tem o mesmo efeito sobre as propriedades reológicas do material (BECHARA *et al*, 2008)

Figura 30 – Exemplo de Curva Mestre Antes (a) e Após a Linearização (b)



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

A American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) utiliza o reômetro de cisalhamento dinâmico ou DSR (*Dynamic Shear*

*Rheometer*) para um ensaio conhecido como *Repeated Creep and Recovery Test* (RCRT), para a caracterização da resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente e recentemente foi proposto seu aperfeiçoamento e agora é conhecido como ensaio de Fluência e Recuperação Sob Tensão Múltipla (*Multiple Stress Creep Recovery*-MSCR). A execução do MSCR é feita com a amostra submetida ao envelhecimento de curto prazo no RTFO. No ensaio é utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) para aplicar uma carga constante que é estabelecida pela norma ASTM D7405, cujos valores são de 100 e 3200 Pa, o tempo de execução dessa carga é determinado em 1s e 9s de repouso formando um ciclo que é repetido por 10 vezes.

### **3.2.8.3 PG - Performance Grade**

A especificação de ligantes SUPERPAVE é baseada na rigidez do material virgem e envelhecido, medidas numa combinação de propriedades viscoelásticas, influenciadas por temperatura e tempo de carregamento (MCGENNIS *et al*, 1994). Foram então estabelecidas classes pelo grau de desempenho dos ligantes (PG-Performance Grade) ligado a temperatura de campo, por exemplo, PG 64-22, onde o primeiro número 64, chamado de grau a alta temperatura, significa que o mesmo possui propriedades físicas adequadas até 64°C e o -22 chamado grau a baixa temperatura, significa que o ligante possui propriedades físicas compatíveis com a temperatura do pavimento até -22°C.

Figura 31– Classificação SUPERPAVE de ligante asfáltico baseada no PG (Fonte: PAVEMENT INTERACTIVE, 2015).

Performance Graded Asphalt Binder Specification

Performance Grade	PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
Average 7-day maximum Pavement Design Temperature, °C	<46	<52	<58	<64	<70	<76	<82
Minimum Pavement Design Temperature °C <sup>A</sup>	> -04 > -40	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40 > -46	> -16 > -22 > -28	> -10 > -16 > -22 > -28	> -10 > -16 > -22 > -28	> -10 > -16 > -22 > -28	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34
Original Binder							
Flash Point Temp., D92; min °C	230						
Viscosity, D4402; <sup>C</sup> max. 3 Pa.s, Test Temp., °C	135						
Dynamic Shear, D7175; <sup>C</sup> G*/sin $\phi$ , min. 1.00 kPa, 25 mm Plate, 1 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	46	52	58	64	70	76	82
Rollin Thin Film Oven (test Method D2872)							
Mass Change, max.percent	1.00						
Dynamic Shear, D7175; <sup>C</sup> G*/sin $\phi$ , min. 2.20 kPa, 25 mm Plate, 1 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	46	52	58	64	70	76	82
Pressure Aging in Vessel Residue (Practice 06521)							
PAV Aging Temperature, °C	90	90	100	100	100 (110)	100 (110)	100 (110)
Dynamic Shear, D7175; <sup>C</sup> G*/sin $\phi$ , max. 5000 kPa, 8 mm Plate, 2 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	107.4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16	34 31 28 25 22	37 34 31 28 25	40 37 34 31 28
Critical Low Cracking Temperature, D6816; <sup>E</sup> PASS	-24 -30 -36	0 - 6-12-18-24 -30 -36	- 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6-12-18 -24-30	0 -6 -12 -18 -24-30	0 - 6-12 -18 -24	0 - 6-12-18 -24
Test Temp °C	36						

<sup>A</sup>Pavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind software program, or are provided by the specifying agency.  
<sup>B</sup>The referee method shall be D4402 using a #21 spindle at 20RPM, however alternate methods may be used for routine testing and quality assurance. If the binder is too stiff to test with the No. 21 Spindle, the No. 27 spindle shall be used. The spindle size and shear rate shall be reported. This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.  
<sup>C</sup>For quality control of unmodified asphalt cement production, measurement of the viscosity of the original asphalt cement may be substituted for dynamic shear measurements of G\*/sin $\phi$  at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid. Any suitable standard means of viscosity measurement may be used, including capillary viscometry (Test Methods D2170 or D2171) or rotational viscometry.  
<sup>D</sup>The PAV aging temperature is based on simulated climatic conditions and is one of three temperatures 90°C, 100°C or 110°C. Normally the PAV aging temperature is 100°C for PG 58—xx and above. However, in desert climates, the PAV aging temperature for PG 70—xx and above may be specified as 110°C.  
<sup>E</sup>For verification of grade, at a minimum perform D6648 at the test temperature and at the test temperature minus 6°C, and D6723 at the test temperature. Testing at additional temperatures for D6648 may be necessary if 300 MPa is not bracketed at the initial two test temperatures. Compare the failure stress from D6723 to the calculated induced thermal stress as per D6816. If the failure stress exceeds the induced thermal stress, the asphalt binder is deemed a "PASS" at the specification temperature. If the creep stiffness and m-value data are unobtainable because the binder is too soft at the test temperature, the asphalt binder will be deemed to pass at that grade temperature if it meets the critical low cracking temperature requirements at the test temperature minus 6°C.

## CAPÍTULO 4

### 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Nestes encontram-se a caracterização física do CAP puro e do CAP com incorporação do CCBIt, óleo de girassol, óleo de moringa e da cera de carnaúba em diferentes porcentagens, realizados antes e após o ensaio de RTFO.

#### 4.1 Caracterização do CAP

##### 4.1.1 Ensaio de Penetração

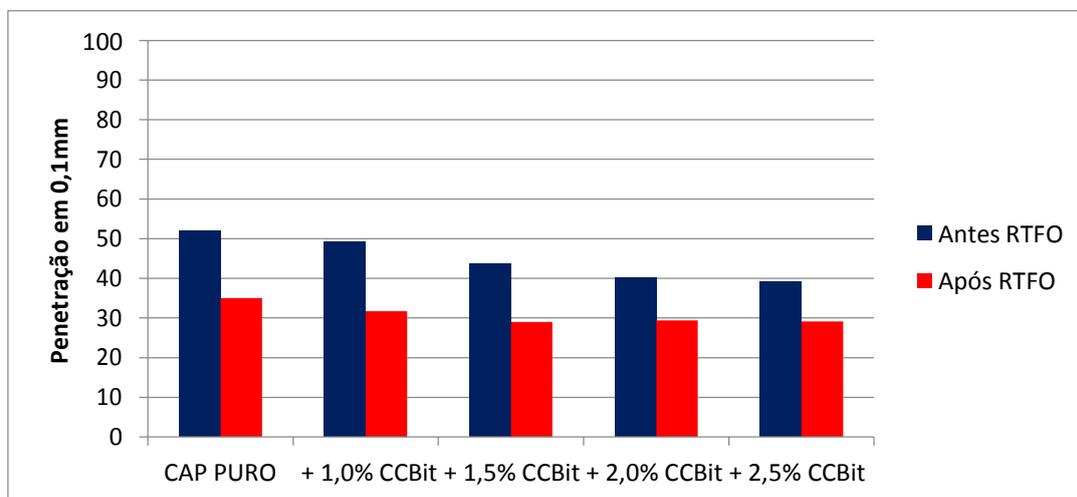
###### 4.1.1.1 CCBIt

Os resultados obtidos com relação a penetração do CAP puro e o CAP incorporado com CCBIt são exibidos na Tabela 03 e no gráfico da Figura 32.

Tabela 3-Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO com CCBIt

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% CCBIt	+ 1,5% CCBIt	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt
Penetração antes RTFO (0,1mm)	52	49	44	40	39
Penetração após RTFO (0,1mm)	35	32	29	29	29

Figura 32-Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO CCBIt



Pode-se observar que com a incorporação do CCBIt ao CAP puro ocorreu uma considerável redução da penetração e que a mesma praticamente permaneceu constante para todos teores de CCBIt aplicados. Vale ressaltar que tal comportamento não era previsto já que o CCBIt possui a capacidade de reduzir a viscosidade do ligante asfáltico tornando-o menos consistente. Entretanto, em estudo desenvolvido por Oliveira (2014) sobre o efeito do CCBIt-113AD no comportamento mecânico de misturas asfálticas pôde-se perceber a mesma redução da penetração. No teor de 2,5% de CCBIt o autor encontrou uma penetração média 42 décimos de milímetros, resultado próximo ao encontrado na presente pesquisa e na de Sales (2015).

Uma possível explicação para este fato pode ser que o CCBIt incorporado ao ligante asfáltico em temperaturas inferiores a 100°C esteja atuando apenas como carga particular e não como redutor de viscosidade, tal fato só ocorreria em temperaturas mais elevadas.

A norma do DNIT 095/2006 – EM determina a penetração retida mínima de 55%. Na tabela 04 observa-se que todos os resultados foram satisfatórios. Segundo Silva (2011) a penetração retida mede a capacidade que um ligante tem de manter sua característica de penetração após o ensaio de envelhecimento em estufa RTFO. Quanto mais próximo de 100% menor é a alteração do valor de penetração no envelhecimento RTFO. Observa-se que a medida que o teor de CCBIt aumenta a sua resistência ao envelhecimento também sofre um acréscimo.

Tabela 4 - Penetração Retida com CCBIt

Penetração retida mínima (%)	CAP PURO	+ 1,0% CCBIt	+ 1,5% CCBIt	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt
	67	65	66	73	74

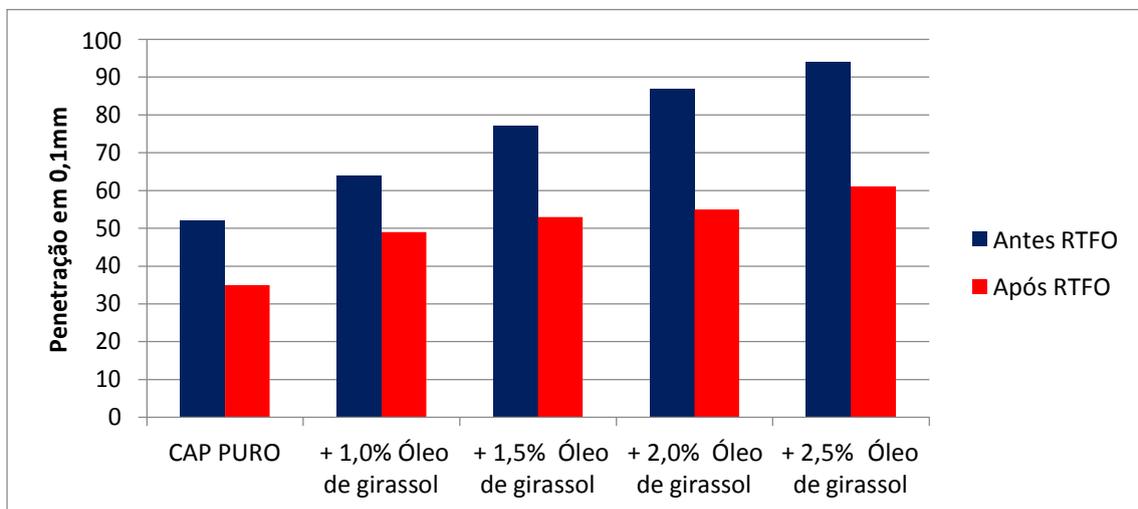
#### 4.1.1.2 Óleo de Girassol

Os resultados obtidos com relação a penetração do CAP puro e o CAP incorporado com Óleo de Girassol são exibidos na Tabela 05 e no gráfico da Figura 33.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO com Óleo de Girassol

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de girassol	+ 1,5% Óleo de girassol	+ 2,0% Óleo de girassol	+ 2,5% Óleo de girassol
Penetração antes RTFO (0,1mm)	52	64	77	87	94
Penetração após RTFO (0,1mm)	35	49	53	55	61

Figura 33 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO Óleo de girassol



Com a incorporação do óleo de girassol ao ligante asfáltico foi possível observar que mesmo com o teor de 1% percebe-se um grande aumento na penetração que continua crescendo até que se atinja o último teor do aditivo, o que era de se esperar pois o óleo de girassol é um aditivo orgânico com capacidade de redução de viscosidade o que resultaria por sua vez na redução da consistência do ligante asfáltico. Em relação a penetração mínima retida pode-se observar na tabela 06 que todos os resultados foram satisfatórios entretanto, a partir do teor de 2,0% observa-se uma redução na sua resistência ao envelhecimento.

Tabela 6 - Penetração Retida com Óleo de Girassol

Penetração retida mínima (%)	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de girassol	+ 1,5% Óleo de girassol	+ 2,0% Óleo de girassol	+ 2,5% Óleo de girassol
	67	77	69	63	65

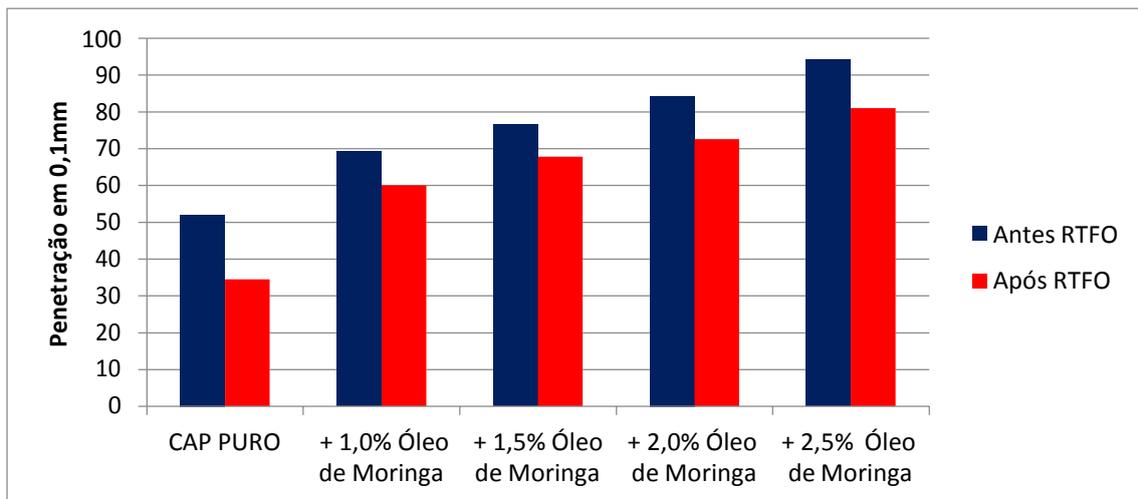
### 4.1.1.3 Óleo de Moringa

Os resultados obtidos com relação à penetração do CAP puro e o CAP com Óleo de Moringa são exibidos na Tabela 07 e no gráfico da Figura 34.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO com Óleo de Moringa

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de moringa	+ 1,5% Óleo de moringa	+ 2,0% Óleo de moringa	+ 2,5% Óleo de moringa
Penetração antes RTFO (0,1mm)	52	69	77	84	94
Penetração após RTFO (0,1mm)	35	60	68	73	81

Figura 34 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO Óleo de Moringa



Assim como o óleo de girassol, a adição do óleo de moringa também resultou um grande aumento na penetração que desde o teor de 1,0% já apresenta grande diferença quando comparado ao CAP puro, o que também era de se esperar pois ambos são aditivos orgânicos, ou seja, contribuem para uma redução da viscosidade reduzindo também a consistência do ligante asfáltico. Com relação à penetração retida os resultados também se provaram todos satisfatórios como a Tabela 08 mostra a seguir e também conclui-se que o óleo de moringa agiu positivamente na resistência ao envelhecimento.

Tabela 8 - Penetração Retida com Óleo de Moringa

Penetração retida mínima (%)	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de moringa	+ 1,5% Óleo de moringa	+ 2,0% Óleo de moringa	+ 2,5% Óleo de moringa
	67	87	89	86	86

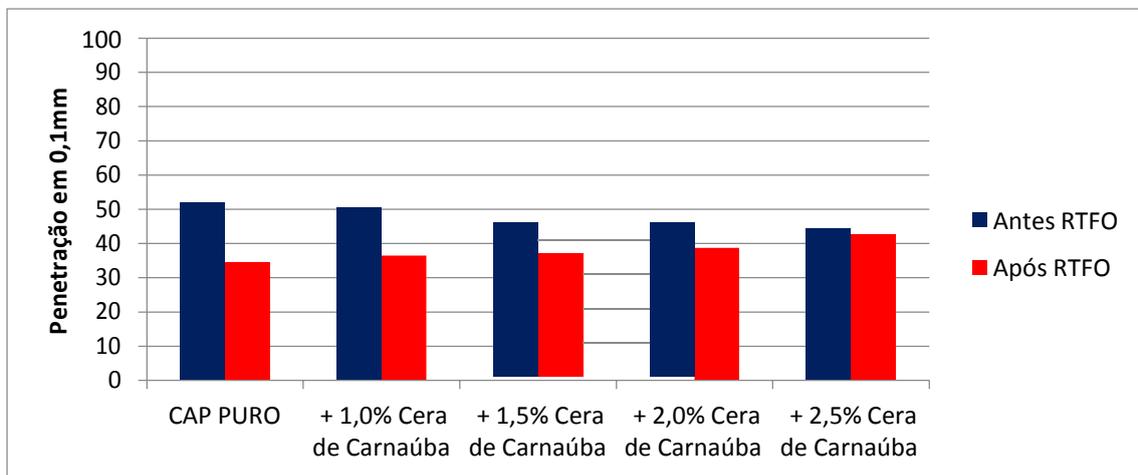
#### 4.1.1.4 Cera de Carnaúba

Os resultados obtidos com relação a penetração do CAP puro e o CAP incorporado com Cera de Carnaúba são exibidos na Tabela 09 e no gráfico da Figura 35.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO com Cera de Carnaúba

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Cera de Carnaúba	+ 1,5% Cera de Carnaúba	+ 2,0% Cera de Carnaúba	+ 2,5% Cera de Carnaúba
Penetração antes RTFO (0,1mm)	52	51	46	44	44
Penetração após RTFO (0,1mm)	35	37	36	39	43

Figura 35 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO Cera de Carnaúba



Assim como o CCBit a cera de carnaúba apresentou resultados que demonstram uma redução da penetração do ligante asfáltico. Era de se esperar o contrário pois também como o CCBit a cera de carnaúba se mostrou eficiente em reduzir a viscosidade do ligante. Vale ressaltar que a cera de carnaúba como visto no gráfico se provou resistente ao envelhecimento tendo em vista que manteve valores de penetração acima do CAP puro e que com o aumento do teor ocorre uma diminuição na diferença de penetração antes e

após o RTFO como podemos observar no teor de 2,5%. Em relação a penetração retida todas foram satisfatórias como mostra a Tabela 10 e em relação a resistência ao envelhecimento o teor de 2,5% obteve os melhores resultados da pesquisa.

Tabela 10 - Penetração Retida com Cera de Carnaúba

Penetração retida mínima (%)	CAP PURO	+ 1,0% Cera de carnaúba	+ 1,5% Cera de carnaúba	+ 2,0% Cera de carnaúba	+ 2,5% Cera de carnaúba
	67	72	77	88	97

#### 4.1.2 Ponto de Amolecimento

Os tópicos a seguir explicitam as variações encontradas nos pontos de amolecimento do CAP puro e do CAP + aditivos utilizados nesta pesquisa.

##### 4.1.2.1 CCBIt

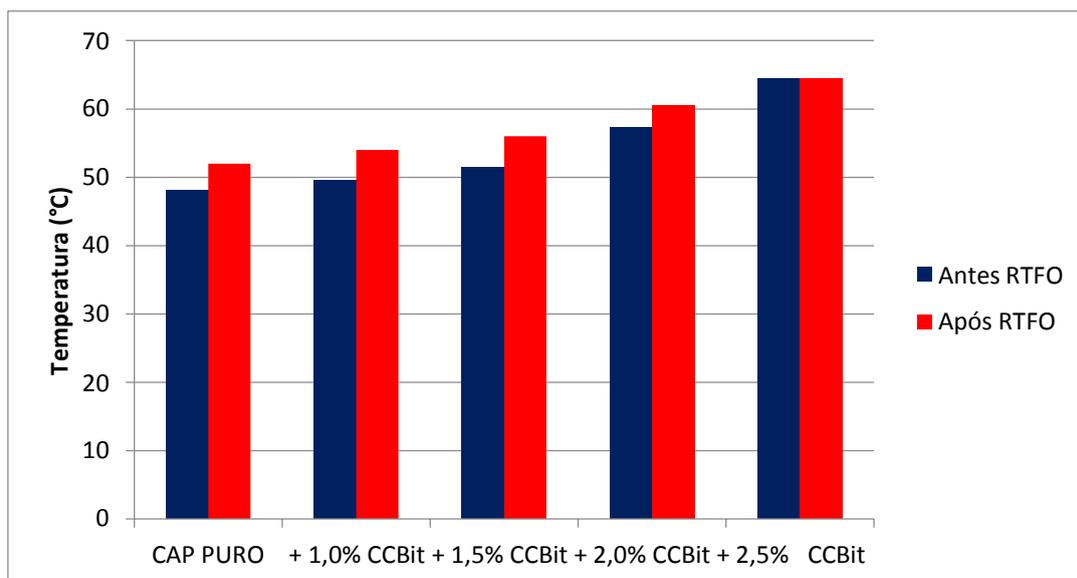
A Tabela 11 e a Figura 36 apresentam o efeito do teor de CCBIt no ponto de amolecimento do ligante asfáltico.

O ponto de amolecimento do CAP puro foi de 48°C e com a adição do CCBIt este valor chegou a 64,5°C para o teor de 2,5% de CCBIt, o que se aproxima do valor obtido por Pereira (2010) que foi de 66°C o mesmo também encontrado por Sales (2015) com o mesmo teor de aditivo. Tal aumento pode ser interpretado como vantajoso tendo em vista que está diretamente ligado ao aumento da resistência do ligante asfáltico.

Tabela 11- Ponto de amolecimento antes e após RTFO CCBIt

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% CCBIt	+ 1,5% CCBIt	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt
Temperatura antes RTFO (°C)	48	49,5	51,5	57,2	64,5
Temperatura após RTFO (°C)	52	54	56	60,5	64,5

Figura 36- Ponto de amolecimento antes e após RTFO CCBIt



O CAP puro encontra-se dentro do limite da norma, DNIT 095/2006 – EM, com aumento de 4 °C do ponto de amolecimento após RTFO (Tabela 10). Os CAPs com CCBIt também respeitaram este limite (máx 8°C).

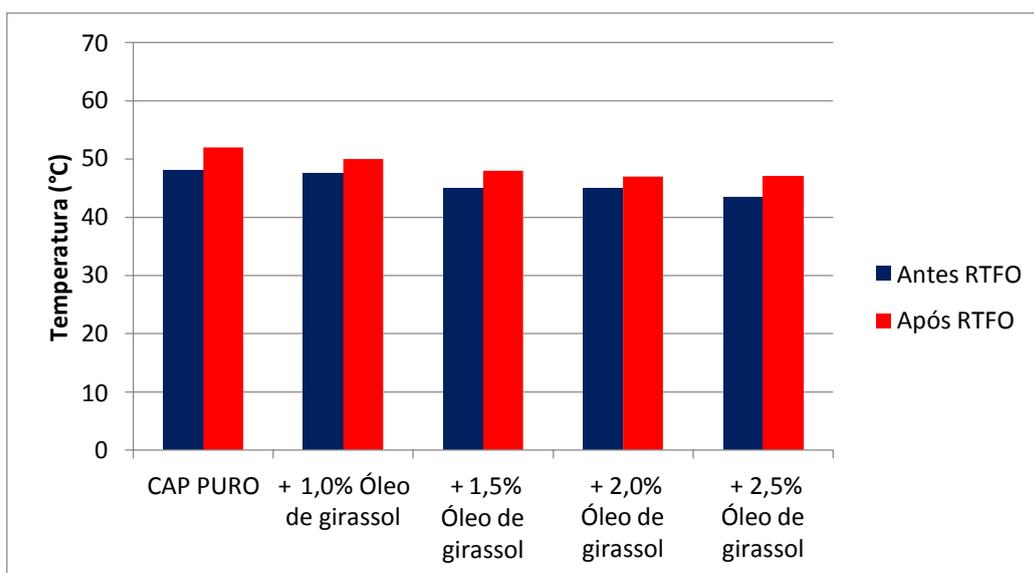
#### 4.1.2.2 Óleo de Girassol

A adição do óleo de girassol ao CAP puro permitiu uma redução do ponto de amolecimento em 4,5°C chegando a 43,5°C com o teor de 2,5% de aditivo. Tal redução implica na perda de resistência do CAP e ganho na sua trabalhabilidade o que dependendo da situação pode ser a vantagem procurada. Observa-se também que os limites de aumento de temperatura de ponto de amolecimento também foram respeitados como mostra a Tabela 12 e o gráfico da Figura 37.

Tabela 12 - Ponto de amolecimento antes e após RTFO Óleo de Girassol

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de girassol	+ 1,5% Óleo de girassol	+ 2,0% Óleo de girassol	+ 2,5% Óleo de girassol
Temperatura antes RTFO (°C)	48	47,5	45	45	43,5
Temperatura após RTFO (°C)	52	50	48	47	47

Figura 37- Ponto de amolecimento antes e após RTFO Óleo de Girassol



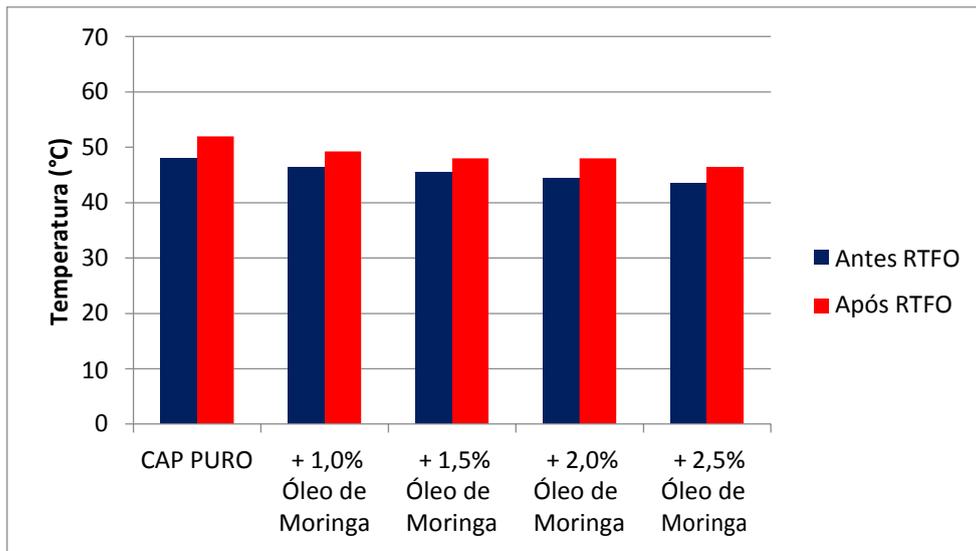
#### 4.1.2.3 Óleo de Moringa

Com a adição de 2,5% de teor de óleo de moringa proporcionou uma redução de temperatura máxima de ponto de amolecimento de 4,5°C chegando a 43,5°C. Bem como o óleo de girassol pode-se afirmar que ocorre uma perda de rigidez no material enquanto que por outro lado ele ganha uma melhor trabalhabilidade. Os limites de aumento de temperatura de ponto de amolecimento também foram respeitados como mostra a Tabela 13 e o gráfico da Figura 38.

Tabela 13 - Ponto de amolecimento antes e após RTFO Óleo de Moringa

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de moringa	+ 1,5% Óleo de moringa	+ 2,0% Óleo de moringa	+ 2,5% Óleo de moringa
Temperatura antes RTFO (°C)	48	46,5	45,5	44,5	43,5
Temperatura após RTFO (°C)	52	49,25	48	48	46,5

Figura 38 - Ponto de amolecimento antes e após RTFO Óleo de Moringa



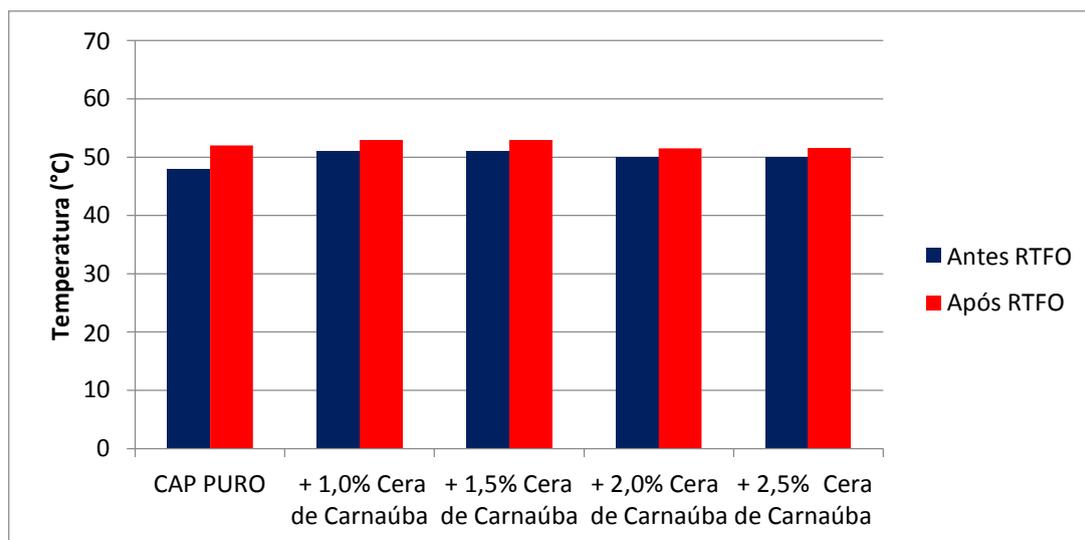
#### 4.1.2.4 Cera de Carnaúba

Assim como o CCbit a cera de carnaúba utilizada como aditivo causou um aumento na temperatura de ponto de amolecimento da mistura apesar de menos significativo, chegando a 51°C nos teores de 1 e 1,5%. Este aumento de temperatura pode ser interpretado como um aumento na rigidez do material o que é uma vantagem na longevidade da aplicação em campo. O aumento de temperatura do ponto de amolecimento após o RTFO também foi considerado satisfatório por respeitar os limites determinados por norma como pode ser observado abaixo na tabela 14 e na Figura 39. O ponto de amolecimento encontrado por Wargha Filho (2013) foi de 54°C com aumento em relação ao CAP puro de 4°C, o que difere dos resultados encontrados pois como a tabela indica a tendência seria esse valor diminuir, mas vale ressaltar que o teor utilizado por Wargha filho era de 5% o que pode acarretar mudanças nas propriedades que se tornam aparentes com maior quantidade de aditivo.

Tabela 14 - Ponto de amolecimento antes e após RTFO Cera de Carnaúba

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Cera de carnaúba	+ 1,5% Cera de carnaúba	+ 2,0% Cera de carnaúba	+ 2,5% Cera de carnaúba
Temperatura antes RTFO (°C)	48	51	51	50	50
Temperatura após RTFO (°C)	52	53	53	51,5	51,5

Figura 39- Ponto de amolecimento antes e após RTFO Cera de Carnaúba



### 4.1.3 Recuperação Elástica

Durante esta pesquisa também foram realizados ensaios de recuperação elástica visando uma boa caracterização do material puro e das misturas. Como esperado nenhum dos aditivos apresentou uma recuperação elástica considerável como pode-se ver nas Tabelas 15,16,17 e 18 respectivamente. Vale destacar que dentre os 4 materiais analisados a cera de carnaúba foi a que obteve os melhores resultados chegando a 10% de recuperação elástica no teor de 2,5% de aditivo.

Tabela 15 - Recuperação Elástica Antes e Após RTFO CCBIt

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% CCBIt	+ 1,5% CCBIt	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt
Recuperação Elástica Antes(%)	12,5	7	7,5	8	7,5
Recuperação Elástica Após(%)	8	8	8	8,5	7,5

Tabela 16- Recuperação Elástica Antes e Após RTFO Óleo de Girassol

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de girassol	+ 1,5% Óleo de girassol	+ 2,0% Óleo de girassol	+ 2,5% Óleo de girassol
Recuperação Elástica Antes(%)	12,5	7,5	7,5	6,5	7,5
Recuperação Elástica Após(%)	8	7	7	6	7

Tabela 17 - Recuperação Elástica Antes e Após RTFO Óleo de Moringa

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de moringa	+ 1,5% Óleo de moringa	+ 2,0% Óleo de moringa	+ 2,5% Óleo de moringa
Recuperação Elástica Antes(%)	12,5	7,5	7,5	6,5	7,5
Recuperação Elástica Após(%)	8	7	7	6	7

Tabela 18- Recuperação Elástica Antes e Após RTFO Cera de Carnaúba

Amostra	CAP PURO	+ 1,0% Cera de carnaúba	+ 1,5 Cera de carnaúba	+ 2,0% Cera de carnaúba	+ 2,5% Cera de carnaúba
Recuperação Elástica Antes(%)	12,5	8	8,5	9,5	9,8
Recuperação Elástica Após(%)	8	9	9,5	9	10

#### 4.1.4 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional foi realizado para o CAP puro 50/70 e para o CAP incorporado com os seguintes aditivos: CCBit, óleo de girassol, óleo de moringa e cera de carnaúba nos teores de 1,0;1,5;2,0 e 2,5% tendo seus respectivos valores antes e após o RTFO explicitados nos tópicos que seguem.

##### 4.1.4.1 CCBit

As Tabelas 19 e 20 apresentam respectivamente os resultados do ensaio de viscosidade rotacional com CAP puro e com incorporação do CCBit nos teores de 1,0;1,5;2,0 e 2,5% antes e após o RTFO. Observa-se nos gráficos das Figura 40 e 41 respectivamente, a redução da viscosidade do CAP diante do aumento do teor de CCBit antes e após o RTFO. A menor viscosidade apresentada pelo CAP modificado ocorre com o teor de 2,5% de CCBit. Fica evidente que antes do RTFO claramente há uma redução de viscosidade a partir do teor de 2,0% de CCBit e após o RTFO a partir de 1,0% esta redução é evidente, o que demonstra uma boa resistência da mistura ao envelhecimento.

Tabela 19- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit antes do RTFO

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)				
	CAP PURO	+ 1,0% CCBit	+ 1,5% CCBit	+ 2,0% CCBit	+ 2,5% CCBit
135	402,50	400,00	390,00	342,50	322,50
150	203,00	203,00	200,00	178,50	169,00
177	70,50	69,00	68,50	60,50	57,00

Tabela 20 - Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit após RTFO

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)				
	CAP PURO	+ 1,0% CCBit	+ 1,5% CCBit	+ 2,0% CCBit	+ 2,5% CCBit
135	542,00	497,50	477,50	447,50	415,00
150	262,00	247,00	241,00	227,00	210,00
177	86,00	78,00	77,00	71,50	66,50

Figura 40- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit antes do RTFO

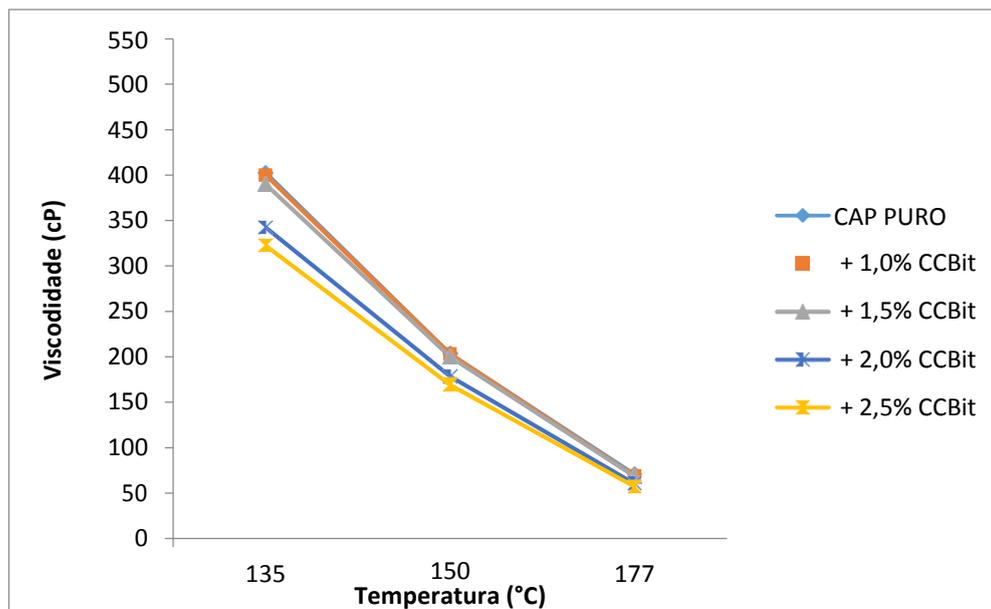
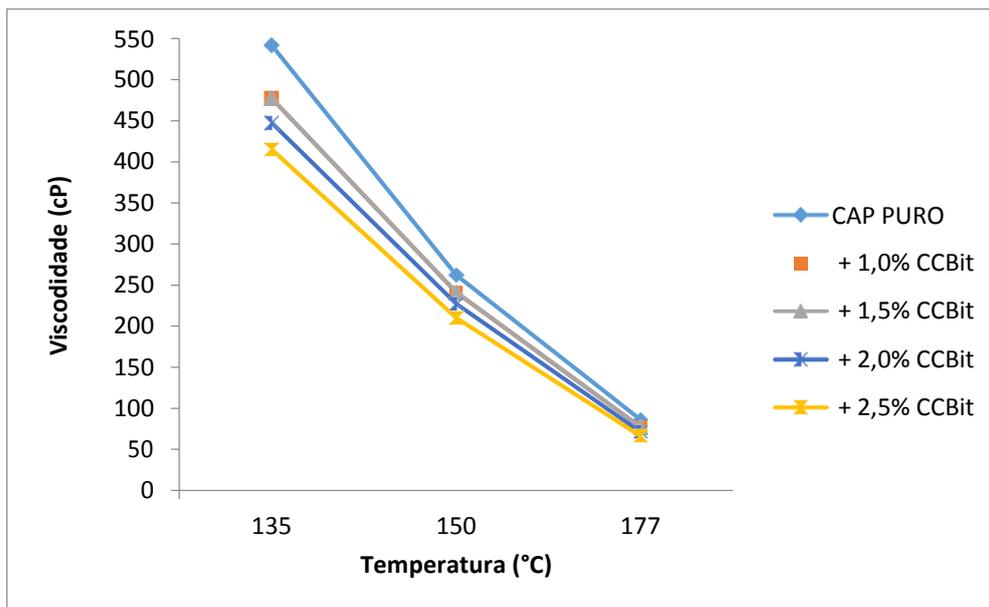


Figura 41- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit após o RTFO



Na temperaturas de 177°C, o comportamento dos asfaltos são similares entre os diferentes teores, assim como em relação ao CAP puro. Os resultados mostraram que a 135°C o ligante puro tem a mais alta viscosidade e o asfalto com maior porcentagem de CCBit a menor.

A Figura 42 exemplifica como foram encontradas as temperaturas de usinagem e compactação para o CAP puro e para as misturas CAP+aditivos. Por sua vez a Tabela 21 faz um comparativo entre o CAP puro e o CAP com CCBit.

Figura 42- Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura CAP Puro

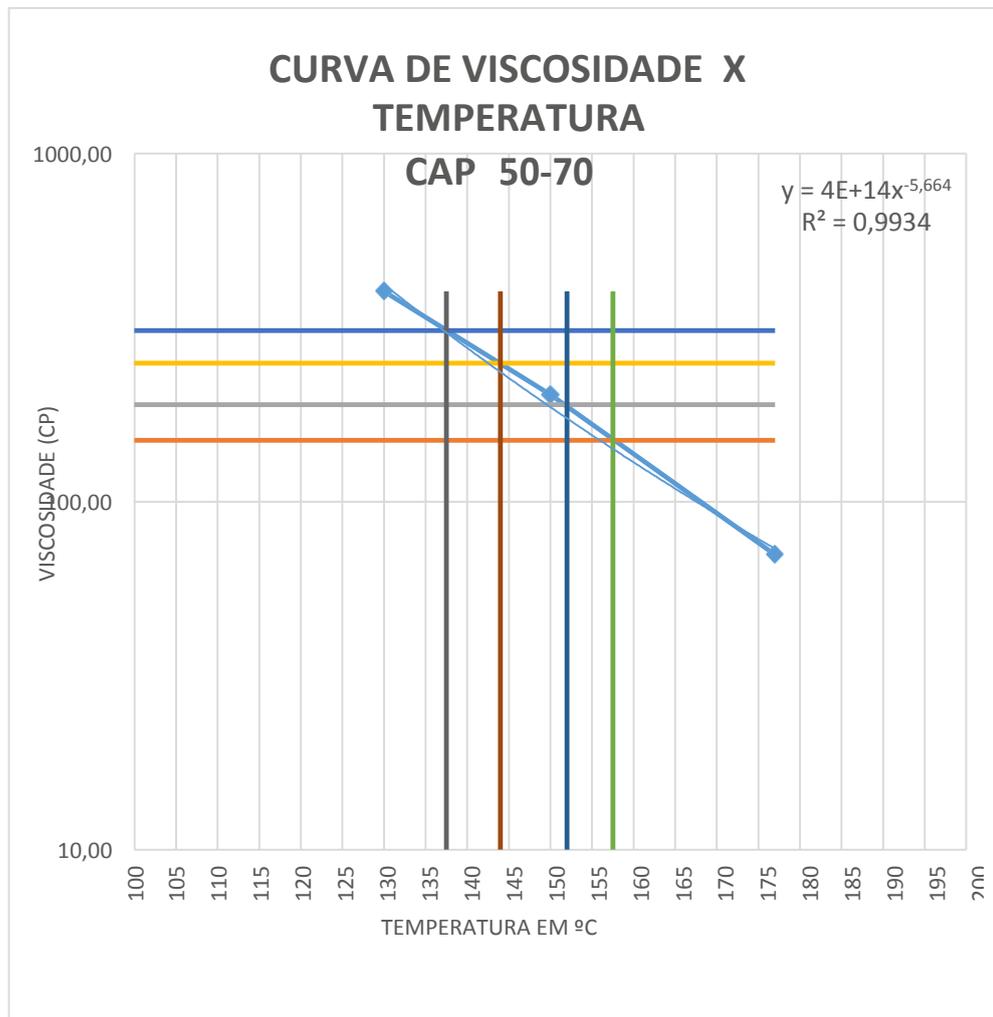


Tabela 21– Temperaturas de usinagem e compactação do CAP Puro e com incorporação do CCBit

	<b>CAP PURO</b>	<b>+ 1,0% CCBit</b>	<b>+ 1,5% CCBit</b>	<b>+ 2,0% CCBit</b>	<b>+ 2,5% CCBit</b>
<b>Temperatura de Usinagem (°C)</b>	154,8	154,5	154,3	151,3	149,5
<b>Temperatura de Compactação (°C)</b>	140,8	140,8	139,9	136,3	134,3

Podemos observar que obtivemos em média uma redução de temperatura de compactação e usinagem de 6°C para o maior teor de CCBit empregado. Sales (2015) obteve para o teor de 2,5% de CCbit uma redução de 10 °C da temperatura obtida do CAP puro, para usinagem e compactação.

#### 4.1.4.2 Óleo de Girassol

O óleo de girassol por sua vez apresentou uma redução de viscosidade consideravelmente maior em relação ao CCBIt tanto antes como após o RTFO. A adição do teor de 1,0% apresenta uma viscosidade bem menor que a do CAP puro, como podemos ver nas Tabelas 22 e 23 e nas Figuras 43 e 44 respectivamente. Este fato acarretou uma redução de temperatura de usinagem e compactação considerável sendo de 11,3°C para usinagem e de 14,8°C para compactação no seu maior teor (2,5%). A Tabela 24 apresenta em detalhes as reduções apresentadas em cada teor utilizado na mistura asfáltica.

Tabela 22- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Girassol antes do RTFO

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)				
	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de girassol	+ 1,5% Óleo de girassol	+ 2,0% Óleo de girassol	+ 2,5% Óleo de girassol
135	402,50	307,50	277,50	272,50	250,00
150	203,00	163,00	152,00	149,00	139,00
177	70,50	53,50	50,00	50,50	47,00

Tabela 23- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Girassol após o RTFO

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)				
	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de girassol	+ 1,5% Óleo de girassol	+ 2,0% Óleo de girassol	+ 2,5% Óleo de girassol
135	542,00	440,00	415,00	405,00	355,00
150	262,00	221,00	210,00	207,00	187,00
177	86,00	69,50	66,50	67,00	59,00

Figura 43 - Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de girassol antes do RTFO

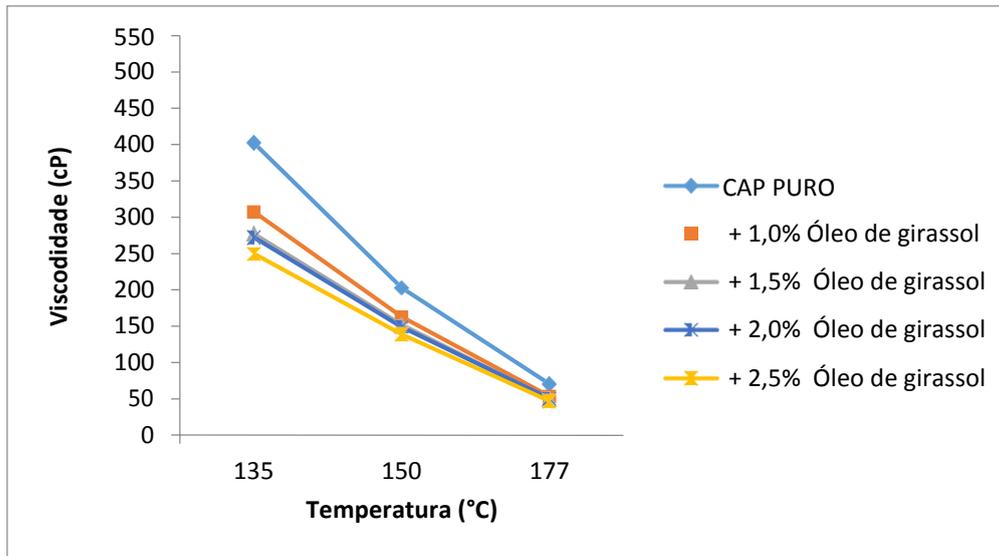


Figura 44- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de girassol após o RTFO

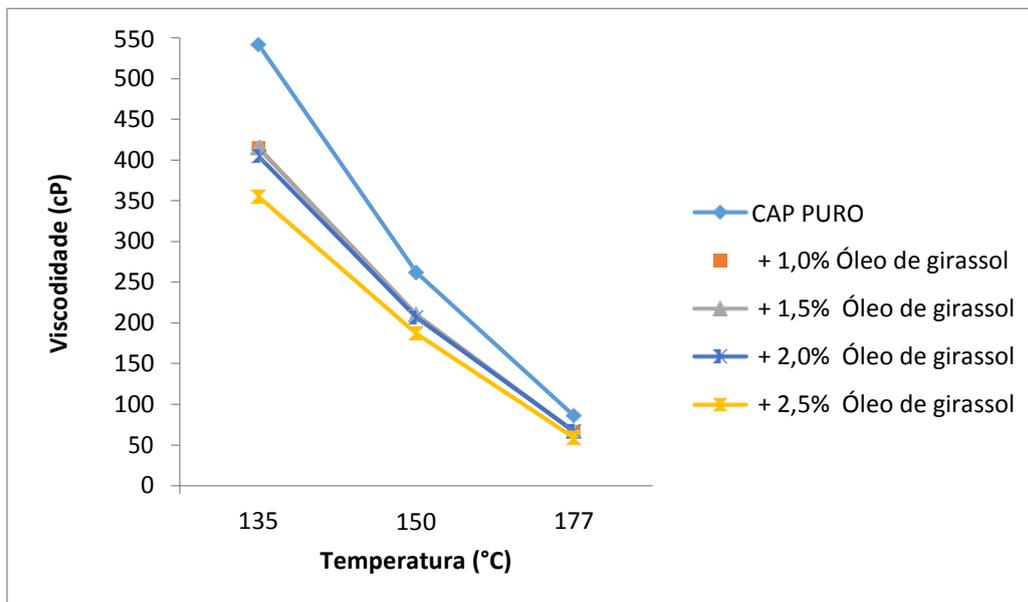


Tabela 24- Temperaturas de mistura e compactação do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Girassol

	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de Girassol	+ 1,5% Óleo de Girassol	+ 2,0% Óleo de Girassol	+ 2,5% Óleo de Girassol
Temp de Usinagem (°C)	154,8	148,8	146,4	146,0	143,5
Temp de Compactação (°C)	140,8	133,3	130,0	129,3	126,0

#### 4.1.4.3 Óleo de Moringa

O óleo de moringa foi mais eficiente que o óleo de girassol que já havia produzido resultados satisfatórios. A redução de viscosidade superou a do óleo de girassol tanto antes como após o RTFO como pode-se observar nas Tabelas 25 e 26 e nos gráficos das Figuras 45 e 46 respectivamente. Tal resultado acarretou numa redução ainda maior das temperaturas de compactação e usinagem chegando a 13,8°C na de usinagem e 18,3°C na de compactação como podemos ver na Tabela 27.

Tabela 25- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Moringa antes do RTFO

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)				
	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de moringa	+ 1,5% Óleo de moringa	+ 2,0% Óleo de moringa	+ 2,5% Óleo de moringa
135	402,50	275,00	257,50	237,50	227,50
150	203,00	149,00	144,00	134,00	132,00
177	70,50	47,50	45,50	42,50	42,50

Tabela 26- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Moringa antes do RTFO

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)				
	CAP PURO	+ 1,0% Óleo de moringa	+ 1,5% Óleo de moringa	+ 2,0% Óleo de moringa	+ 2,5% Óleo de moringa
135	542,00	425,00	382,50	350,00	292,50
150	262,00	217,00	198,00	184,00	161,00
177	86,00	65,50	59,50	53,50	48,00

Figura 45- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Moringa antes do RTFO

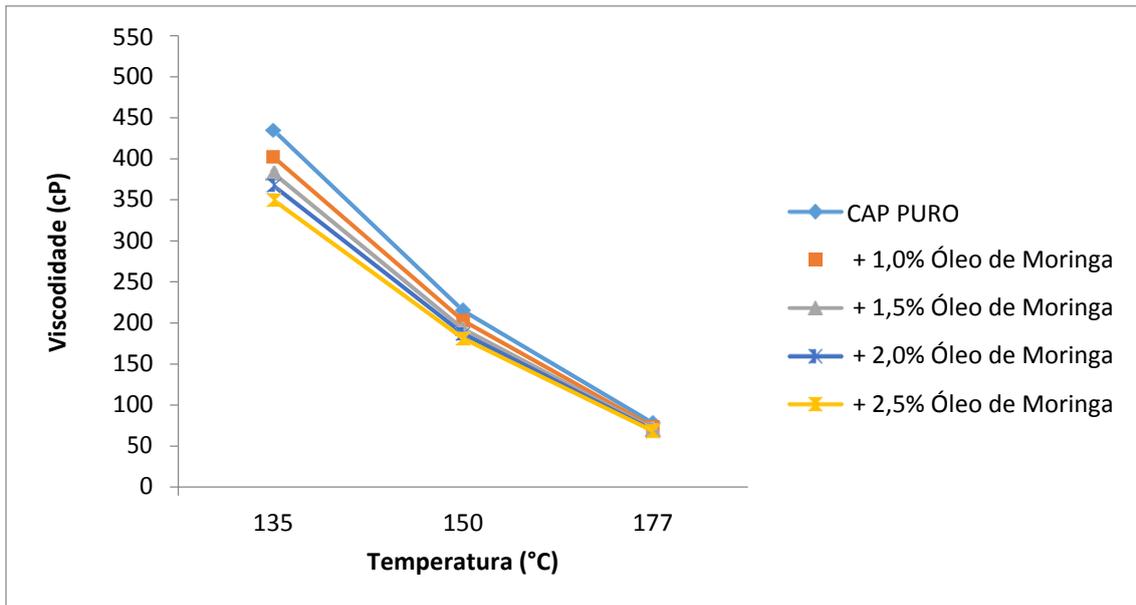


Figura 46- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Moringa após o RTFO

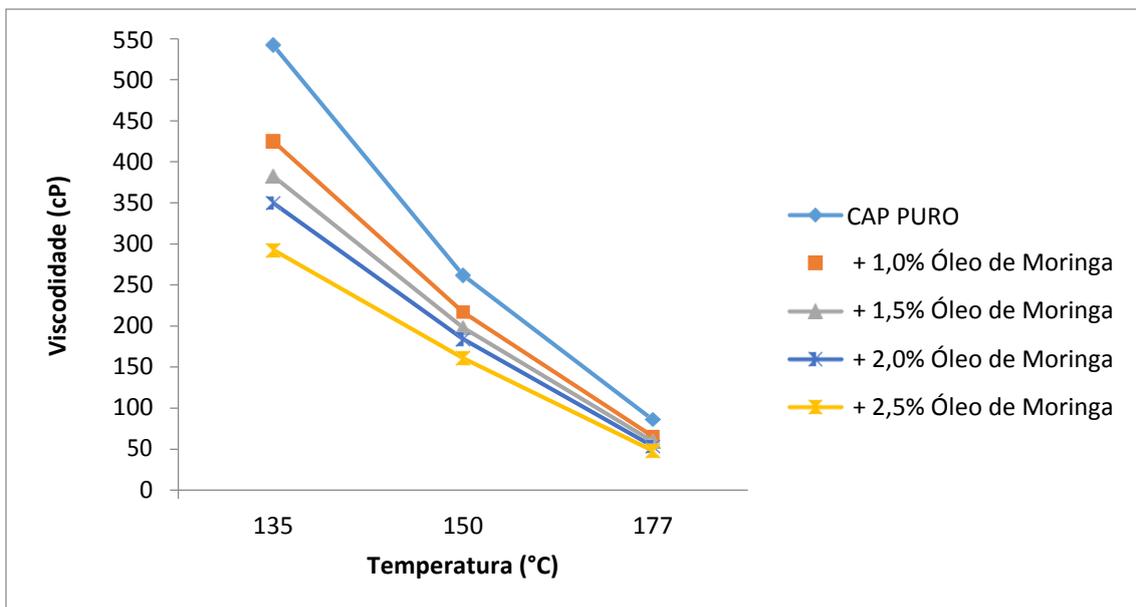


Tabela 27 – Temperaturas de mistura e compactação do CAP Puro e com incorporação do Óleo de Moringa

	<b>CAP PURO</b>	<b>+ 1,0% Óleo de Moringa</b>	<b>+ 1,5% Óleo de Moringa</b>	<b>+ 2,0% Óleo de Moringa</b>	<b>+ 2,5% Óleo de Moringa</b>
<b>Temp de Usinagem (°C)</b>	154,8	146,3	145,0	142,0	141,0
<b>Temp de Compactação (°C)</b>	140,8	129,8	127,5	124,5	122,5

#### 4.1.4.4 Cera de Carnaúba

O aditivo orgânico cera de carnaúba obteve uma boa redução de viscosidade quando comparado ao CAP puro e também ao CCbit pois superou ambos tanto antes quanto após o RTFO como podemos ver nas tabelas 28 e 29 e também nos gráficos das figuras 47 e 48. Obteve-se uma redução de temperatura de usinagem de 8,0°C e de compactação de 10,5°C como podemos verificar na Tabela 30.

Tabela 28- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação da Cera de Carnaúba antes do RTFO

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Viscosidade (cP)</b>				
	<b>CAP PURO</b>	<b>+ 1,0% Cera de carnaúba</b>	<b>+ 1,5% cera de carnaúba</b>	<b>+ 2,0% cera de carnaúba</b>	<b>+ 2,5% Cera de carnaúba</b>
<b>135</b>	402,50	380,00	322,50	287,50	280,00
<b>150</b>	203,00	195,00	172,00	156,00	152,00
<b>177</b>	70,50	61,00	54,50	49,50	49,00

Tabela 29- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação da Cera de Carnaúba após o RTFO

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Viscosidade (cP)</b>				
	<b>CAP PURO</b>	<b>+ 1,0% Cera de carnaúba</b>	<b>+ 1,5% cera de carnaúba</b>	<b>+ 2,0% cera de carnaúba</b>	<b>+ 2,5% Cera de carnaúba</b>
<b>135</b>	542,00	490,00	447,50	407,50	367,50
<b>150</b>	262,00	245,00	227,00	211,00	193,00
<b>177</b>	86,00	76,00	69,50	66,00	59,50

Figura 47- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação da Cera de Carnaúba antes do RTFO

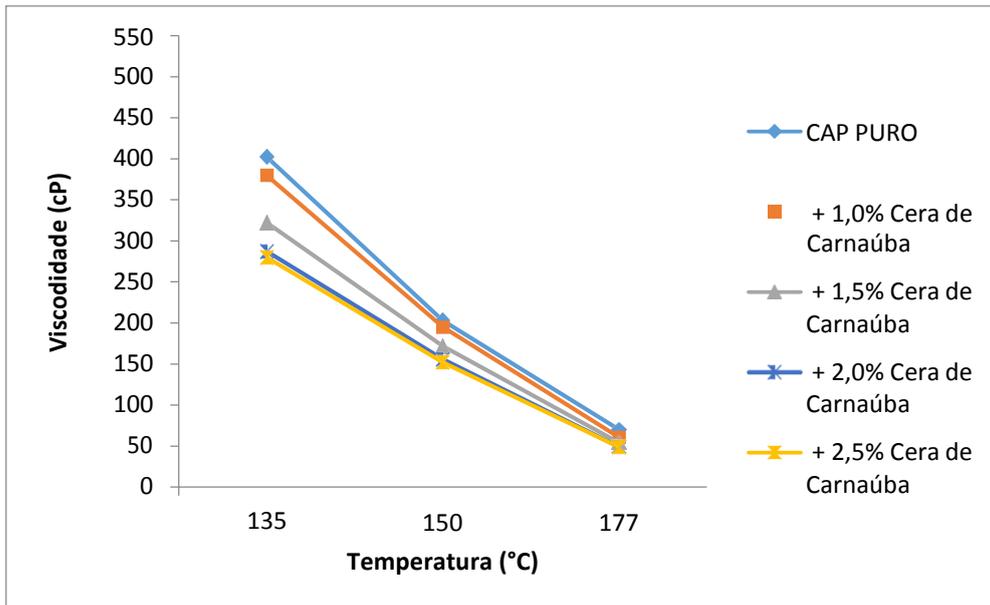


Figura 48- Viscosidade do CAP Puro e com incorporação da Cera de Carnaúba após o RTFO

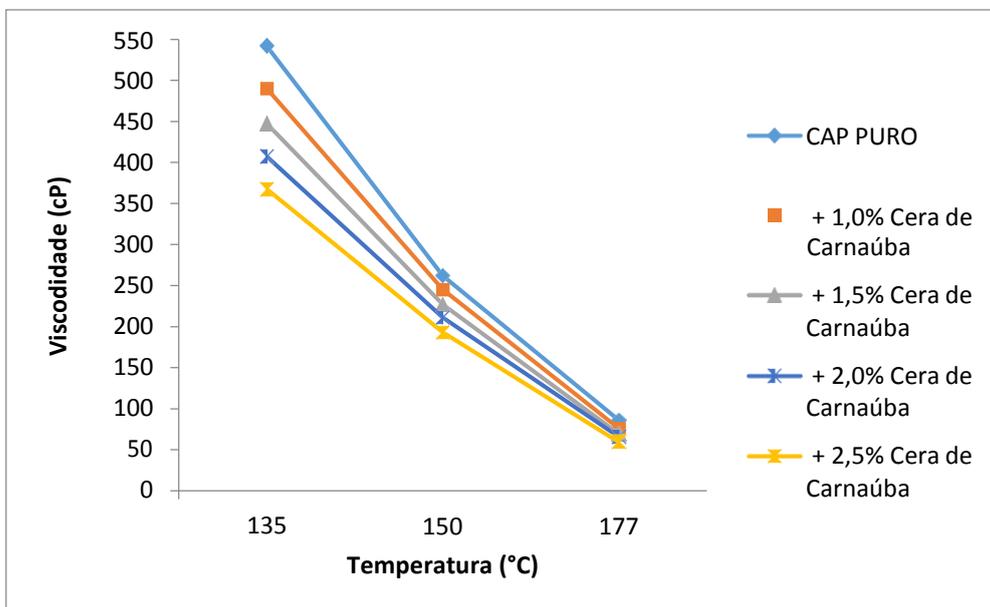


Tabela 30 – Temperaturas de mistura e compactação do CAP Puro e com incorporação da Cera de Carnaúba

	<b>CAP PURO</b>	<b>+ 1,0% Cera de Carnaúba</b>	<b>+ 1,5% Cera de Carnaúba</b>	<b>+ 2,0% Cera de Carnaúba</b>	<b>+ 2,5% Cera de Carnaúba</b>
<b>Temp de Usinagem (°C)</b>	154,8	153,0	150,0	147,3	146,8
<b>Temp de Compactação (°C)</b>	140,8	139,8	134,3	131,3	130,3

Vale ressaltar que Wargha Filho (2013) encontrou uma redução de temperatura de compactação para o aditivo orgânico cera de carnaúba de 20°C para um teor de 5% de aditivo o que torna os resultados encontrados coerentes.

A Tabela 31 resume os resultados encontrados para melhor análise onde U=Usinagem e C= Compactação. Dentre os resultados obtidos destaca-se o teor de 2,5% de óleo de moringa como sendo a maior redução obtida chegando a 18,3°C e o teor de 1,0% de CCBIt como o pior resultado obtendo apenas 0,3°C de redução.

Tabela 31- Variações de Temperaturas (Usinagem e Compactação)

<b>Teor \ Aditivo</b>	<b>CCBit</b>	<b>Óleo de Girassol</b>	<b>Óleo de Moringa</b>	<b>Cera de Carnaúba</b>
<b>1,0%</b>	-0,3 °C (U)	-6,0 °C (U)	-8,5 °C (U)	-1,8 °C (U)
	-0,0 °C (C)	-7,5 °C (C)	-11,0 °C (C)	-1,0 °C (C)
<b>1,5%</b>	-0,5 °C (U)	-8,4 °C (U)	-9,8 °C (U)	-4,8 °C (U)
	-0,9°C (C)	-10,8 °C (C)	-13,3 °C (C)	-6,5 °C (C)
<b>2,0%</b>	-3,5 °C (U)	-8,8 °C (U)	-12,8 °C (U)	-7,5 °C (U)
	-4,5 °C (C)	-11,5 °C (C)	-16,3 °C (C)	-9,5 °C (C)
<b>2,5%</b>	-5,3 °C (U)	-11,3 °C (U)	-13,8 °C (U)	-8,0 °C (U)
	-6,5 °C (C)	-14,8 °C (C)	-18,3 °C (C)	-10,5 °C (C)

#### 4.1.5 Perda de massa

O ensaio de RTFO é necessário para realizar a caracterização física em ligantes, submetidos a algum tipo de condicionamento, capaz de simular o nível de agressividade ao qual estarão sujeitos durante a etapa de transporte. A perda de massa indica a capacidade de envelhecimento o ligante (Tabela 32).

Tabela 32 – Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO

<b>Amostra</b>	<b>1%</b>	<b>1,5%</b>	<b>2%</b>	<b>2,5%</b>	<b>CAP PURO</b>
<b>CCBit</b>	0,11	0,07	0,05	0,09	0,08
<b>Óleo de Moringa</b>	0,07	0,08	0,05	0,06	0,08
<b>Cera de Carnáuba</b>	0,06	0,09	0,08	0,10	0,08
<b>Óleo de Girassol</b>	0,07	0,05	0,09	0,05	0,08

A norma 095/2006 do DNIT especifica o limite da perda de massa em 0,5%. Isto posto, conclui-se que o CAP puro e as misturas em todos os seus teores encontram-se dentro da tolerância de envelhecimento sem interferir na qualidade do pavimento. Os resultados encontrados indicam que os efeitos da volatilização foram mais intensos do que os efeitos da oxidação. A perda das frações leves do CAP foi maior que o ganho de massa em razão da oxidação durante o envelhecimento. As maiores perdas de massa foram encontradas para o CCBit (1%) e a cera de carnaúba (2,5%), as menores perdas foram encontradas para os óleos de moringa e girassol. Portanto, nesta pesquisa oleaginosos foram capazes de reduzir a perda de massa do ligante asfáltico e consequentemente o desequilíbrio entre a volatilização e a oxidação.

#### **4.1.6 Adesividade**

Alguns aditivos tais como os aditivos surfactantes atuam fortemente na adesividade do ligante asfáltico melhorando esta qualidade que é de suma importância para a qualidade do pavimento. Apesar de não ser comum é possível que alguns aditivos orgânicos também melhorem esta capacidade, por isso durante esta pesquisa também foram analisados resultados envolvendo este ensaio. Após realizados todos os ensaios envolvendo todos os teores da pesquisa apenas um se destacou o CAP puro + 2,5% de CCBit que por sua vez apresentou um resultado satisfatório de adesividade diferentemente de todos os outros teores do CCBit e dos outros aditivos como podemos ver na Figura abaixo.

Figura 49- a) CCBit 2,5%

b) Óleo de Girassol 2,5%



Tabela 33 - Resumo do ensaio de adesividade

Teor \ Aditivo	CCBit	Óleo de Girassol	Óleo de Moringa	Cera de Carnaúba
1,0%	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
1,5%	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
2,0%	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
2,5%	Satisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório

#### 4.1.7 PG-Grau de Performance (Performance Grade)

A Tabela 33 apresenta os resultados das temperaturas de PG adotado antes e após o ensaio de RTFO. Durante a pesquisa não foi verificada a temperatura baixa de PG, pois o Brasil se trata de um país onde a maior parte de seu território possui clima tropical registrando temperaturas médias de 25°C o que descarta a necessidade de uma análise a baixa temperatura. O PG encontrado seguiu a especificação Superpave, onde  $G^*/\text{sen}\delta$  é

superior a 1,0 kPa antes do RTFOT e superior a 2,2 kPa após o RTFOT. De acordo com esta metodologia, tais valores garantem uma resistência adequada ao acúmulo de deformações permanentes

Tabela 34 – Resultados de PG do CAP Puro e com incorporação dos aditivos

<b>RTFO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>TEMP. DE FALHA (°C)</b>	<b>PG</b>
<b>CAP 50-70</b>			
<b>ANTES-RTFO</b>	Puro	65,5	64
	+ 1% CCBIt	69,7	70
	+ 1,5% CCBIt	70	70
	+ 2% CCBIt	73,8	76
	+ 2,5% CCBIt	70,1	70
	+ 1% cera de carnaúba	65,8	64
	+ 1,5% cera de carnaúba	65,4	64
	+ 2% cera de carnaúba	65,3	64
	+ 2,5% cera de carnaúba	65,2	64
	+ 1% óleo de girassol	65,4	64
	+ 1,5% óleo de girassol	65,3	64
	+ 2% óleo de girassol	65	64
	+ 2,5% óleo de girassol	61,7	58
	+ 1% óleo de moringa	65,3	64
	+ 1,5% óleo de moringa	65,1	64
+ 2% óleo de moringa	61,6	58	
+ 2,5% óleo de moringa	61,4	58	
<b>PÓS-RTFO</b>	Puro	65,3	64
	+ 1% CCBIt	65,7	64
	+ 1,5% CCBIt	69,5	70
	+ 2% CCBIt	69,8	70
	+ 2,5% CCBIt	69,6	70
	+ 1% cera de carnaúba	65,2	64
	+ 1,5% cera de carnaúba	65	64
	+ 2% cera de carnaúba	61,5	58
	+ 2,5% cera de carnaúba	61,3	58
	+ 1% óleo de girassol	61,6	58
	+ 1,5% óleo de girassol	61,4	58
	+ 2% óleo de girassol	61,2	58
	+ 2,5% óleo de girassol	61,1	58
	+ 1% óleo de moringa	61,6	58
	+ 1,5% óleo de moringa	61,4	58
+ 2% óleo de moringa	61,3	58	
+ 2,5% óleo de moringa	60,9	58	

Analisando os resultados obtidos na Tabela 33 pode-se afirmar que o Grau de Desempenho do CAP obtido nas misturas desta pesquisa indica que os mesmos possuem

propriedades físicas adequadas para o emprego em campo. As temperaturas expostas na Tabela 33 devem ser as mais elevadas nas regiões de emprego do pavimento.

As Figuras 50 e 51, respectivamente, ilustram as curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura na faixa de 46 a 76°C para as amostras de CAP Puro e Modificado com CCBit, antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo RTFO.

Figura 50 - Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura antes do RTFO-CCBit

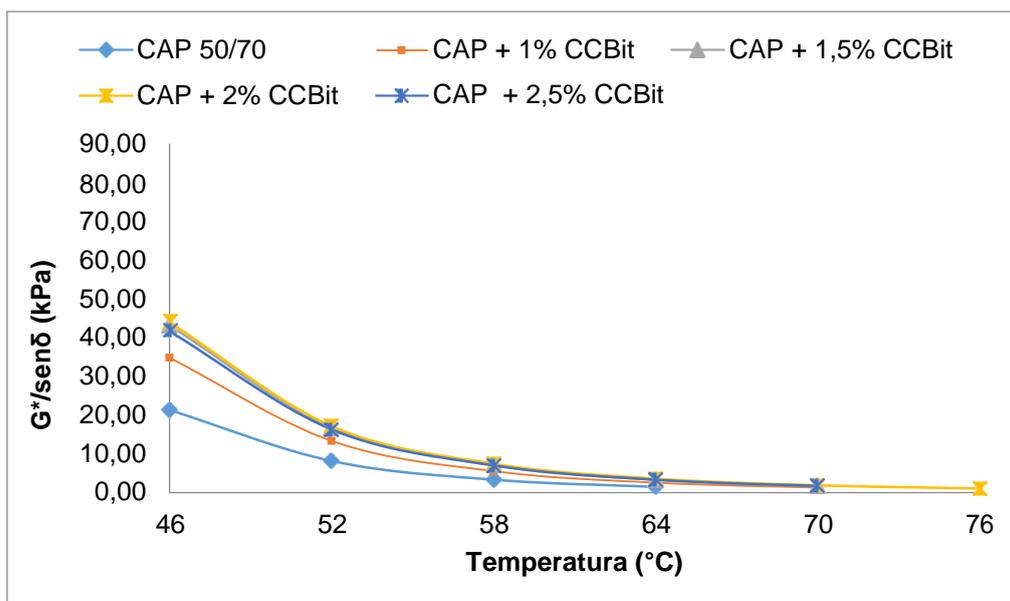
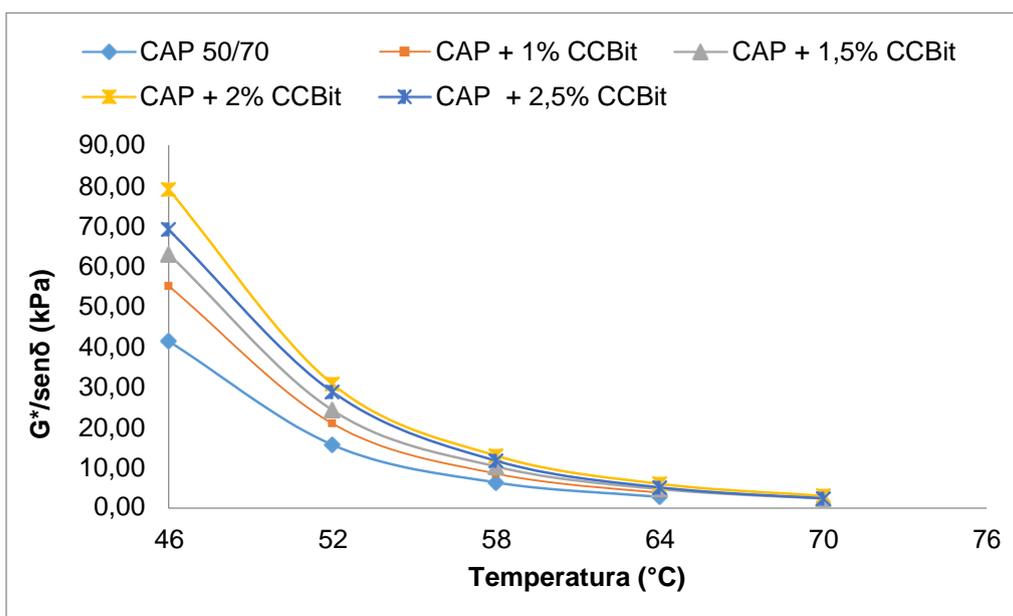


Figura 51 - Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura após o RTFO-CCBit



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 apresentadas as Figuras 50 e 51 verifica-se que, antes do RTFO, com a adição do CCBit há o aumento na temperatura máxima de uso do CAP, em relação à temperatura máxima de uso do CAP Puro e após o RTFO apenas o teor de 1,0% não manteve o aumento provando a eficácia do aditivo nessa questão. A adição do CCbit proporcionou o aumento do  $G^*/\sin\delta$  e, portanto, um incremento da temperatura máxima do PG para 76°C (PG 76-XX) antes do RTFO e para 70°C (PG 70-XX) após o RTFO. Este aumento do PG indica que com a adição do CCBit 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).

Nas Figuras 52 e 53 respectivamente, são ilustradas as curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura na faixa de 46 a 76°C para as amostras de CAP Puro e Modificado com óleo de girassol, antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo RTFO.

Figura 52 - Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura antes do RTFO-Óleo de Girassol

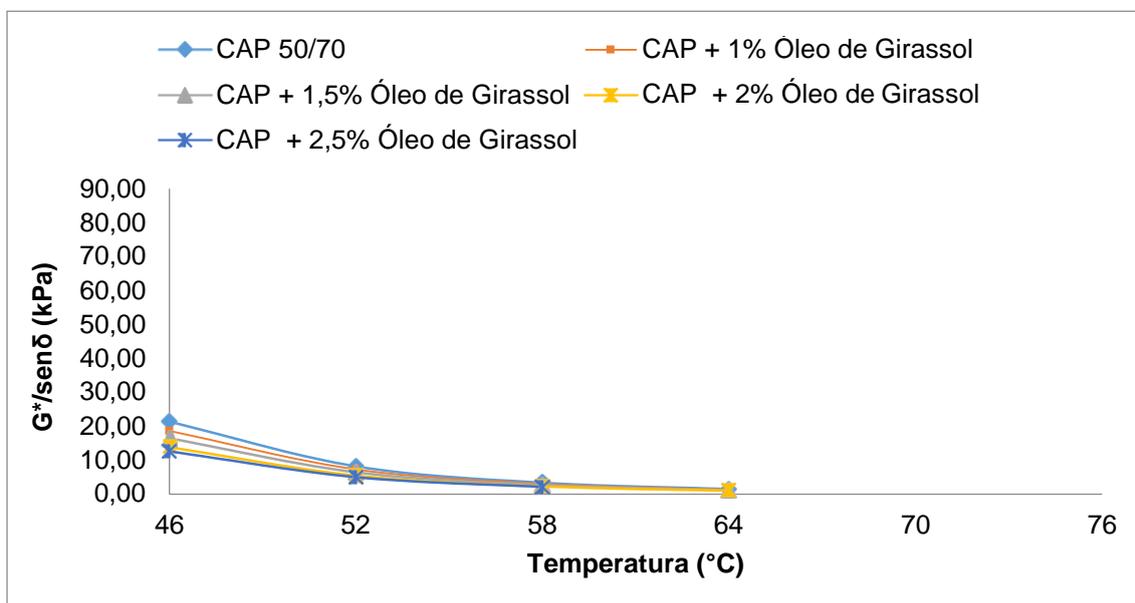
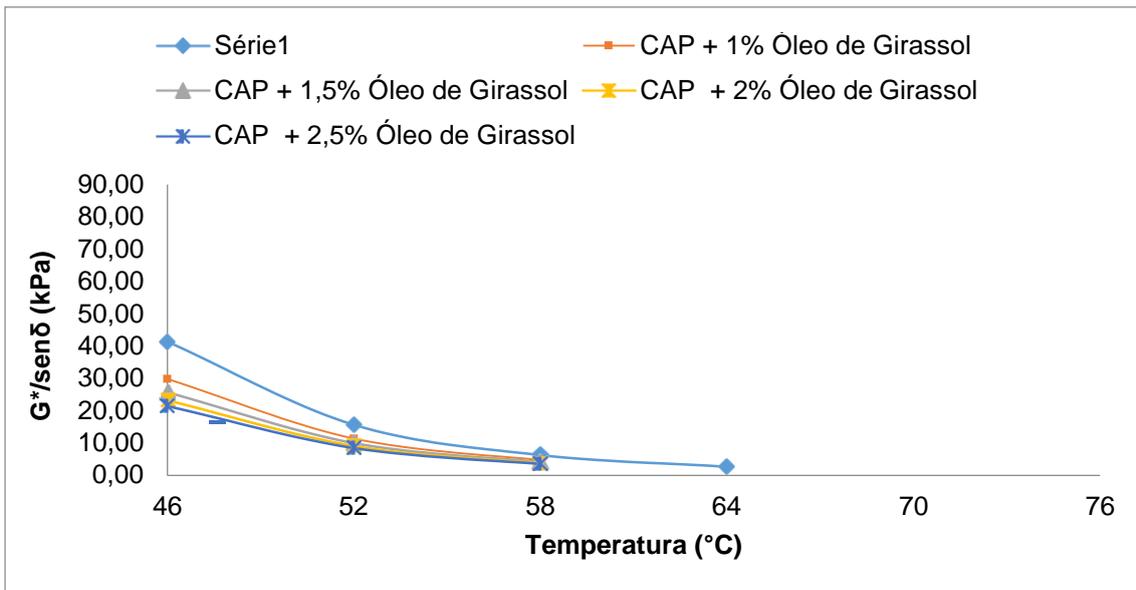


Figura 53 - Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura após o RTFO-Óleo de Girassol



Observando as curvas do óleo de girassol verificou-se uma redução de temperatura antes do RTFO no teor de 2,5% e os demais se igualam ao CAP puro. Já na curva após o RTFO todos os teores sofreram uma redução na temperatura de PG para 58°C (PG 58-XX). Entretanto em conceitos de PG verifica-se que a modificação não foi eficaz pois o acréscimo no  $\sin\delta$  foi maior que no Módulo Complexo ( $G^*$ ), ou seja, houve uma redução da rigidez do CAP.

Nas Figuras 54 e 55 respectivamente, são ilustradas as curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura na faixa de 46 a 76°C para as amostras de CAP Puro e Modificado com óleo de moringa, antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo RTFO.

Figura 54 - Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura antes do RTFO-Óleo de Moringa

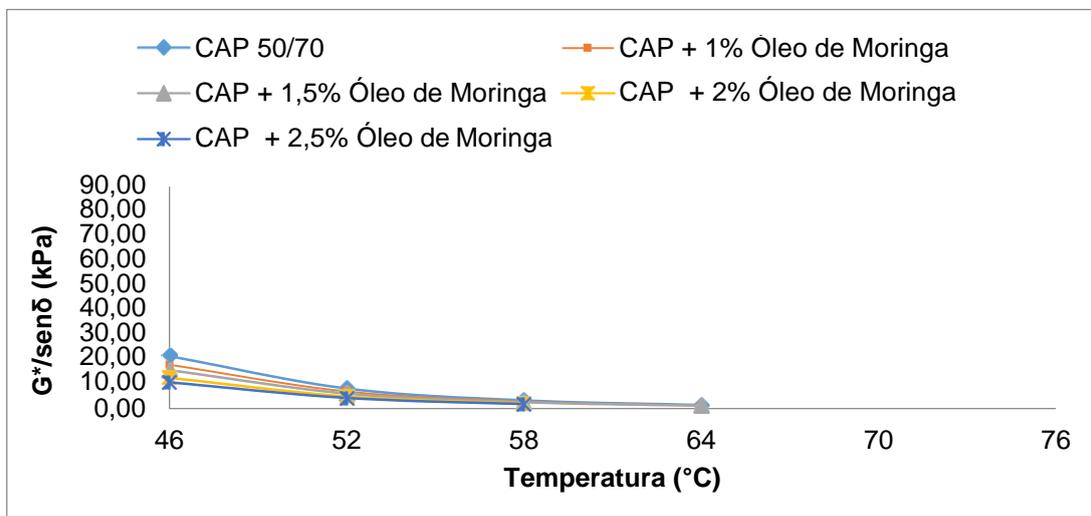
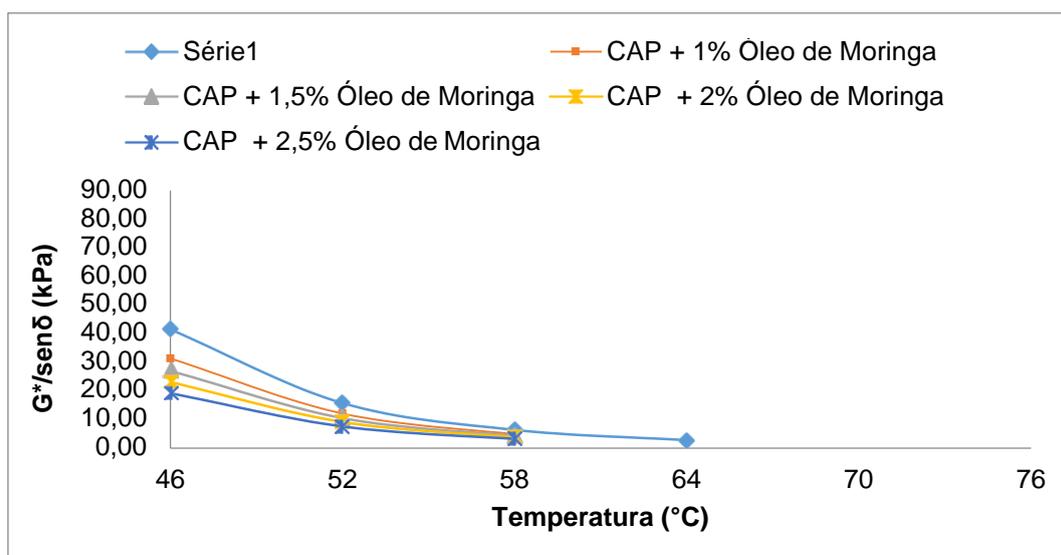


Figura 55 - Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura após o RTFO-Óleo de Moringa



Diferindo um pouco do óleo de girassol as curvas de óleo de moringa antes do RTFO apresentam duas reduções de temperatura nos teores de 2 e 2,5% e após o RTFO todos os teores caem para 58°C (PG 58-XX). Verifica-se que a modificação não foi eficaz pois o acréscimo no  $\sin\delta$  foi maior que no Módulo Complexo ( $G^*$ ) também caracterizando uma perda na rigidez do CAP.

Nas Figuras 56 e 57 respectivamente, são ilustradas as curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura na faixa de 46 a 76°C para as amostras de CAP Puro e Modificado com cera de carnaúba, antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo RTFO.

Figura 56 - Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura antes do RTFO-Cera de Carnaúba

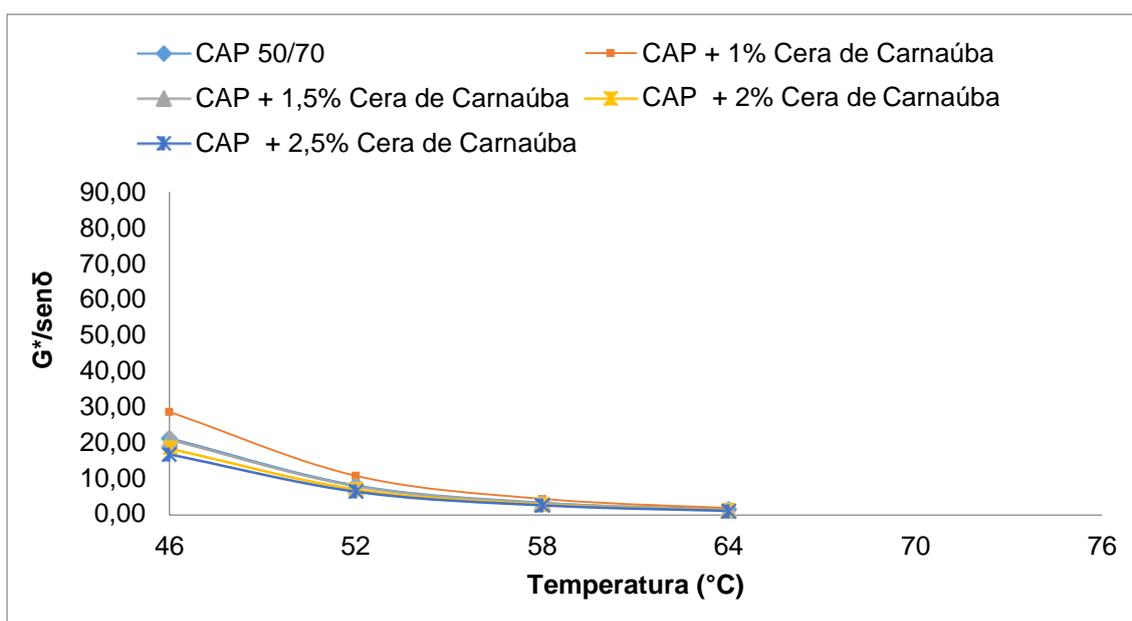
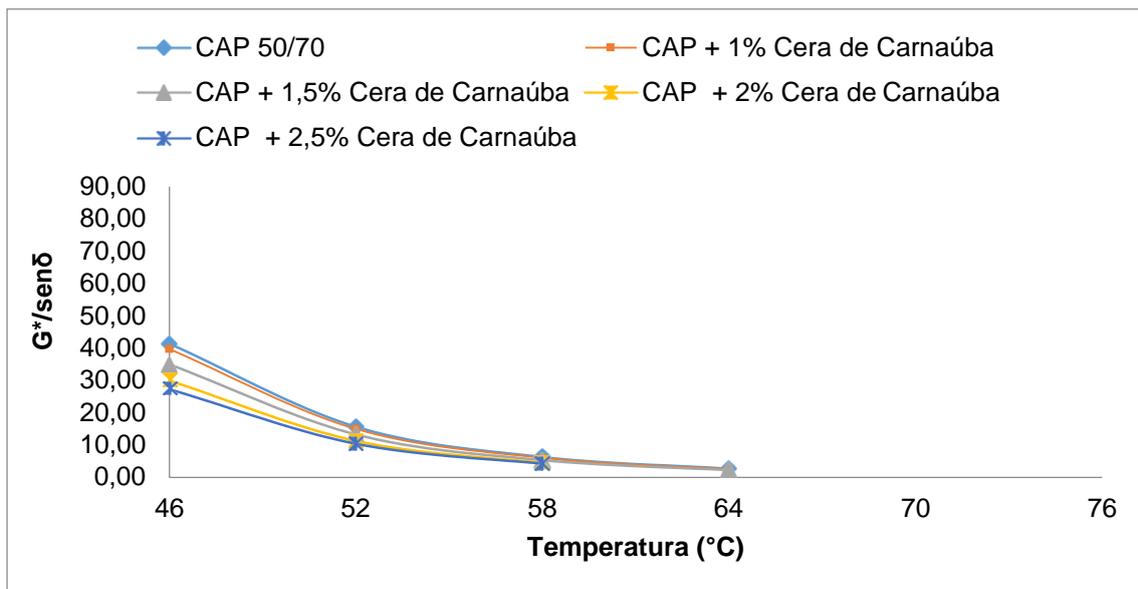


Figura 57 - Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura após o RTFO-Cera de Carnaúba



Por sua vez as curvas da cera de carnaúba permaneceram exatamente iguais ao CAP puro em termos de temperatura mantendo os 64°C, entretanto após o RTFO pode-se observar uma redução de temperatura para os teores de 2 e 2,5% caindo para 58°C enquanto que os demais permanecem em 64°C. Tendo em vista que o objetivo é superar ou manter a temperatura de PG do CAP puro observa-se que os teores de 2 e 2,5% não foram eficazes nesse critério pois o acréscimo no  $\sin\delta$  foi maior que no Módulo Complexo ( $G^*$ ) reduzindo a rigidez do CAP

#### 4.1.8 Ensaio MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery)

A realização do ensaio MSCR (Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas) avalia o percentual de recuperação (%R), donde é fornecido dados da elasticidade, a compilância não-recuperável ( $J_{nr}$ ), que por sua vez fornece dados da suscetibilidade ao acúmulo de deformação permanente e a diferença percentual entre as compilâncias não-recuperáveis ( $J_{nr, diff}$ ), a qual fornece dados quanto a sensibilidade ao aumento do nível de tensão. A Tabela 34 apresenta o resumo destes resultados para as tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa.

Tabela 35 - Resumo Ensaio MSCR

Tipo	Teores	PG (°C)	R <sub>0.1</sub> (%)	R <sub>3.2</sub> (%)	R <sub>diff</sub> (%)	J <sub>nr 0.1</sub> (kPa)	J <sub>nr 3.2</sub> (kPa)	J <sub>nr diff</sub> (%)
Puro	CAP 50-70	64	17,45	1,71	90,21	2,89	3,87	33,52
CCBit	CAP 50-70 + 1%	64	58,61	22,35	61,86	0,61	1,83	200,46
	CAP 50-70 + 1,5%	70	97,61	50,66	48,09	0,02	1,66	7981,95
	CAP 50-70 + 2%	70	98,06	34,96	64,35	0,02	2,32	9755,19
	CAP 50-70 + 2,5%	70	18,21	9,07	50,17	3,66	4,71	28,52
Cera de Carnaúba	CAP 50-70 + 1%	64	21,76	2,12	90,25	2,27	3,45	51,80
	CAP 50-70 + 1,5%	64	13,85	1,39	89,94	2,85	3,89	36,44
	CAP 50-70 + 2%	58	9,72	4,46	54,10	1,59	1,84	15,40
	CAP 50-70 + 2,5%	58	22,39	4,43	80,19	1,61	2,20	36,64
Óleo de Girassol	CAP 50-70 + 1%	58	26,18	4,16	84,11	1,14	1,70	49,33
	CAP 50-70 + 1,5%	58	16,56	1,88	88,65	1,68	2,20	30,70
	CAP 50-70 + 2%	58	41,69	3,94	90,55	1,21	2,29	89,89
	CAP 50-70 + 2,5%	58	7,92	1,97	75,15	2,46	2,79	13,38
Óleo de Moringa	CAP 50-70 + 1%	58	22,97	6,04	73,71	1,39	1,83	31,69
	CAP 50-70 + 1,5%	58	39,77	3,57	91,03	1,24	2,30	85,39
	CAP 50-70 + 2%	58	15,33	2,21	85,56	2,03	2,65	30,59
	CAP 50-70 + 2,5%	58	21,95	1,94	91,17	1,93	3,00	54,95

Analisando os resultados observa-se, de modo geral que a adição dos modificadores ao CAP puro proporcionou um aumento nos valores de R do material. Segundo Domingos (2015) percentuais de recuperação maiores podem ser interpretados como uma parcela maior de deformação recuperável em relação ao total sofrido pelo material após cada ciclo de fluência e de recuperação (o acúmulo de deformação plástica é menor), o que se mostra favorável à resistência à deformação permanente.

Particularmente o CCBit foi o aditivo que apresentou os maiores percentuais. Por outro lado, os menores percentuais de R foram obtidos pelo óleo de girassol (2,5%)- R de 7,92% para tensão de 0,1kPa- e para cera de carnaúba (1,5%)- R de 1,39% para tensão de 3,2kPa.

De maneira geral, o efeito da adição dos aditivos nas compliâncias não-recuperáveis do CAP é o contrário do observado no percentual de recuperação, ou seja, a presença dos aditivos proporciona redução da compliância em todas as temperaturas e níveis de tensão. Segundo Domingos (2015) valores mais baixos de J<sub>nr</sub> indicam uma suscetibilidade menor do ligante asfáltico à deformação permanente em campo, ou seja,

ocorre um aumento da contribuição do CAP na resistência da mistura asfáltica à deformação permanente após a adição dos aditivos.

Observa-se também comportamentos bastante similares nos valores de Jnr quando comparados os óleos de girassol e da moringa, fato este recorrente na presente pesquisa.

Segundo Anderson et al (2010) o valor de Jnr, diff, que corresponde à diferença do Jnr 0,1 e Jnr 3,2, não deve exceder a 75%, para que o CAP não seja excessivamente sensível à variação do nível de tensão. Em relação aos resultados do Jnr, diff observa-se que após a adição dos modificadores alguns teores utilizados não apresentaram diferenças de percentuais inferiores a 75% sendo elas CCBit 1,0;1,5;2,0% ;Óleo de Girassol 2,0% e o Óleo de Moringa 1,5%. Vale ressaltar que os altos valores de Jnr, diff encontrados para o CCBit foram verificados novamente, não encontrando alterações significativas em seus valores.

De forma geral, pode-se destacar que os efeitos das modificações nos dois parâmetros reológicos do ligante asfáltico (R e Jnr) são distintos, ou seja, a modificação aumentou a sensibilidade do CAP à tensão do ponto de vista da compliância não-recuperável (Jnr, diff maior) e a reduziu do ponto de vista do percentual de recuperação menor (R, diff menor).

Destaca-se que os valores encontrados são para temperaturas de PG diferentes, ou seja, as condições não são as mesmas podendo apresentar uma resposta diferente em campo se aplicadas a temperaturas superiores como podemos destacar o CCBit PG 70 e os óleos PG 58. Teoricamente falando o CAP+CCBit aplicado a 64°C e o CAP+Óleos aplicado também a 64°C obteriam resultados bem diferentes, com o CCBit apresentando uma resistência bem maior.

Nas Figuras 58, 59, 60 e 61 respectivamente são apresentados os valores percentuais da recuperação obtidos para os CAP Puro e Modificado.

Figura 58 - Valores do percentual de recuperação CCBit

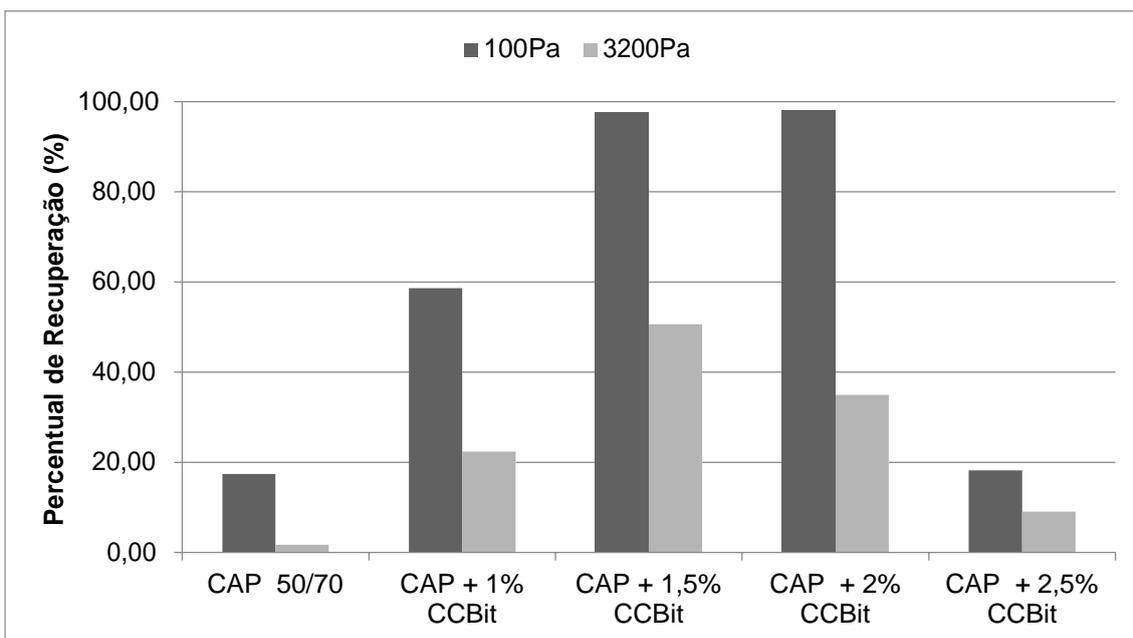


Figura 59 - Valores do percentual de recuperação Óleo de Girassol

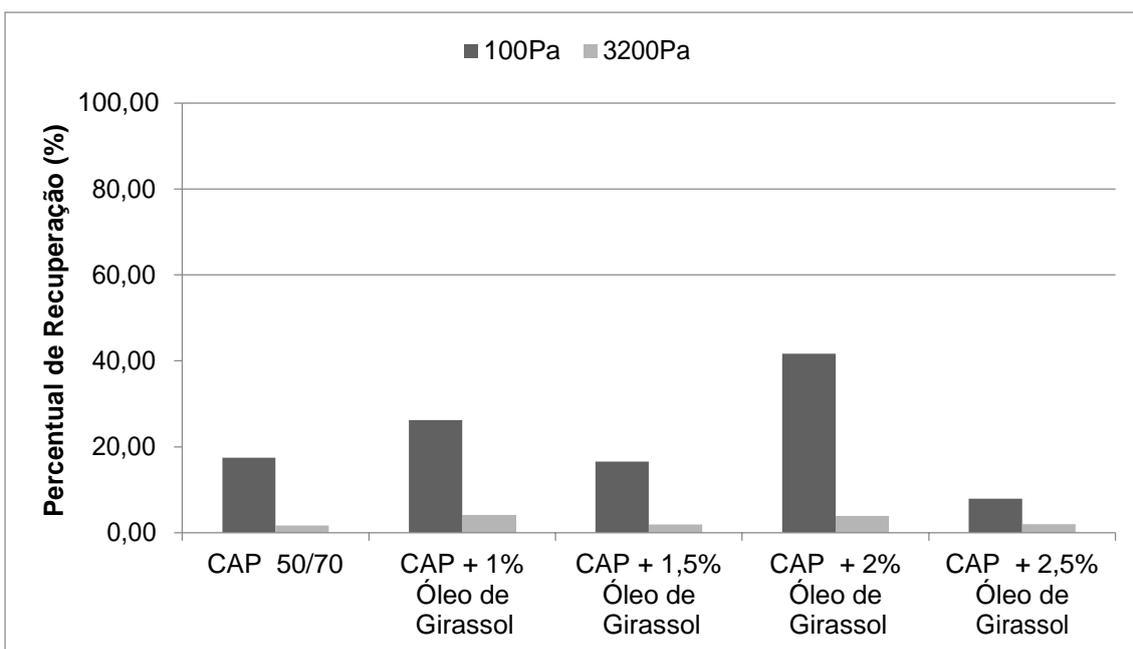


Figura 60 - Valores do percentual de recuperação Óleo de Moringa

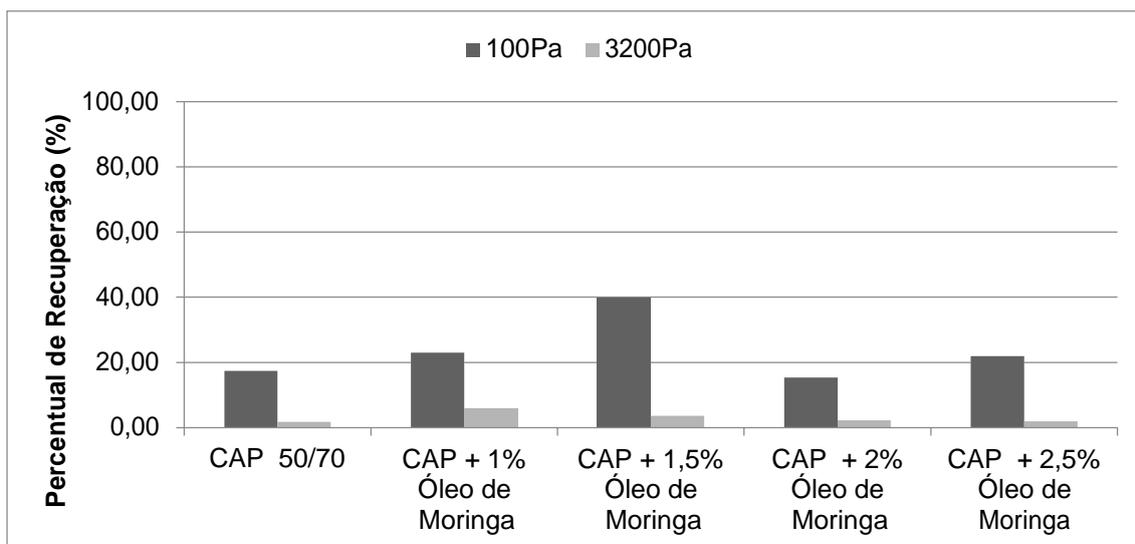
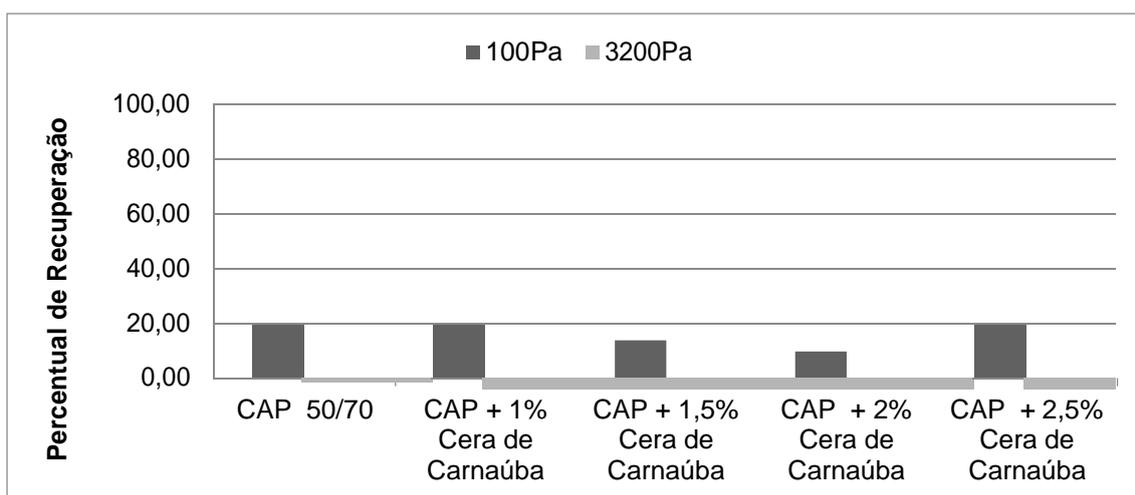


Figura 61 - Valores do percentual de recuperação Cera de Carnaúba



Observa-se que a adição do CCBit promoveu o incremento do percentual de recuperação do material de maneira significativa, em ambos os níveis de tensões de 100Pa e 3200Pa, o que demonstra um certo comportamento elástico do aditivo, que pode ser classificado como uma ação benéfica. Os outros aditivos, por sua vez, não apresentaram uma recuperação significativa em ambos os níveis de tensão, conseqüentemente não causando nenhum benefício nesse critério. Vale ressaltar que os ensaios de recuperação elástica e MSCR são realizados em temperaturas diferentes que pode ser observado pela disparidade dos resultados obtidos com o CCBit.

Nas Figuras 62, 63, 64, 65 são expostos os valores da compliância não-recuperável (Jnr) para o CAP Puro e Modificado.

Figura 62 - Valores da compliância não-recuperável (Jnr)- CCBit

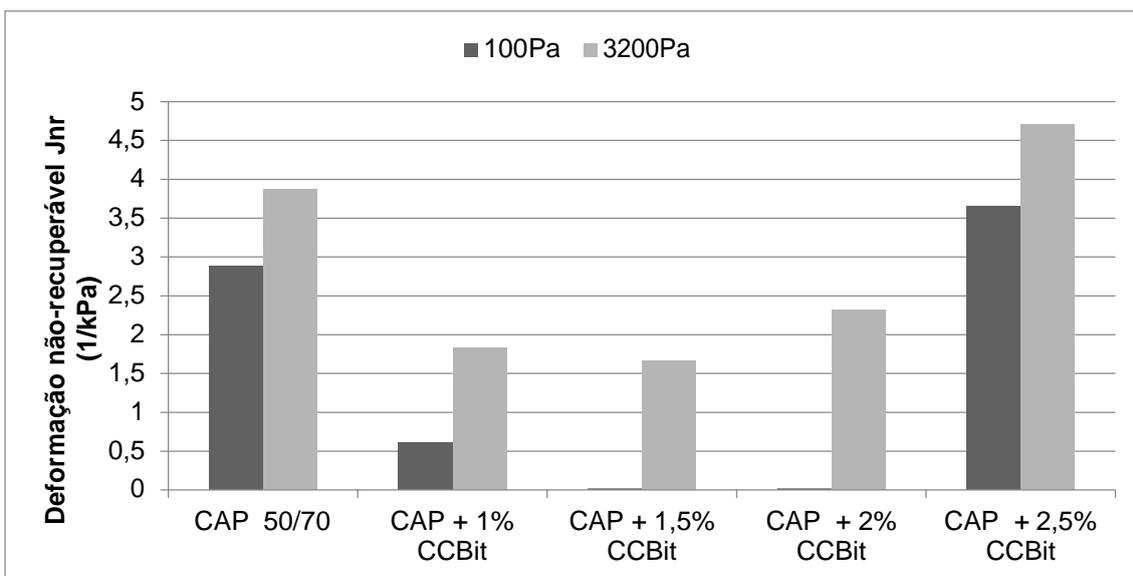


Figura 63 - Valores da compliância não-recuperável (Jnr)- Óleo de Girassol

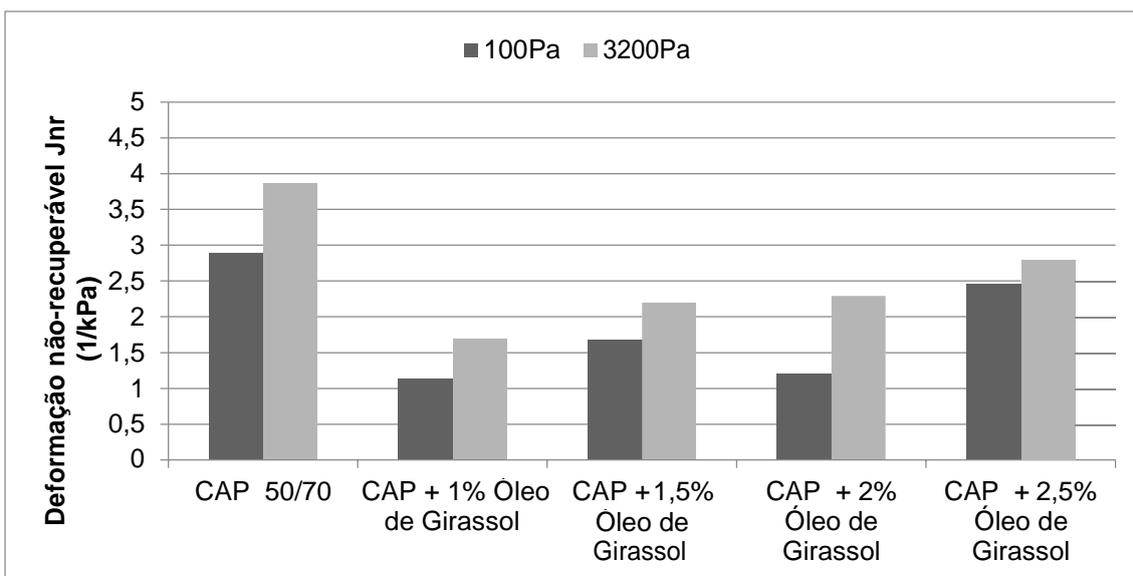


Figura 64 - Valores da compliância não-recuperável (Jnr)- Óleo de Moringa

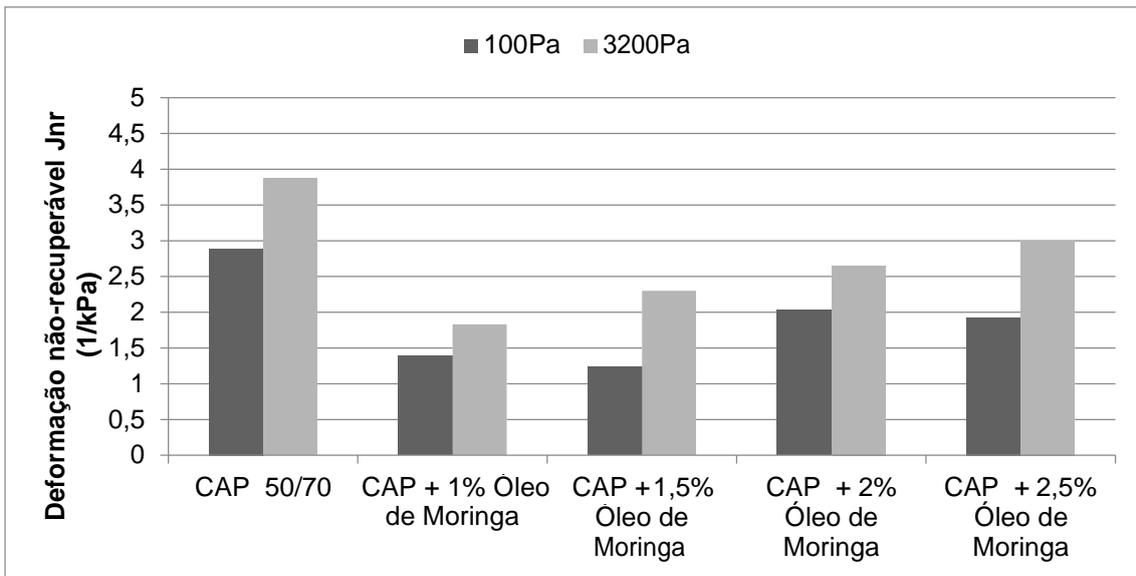
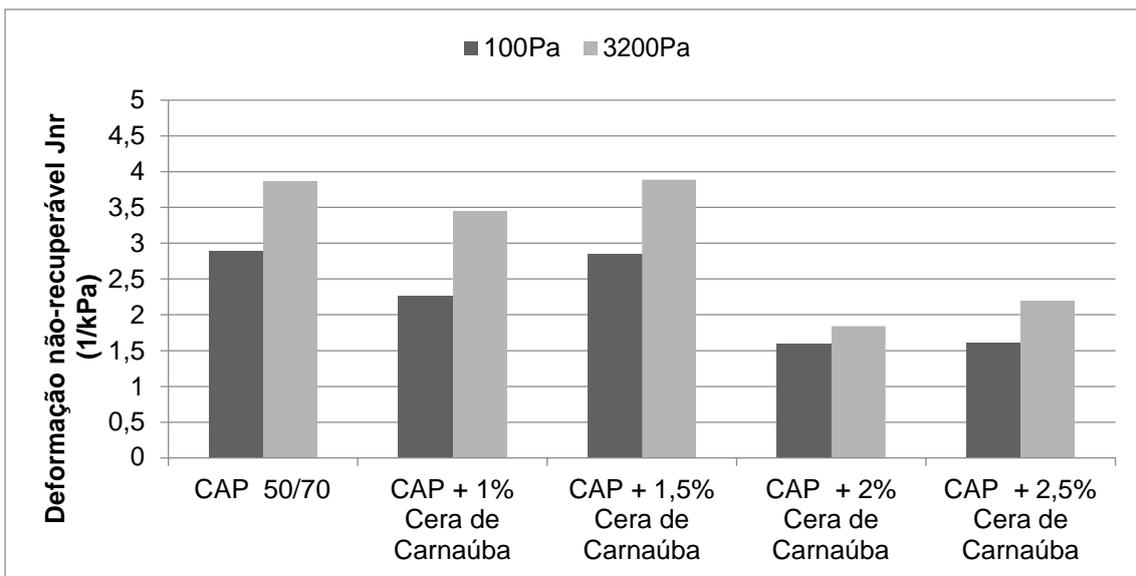


Figura 65 - Valores da compliância não-recuperável (Jnr)- Cera de Carnaúba



Considerando os resultados obtidos para o Jnr a 3200 Pa apresenta-se na Tabela 35 a classificação das amostras do CAP Puro e Modificado quanto ao critério de tráfego do FHWA (*Federal Highway Administration*).

Tabela 36 - Resumo Ensaio MSCR

Tipo	Teores	PG (°C)	J <sub>nr 3.2</sub> (kPa)	Intervalo J <sub>nr</sub> (kPa <sup>-1</sup> )	Nível de tráfego
Puro	CAP 50-70	64	3,87	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
CCBit	CAP 50-70 + 1%	64	1,83	1,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 2,0	Pesado (H)
	CAP 50-70 + 1,5%	70	1,66	1,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 2,0	Pesado (H)
	CAP 50-70 + 2%	70	2,32	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
	CAP 50-70 + 2,5%	70	4,71	-	-
Cera de Carnaúba	CAP 50-70 + 1%	64	3,45	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
	CAP 50-70 + 1,5%	64	3,89	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
	CAP 50-70 + 2%	58	1,84	1,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 2,0	Pesado (H)
	CAP 50-70 + 2,5%	58	2,20	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
Óleo de Girassol	CAP 50-70 + 1%	58	1,70	1,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 2,0	Pesado (H)
	CAP 50-70 + 1,5%	58	2,20	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
	CAP 50-70 + 2%	58	2,29	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
	CAP 50-70 + 2,5%	58	2,79	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
Óleo de Moringa	CAP 50-70 + 1%	58	1,83	1,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 2,0	Pesado (H)
	CAP 50-70 + 1,5%	58	2,30	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
	CAP 50-70 + 2%	58	2,65	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)
	CAP 50-70 + 2,5%	58	3,00	2,0 ≤ J <sub>nr</sub> ≤ 4,0	Padrão (S)

A maioria dos resultados encontrados nas amostras indicam tráfego padrão/pesado e o teor de 2,5% do CCBit não possui classificação estabelecida pela FHWA. Nas amostras modificadas é observado nitidamente o efeito benéfico e eficaz dos agentes modificadores, uma vez que algumas amostras de CAP modificados se mostraram aptas a serem submetidas a um tráfego pesado (H). Destaca-se que com o teor de apenas 1% de aditivos incorporado essa alteração foi observada para o CCbit e para os óleos de girassol e de moringa. Vale ressaltar que as temperaturas de PG divergem, ou seja, para as misturas CAP+Óleos e CAP+Cera que obtiveram PGs de 58°C se comparados ao CAP puro a uma temperatura de 64°C podem não manter os mesmos resultados podendo até serem bem inferiores aos encontrados anteriormente.

Com o objetivo de analisar o nível elasticidade das amostras estudadas são apresentados nas Figuras 66, 67, 68 e 69 os valores percentuais de recuperação versus a compliância não-recuperável (J<sub>nr</sub>).

Figura 66 - Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável-CCBit

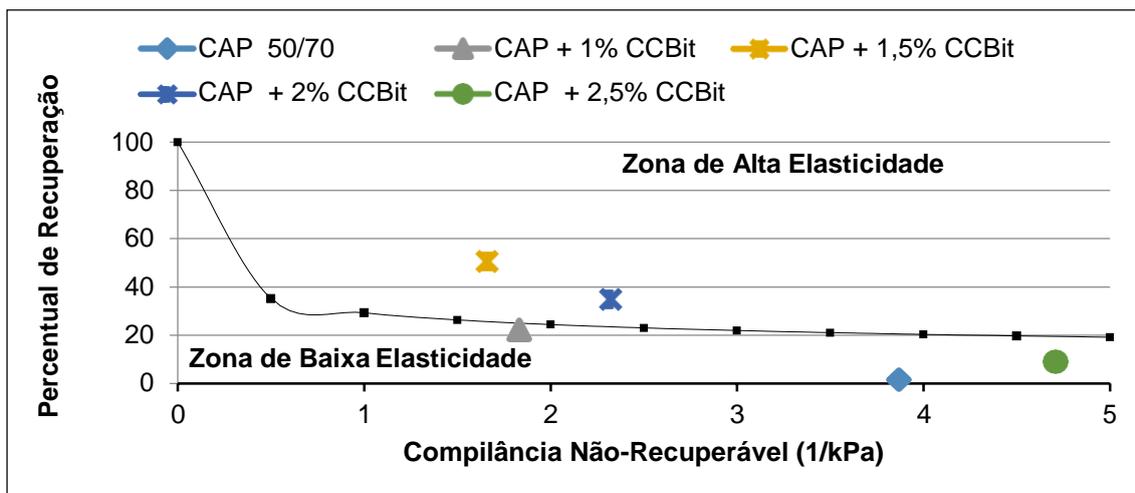


Figura 67 - Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável-Óleo de Girassol

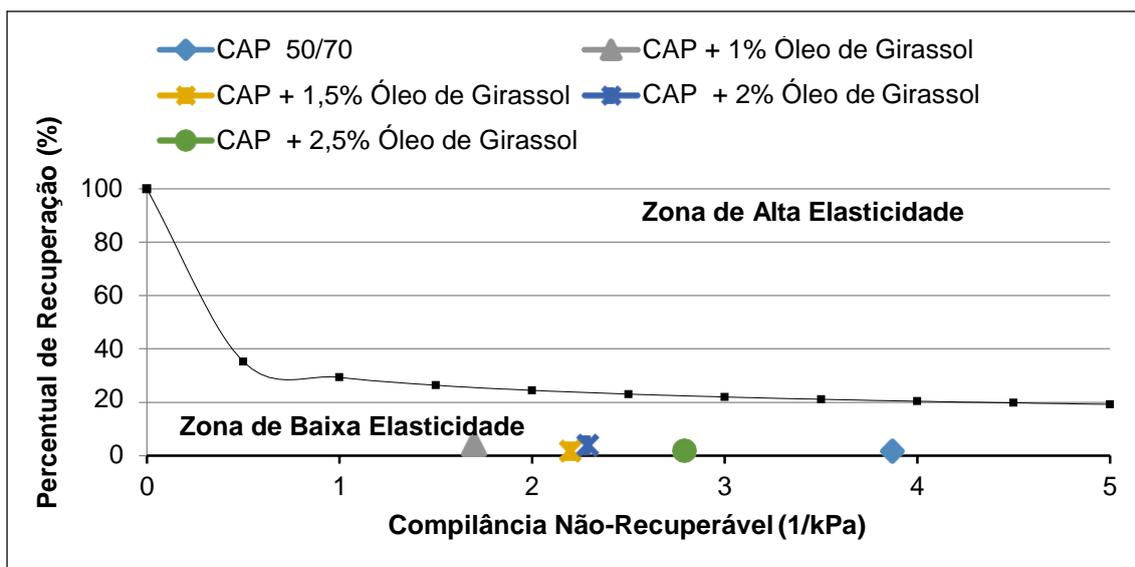


Figura 68 - Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável-  
Óleo de Moringa

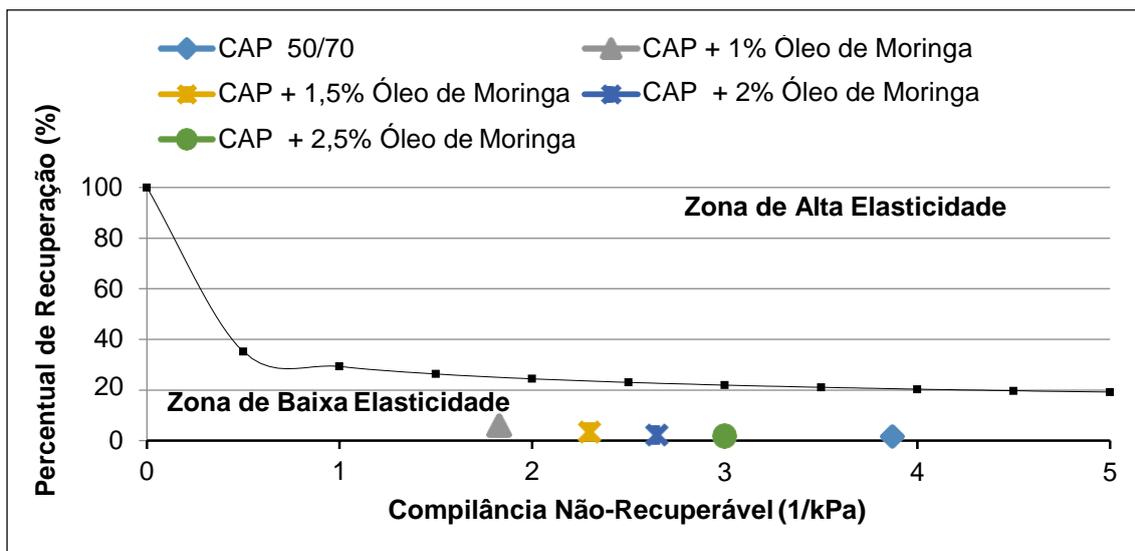
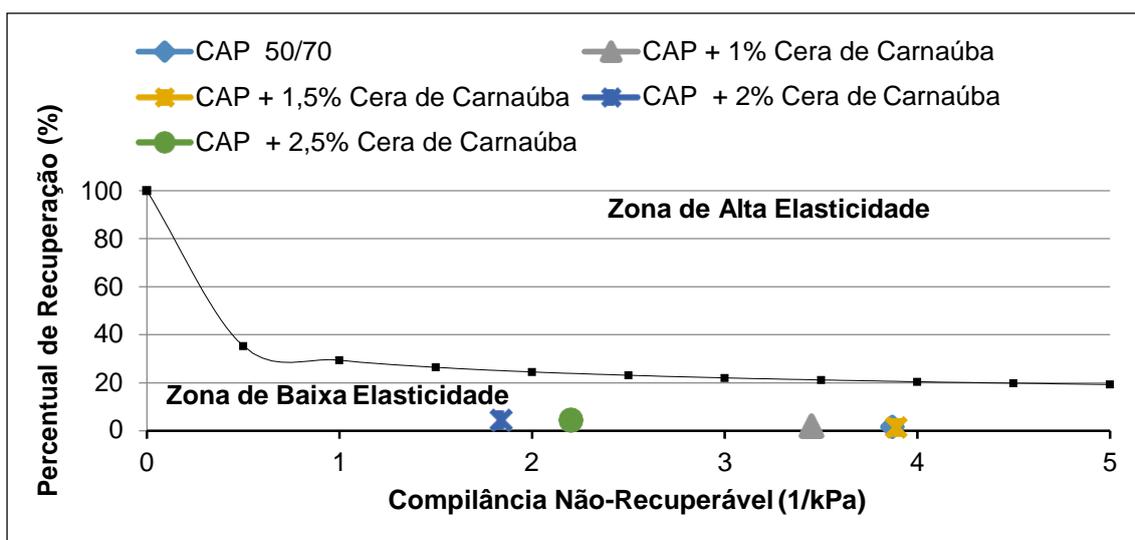


Figura 69 - Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável-  
Cera de Carnaúba



Observando os resultados percebe-se que todas as amostras estão localizadas na zona de baixa elasticidade, com exceção do CCBit que apresenta dois teores na zona de alta elasticidade (1,5 e 2,0%) e um bem próximo a mesma (1,0%). Este fato pode ser explicado por um certo comportamento elástico presente no CCBit que ao atingir 2,5% de aditivo na mistura alcança uma certa estabilidade na mistura fortalecendo o CAP mas não deixando-o tão susceptível quanto os outros teores. Entretanto, é perceptível que a adição e o aumento do teor dos modificadores com exceção do CCBit, não promove incremento do percentual de recuperação das amostras.

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

As figuras 70 e 71 respectivamente representam o comportamento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura, para os CAP Puro e Modificados com CCBIt.

Figura 70 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura antes do RTFO- CCBIt

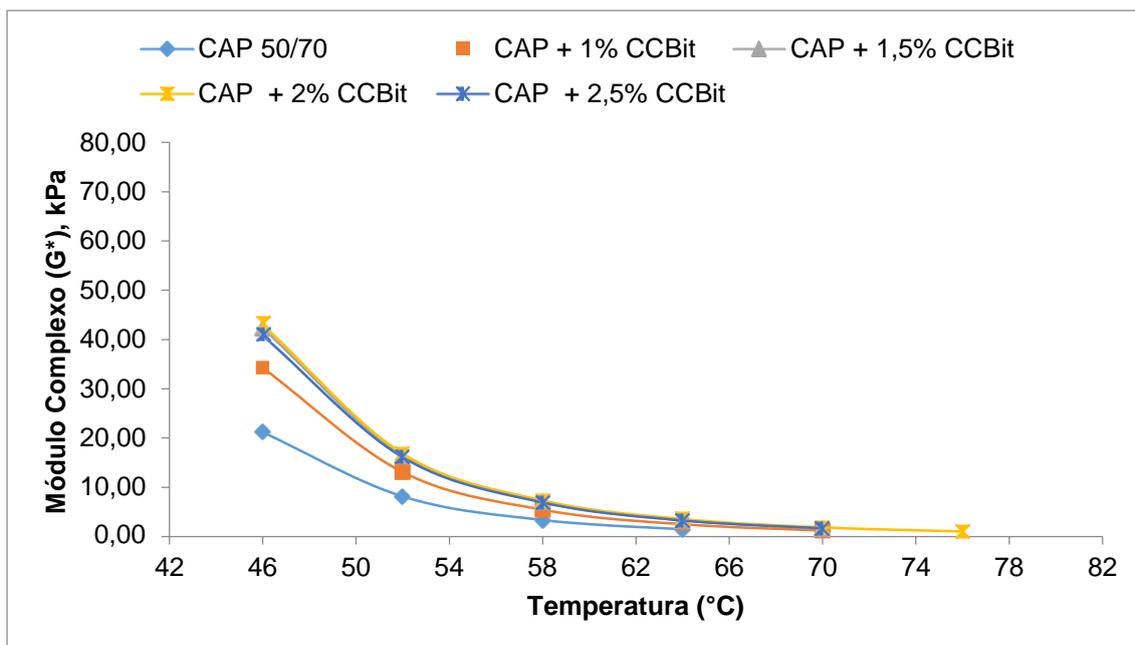
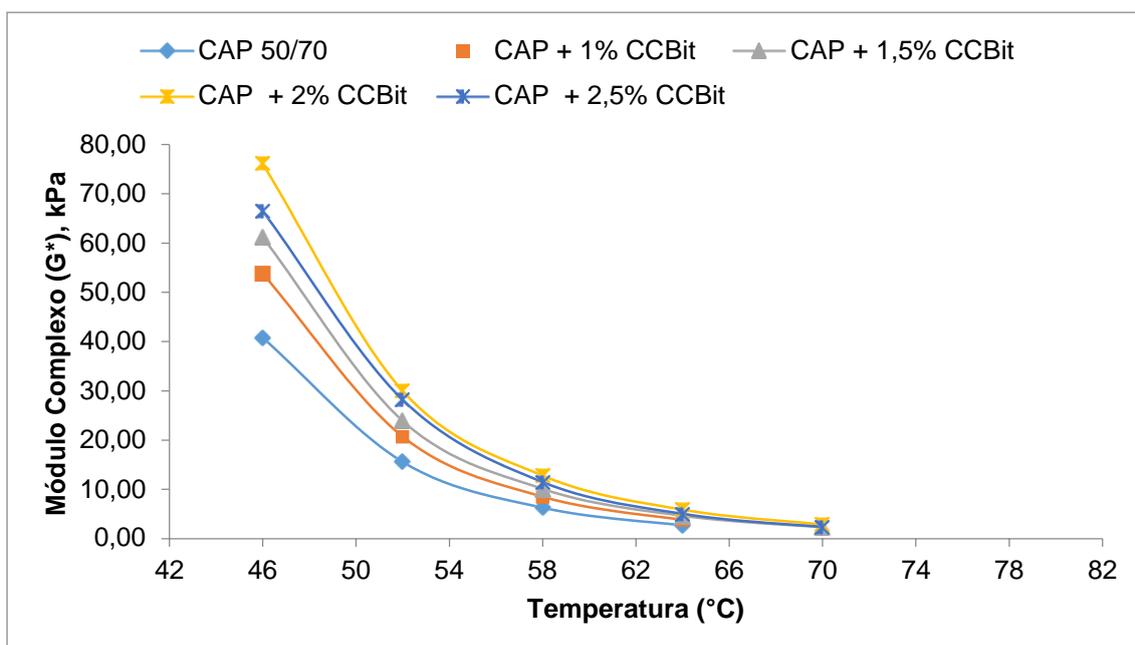


Figura 71 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura após o RTFO- CCBIt



Observa-se que mesmo após envelhecimento à curto prazo o CCBit mantém um Módulo Complexo acima do CAP puro o que mostra o benefício da utilização do aditivo pois torna o CAP mais resistente. Inicialmente o CAP vai ganhando resistência com o aumento dos teores do CCBit, entretanto ocorre uma mudança nos teores de 2 e 2,5% de CCBit pois tanto antes como após o RTFO o teor de 2,0% se mostra mais efetivo em ganho de resistência possuindo o maior Módulo Complexo de todas as amostras.

As Figuras 72 e 73 apresentam o comportamento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura, para os CAP Puro e Modificados com óleo de girassol.

Figura 72 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura antes do RTFO- Óleo de Girassol

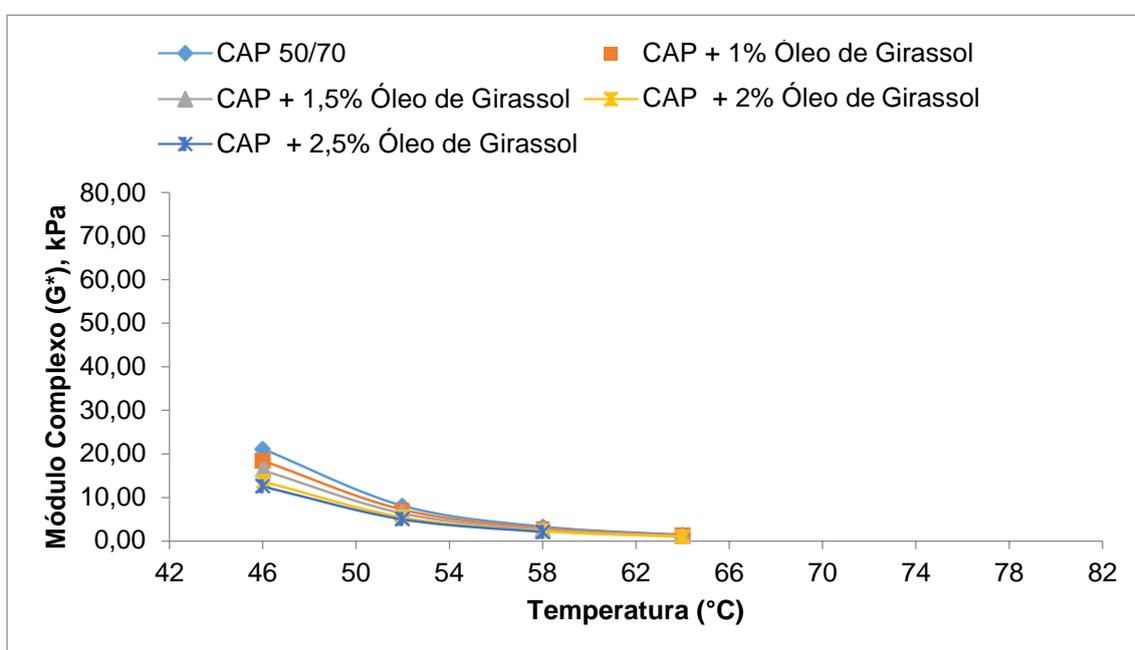
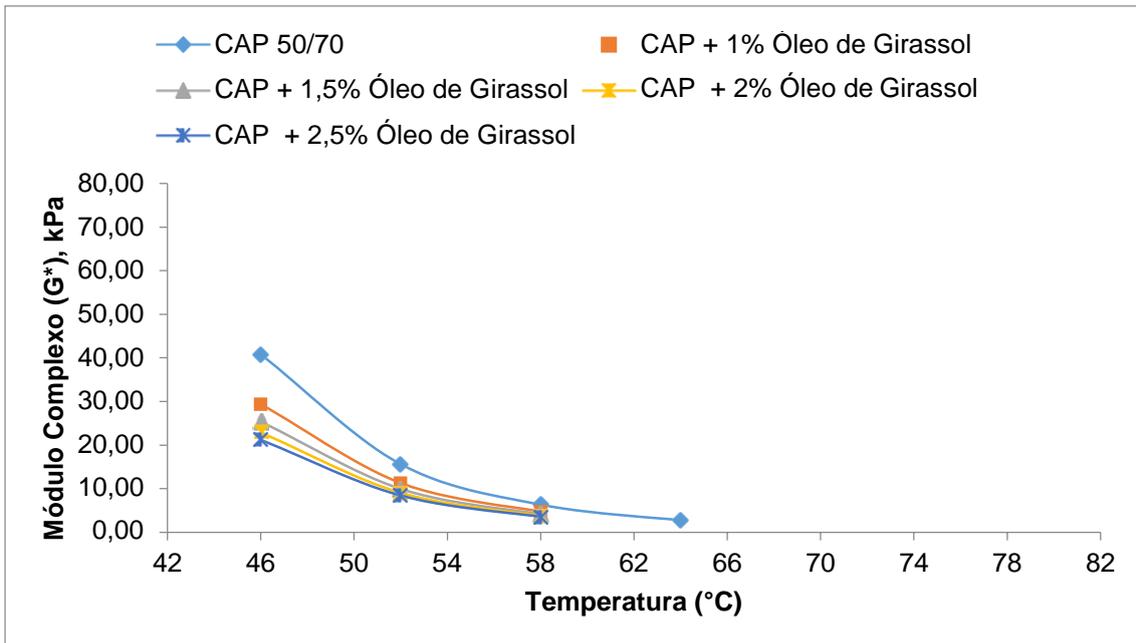


Figura 73 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura após o RTFO- Óleo de Girassol



Verificou-se analisando as curvas do óleo de girassol uma redução no Módulo Complexo antes e após o RTFO o que pode ser justificado devido à redução de viscosidade causada pela adição de óleo ao CAP puro que consequentemente causa perda de rigidez. Observa-se também que o  $G^*$  diminui proporcionalmente à adição de óleo e aumento da temperatura, este fato implica na redução da resistência à deformação do CAP.

As Figuras 74 e 75 representam o comportamento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura, para os CAP Puro e Modificados com óleo de moringa.

Figura 74 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura antes do RTFO- Óleo de Moringa

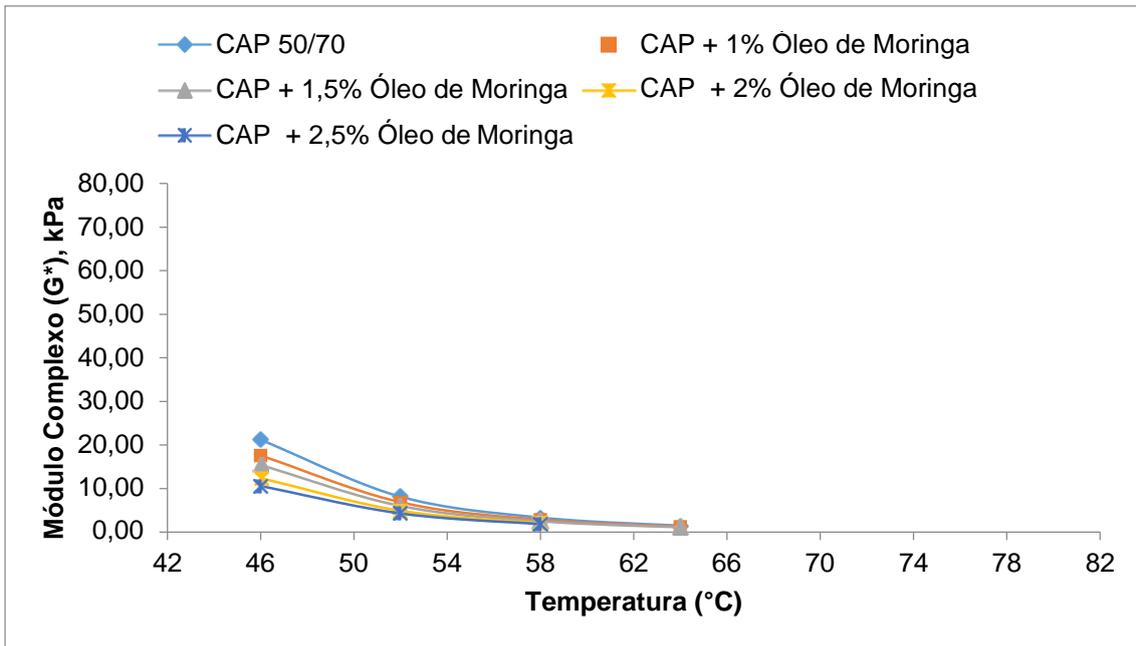
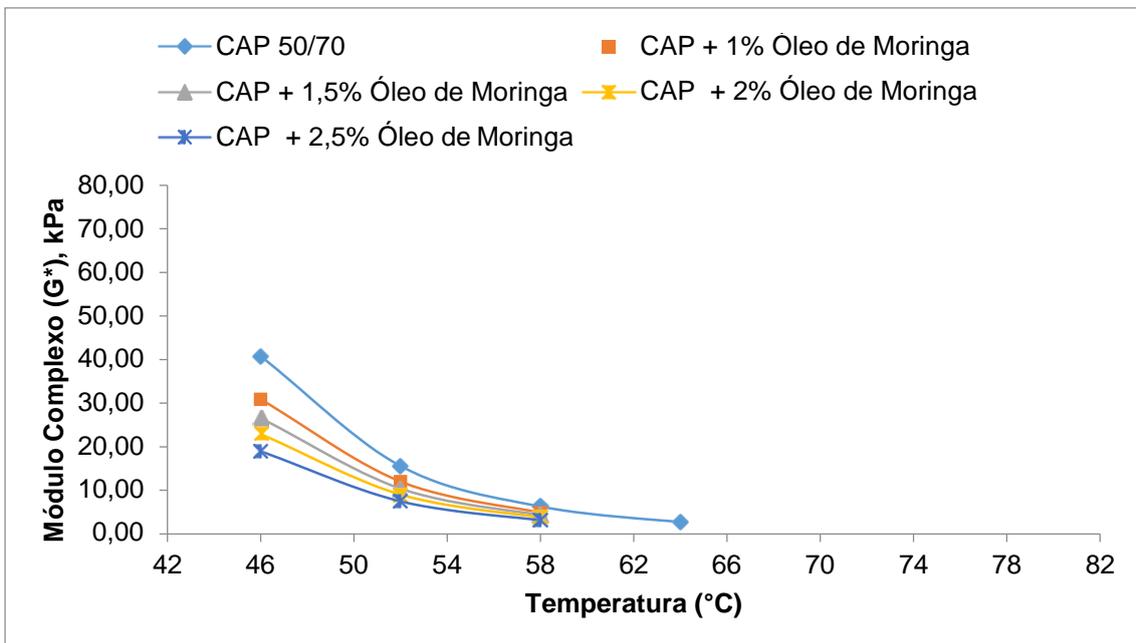


Figura 75 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura após o RTFO- Óleo de Moringa



Tal qual foi verificado com o óleo de girassol ocorre a redução do Módulo Complexo com a adição do óleo de moringa que também pode ser justificado devido a redução da viscosidade causada pela adição do óleo ao CAP puro reduzindo assim sua rigidez. Observa-se também que o  $G^*$  diminui proporcionalmente à adição de óleo e

aumento da temperatura, este fato implica na redução da resistência à deformação do CAP.

As Figuras 76 e 77 representam o comportamento do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura, para os CAP Puro e Modificados com cera de carnaúba.

Figura 76 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura antes do RTFO- Cera de Carnaúba

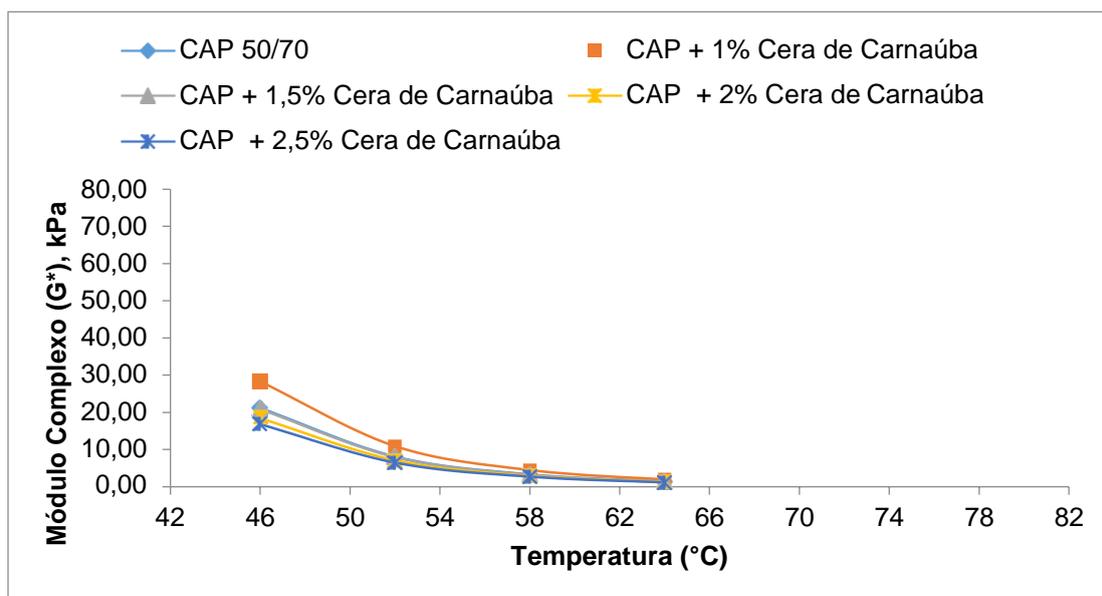
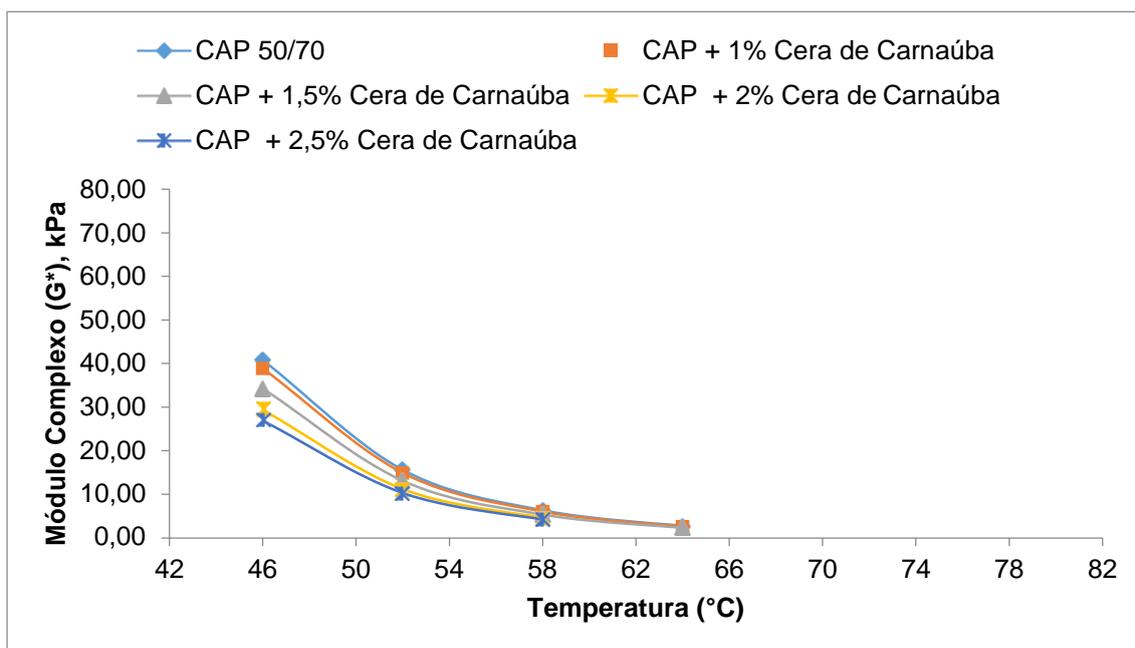


Figura 77 - Gráfico da variação do Módulo Complexo ( $G^*$ ) em função da temperatura após o RTFO- Cera de Carnaúba



Inicialmente observa-se que antes do RTFO o teor de 1,0% de cera de carnaúba apresente um módulo complexo maior que o do CAP puro, entretanto após envelhecimento à curto prazo ele não mantém essa vantagem obtendo resultados bem próximos ao CAP puro. Os outros teores, antes e após o RTFO, se mostraram inferiores ao CAP puro. Observa-se também que o  $G^*$  diminui proporcionalmente à adição de cera de carnaúba e aumento da temperatura, este fato implica na redução da resistência à deformação do CAP.

As Figuras 78 e 79 representam respectivamente o comportamento da  $\tan \delta$  em função da temperatura, para os CAP Puro e Modificados com CCBIt.

Figura 78 - Gráfico da variação da  $\tan \delta$  em função da temperatura antes do RTFO-CCBit

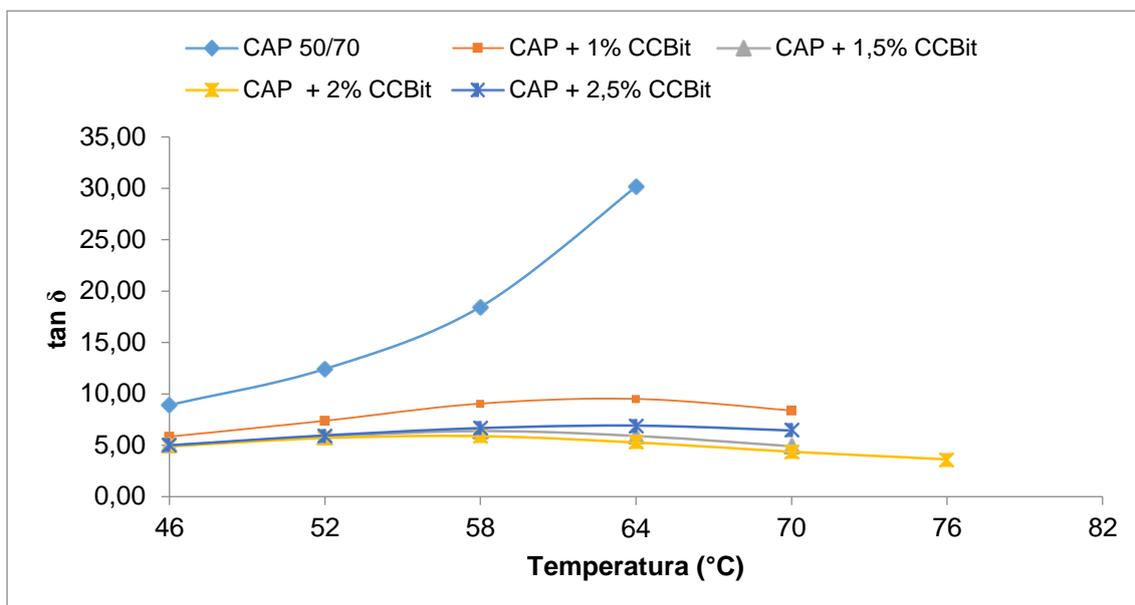
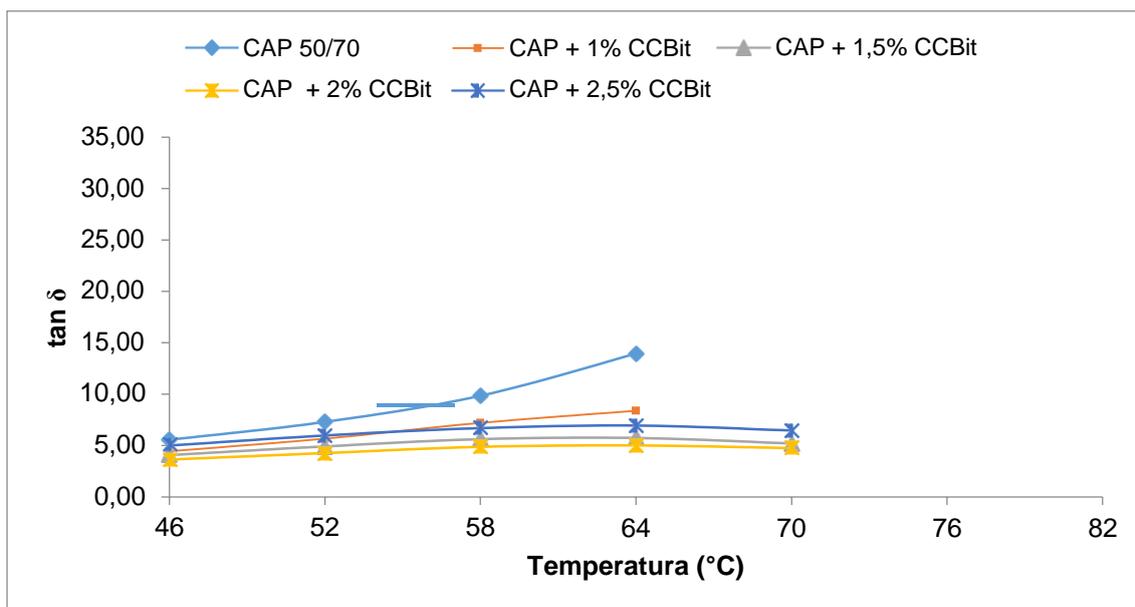


Figura 79 - Gráfico da variação da  $\tan \delta$  em função da temperatura após o RTFO- CCBiit



Segundo Chen et al (2014b) o ângulo de fase na estrutura do CAP é mais sensível a agentes químicos e físicos. Um menor ângulo de fase tem melhor desempenho na recuperação elástica do CAP. 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, os CAPs modificados com adição de CCBiit apresentaram uma redução dos valores da  $\tan \delta$  tanto antes como após o RTFO indicando uma melhoria na elasticidade do material. Percebe-se que a redução dos valores da  $\tan \delta$  não é proporcional ao aumento do teor de CCBiit introduzido no CAP onde o melhor resultado obtido foi com a adição do teor de 2,0%.

As Figuras 80 e 81 representam respectivamente o comportamento da  $\tan \delta$  em função da temperatura, para os CAP Puro e Modificados com óleo de girassol.

Figura 80 - Gráfico da variação da  $\tan \delta$  em função da temperatura antes do RTFO- Óleo de Girassol

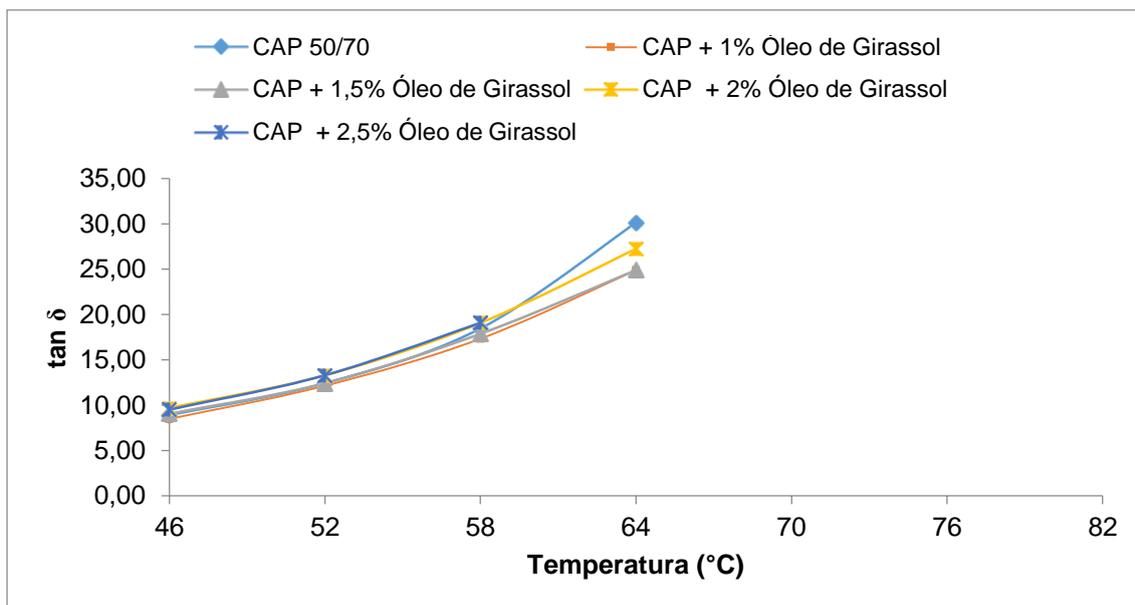
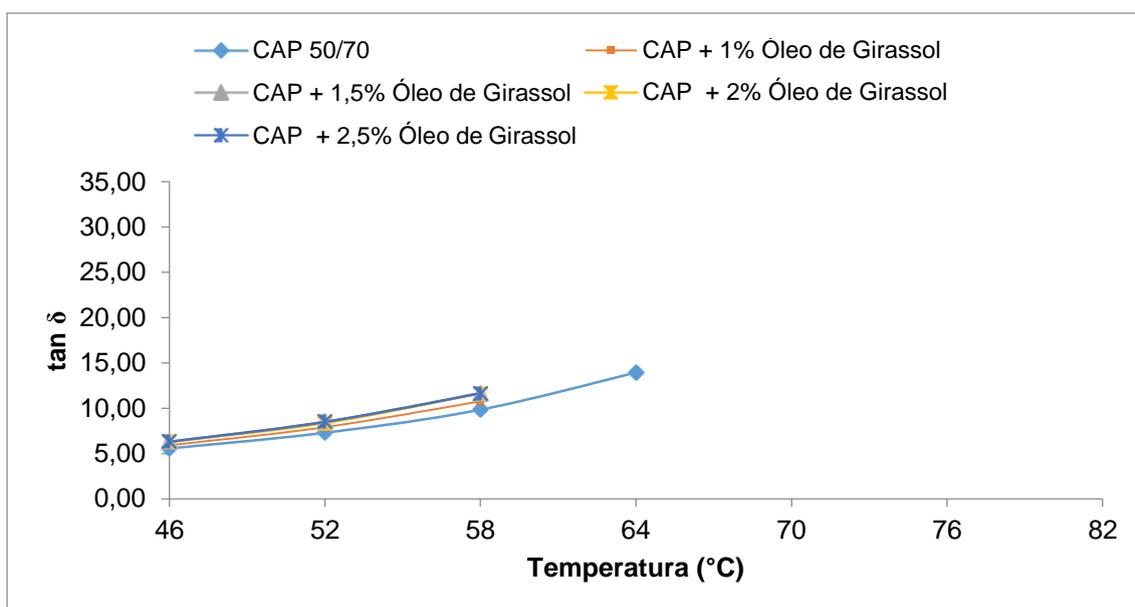


Figura 81 - Gráfico da variação da  $\tan \delta$  em função da temperatura após o RTFO- Óleo de Girassol



Observando as curvas fornecidas pelo óleo de girassol pode-se observar que antes do RTFO não são todas as curvas que mostram ganho de elasticidade como pode ser observado no teor de 2,5% que fica acima da curva do CAP puro indicando baixa recuperação elástica em relação ao CAP referência. Após a realização do ensaio do RTFO verificou-se que todas as amostras apresentam um valor de  $\tan \delta$  maior que o CAP puro.

O aumento da  $\tan \delta$  com o aumento da temperatura faz indicar a perda gradativa da elasticidade do material. Vale ressaltar também que não há diferença significativa entre os teores acima de 1,0% após o RTFO como pode ser observado as curvas se sobrepõem.

As Figuras 82 e 83 representam respectivamente o comportamento da  $\tan \delta$  em função da temperatura, para os CAP Puro e Modificados com óleo de girassol.

Figura 82 - Gráfico da variação da  $\tan \delta$  em função da temperatura antes RTFO- Óleo de Moringa

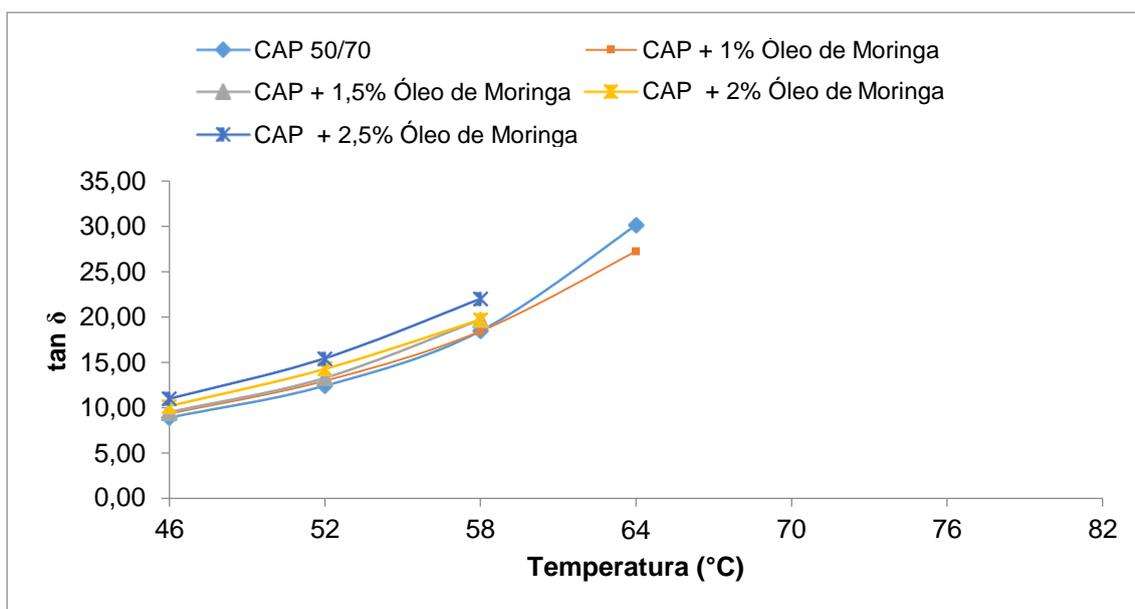
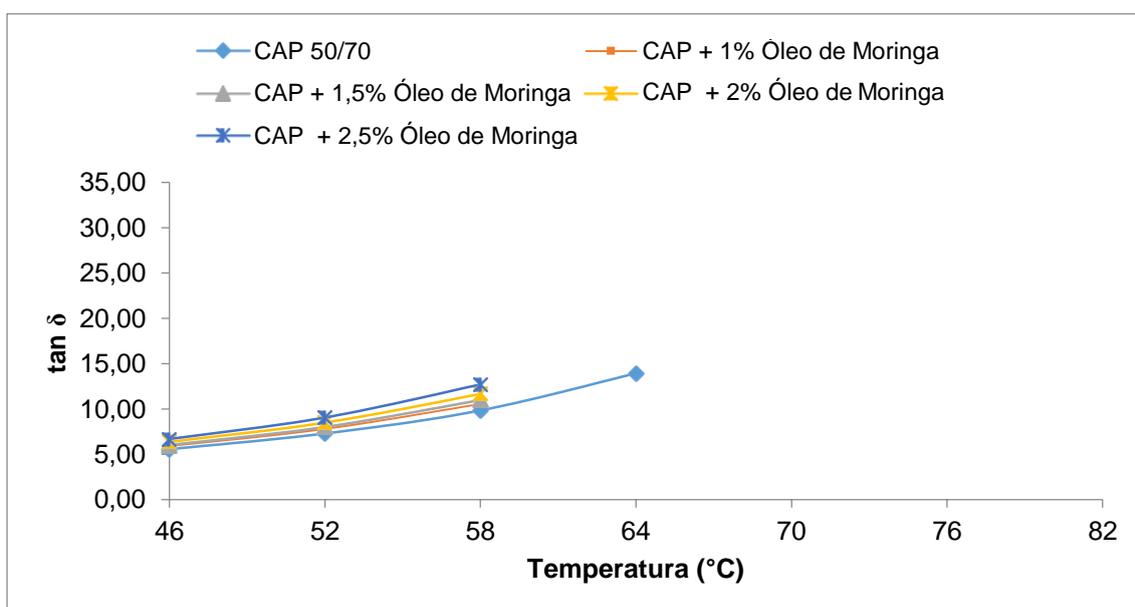


Figura 83 - Gráfico da variação da  $\tan \delta$  em função da temperatura após o RTFO- Óleo de Moringa



Tal qual o óleo de girassol os teores de moringa também apresentaram valores de  $\tan \delta$  maiores que o CAP puro, antes e após o RTFO, o que indica a perda gradativa da elasticidade do material.

As Figuras 84 e 85 representam respectivamente o comportamento da  $\tan \delta$  em função da temperatura, para os CAP Puro e Modificados com cera de carnaúba.

Figura 84 - Gráfico da variação da  $\tan \delta$  em função da temperatura antes RTFO- Cera de Carnaúba

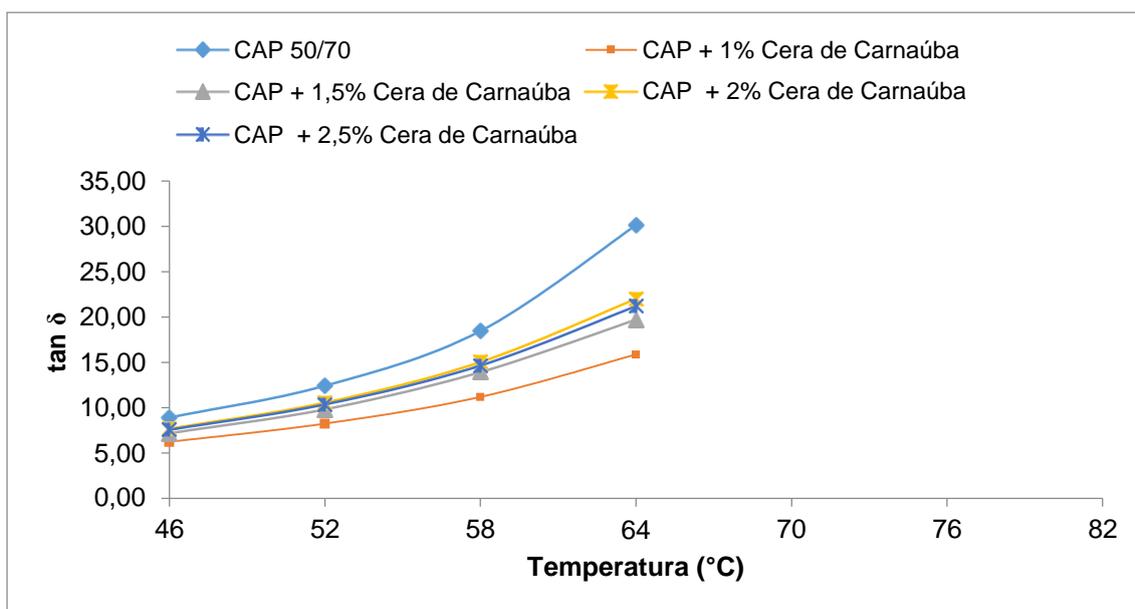
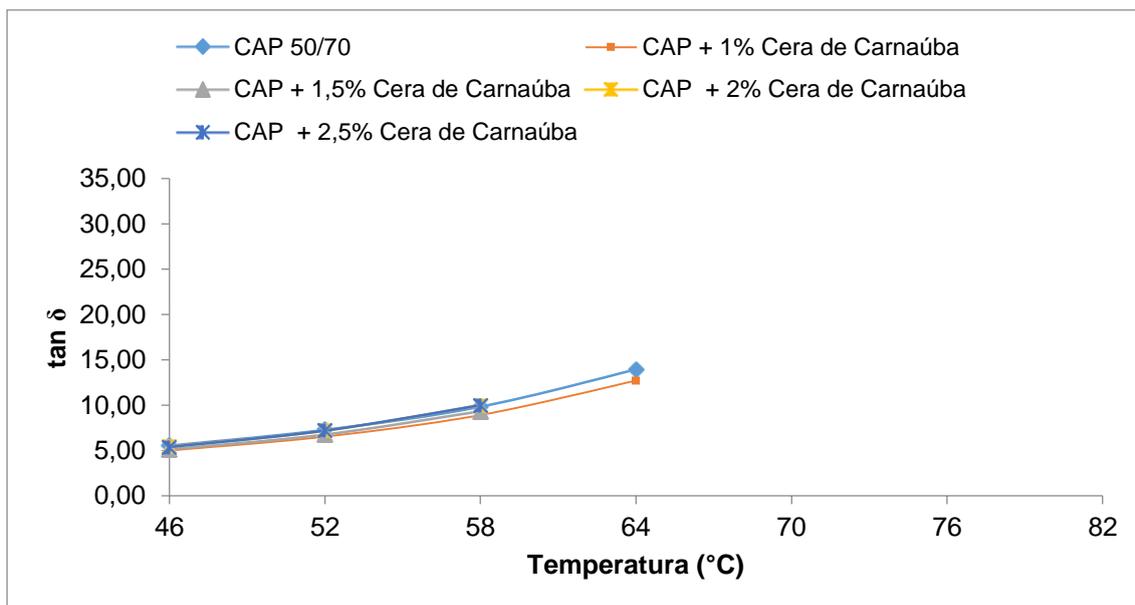


Figura 85 - Gráfico da variação da  $\tan \delta$  em função da temperatura após o RTFO- Cera de Carnaúba



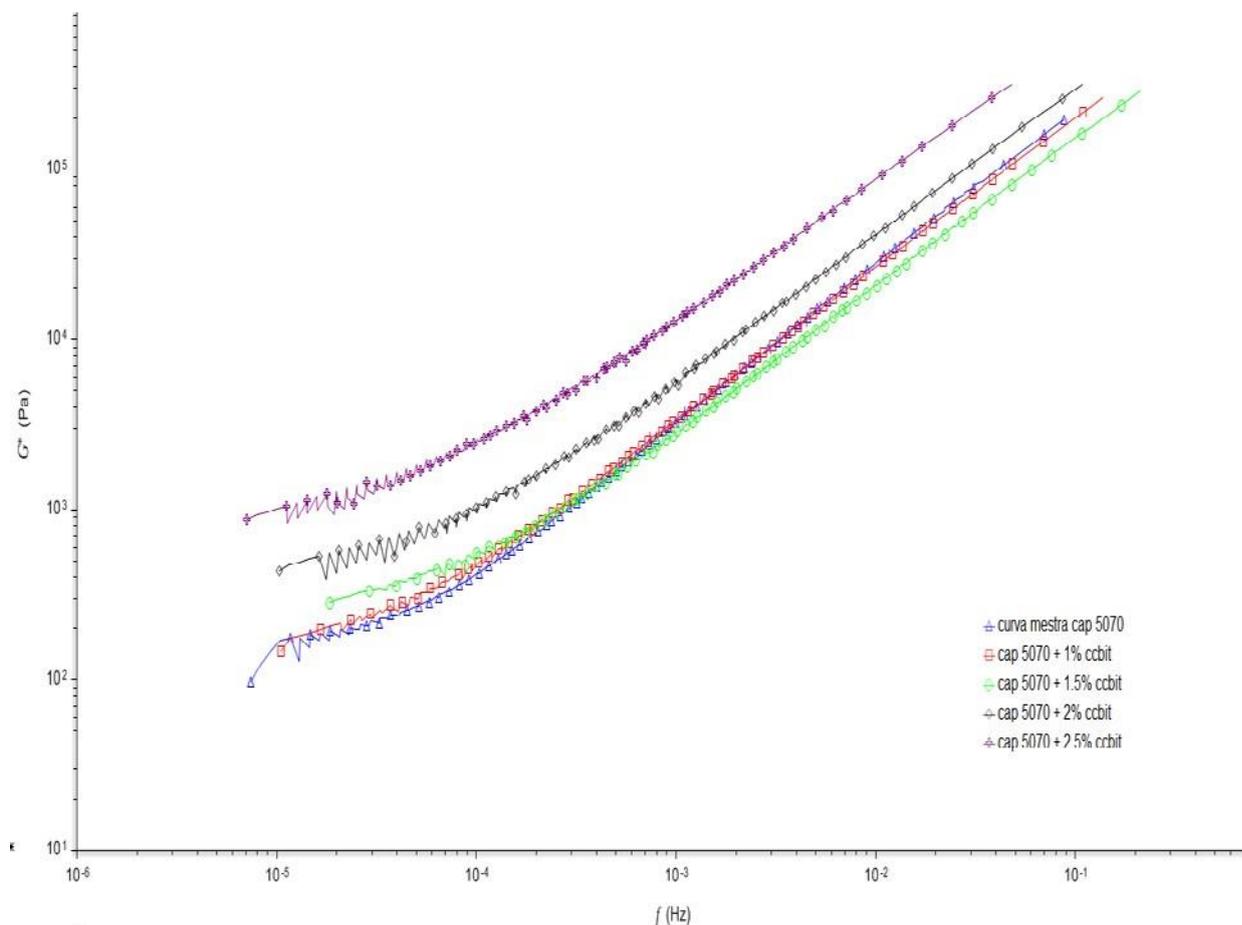
Pode-se verificar nos gráficos envolvendo os teores de cera de carnaúba que antes do RTFO todos os teores apresentam um valor de  $\tan \delta$  menor que o CAP puro. Entretanto, após a realização do ensaio de RTFO pode-se observar que apenas os teores de 1,0 e 1,5% de cera de carnaúba permaneceram com valores de  $\tan \delta$  abaixo do CAP puro. Os baixos valores do ângulo de fase das misturas com 1,0 e 1,5% indicam melhor recuperação elástica em relação ao CAP referência enquanto que os teores de 2,0 e 2,5% praticamente se igualam aos do CAP puro.

#### 4.1.10 Avaliação através das Curvas Mestre

A temperatura definida para o traçado da curva-mestre é de 25°C por ser essa temperatura considerada típica de uso no clima brasileiro.

Na Figura 86 são lançadas em gráficos “Curvas Mestre” obtidas para os CAPs Puro e Modificado utilizando frequências de 0,1 a 100 rad/s e temperaturas variando de 46 a 76°C, nas quais os valores de Módulo Complexo ( $G^*$ ) são relacionados em função da frequência utilizada com relação aos teores de CCBt utilizados nesta pesquisa.

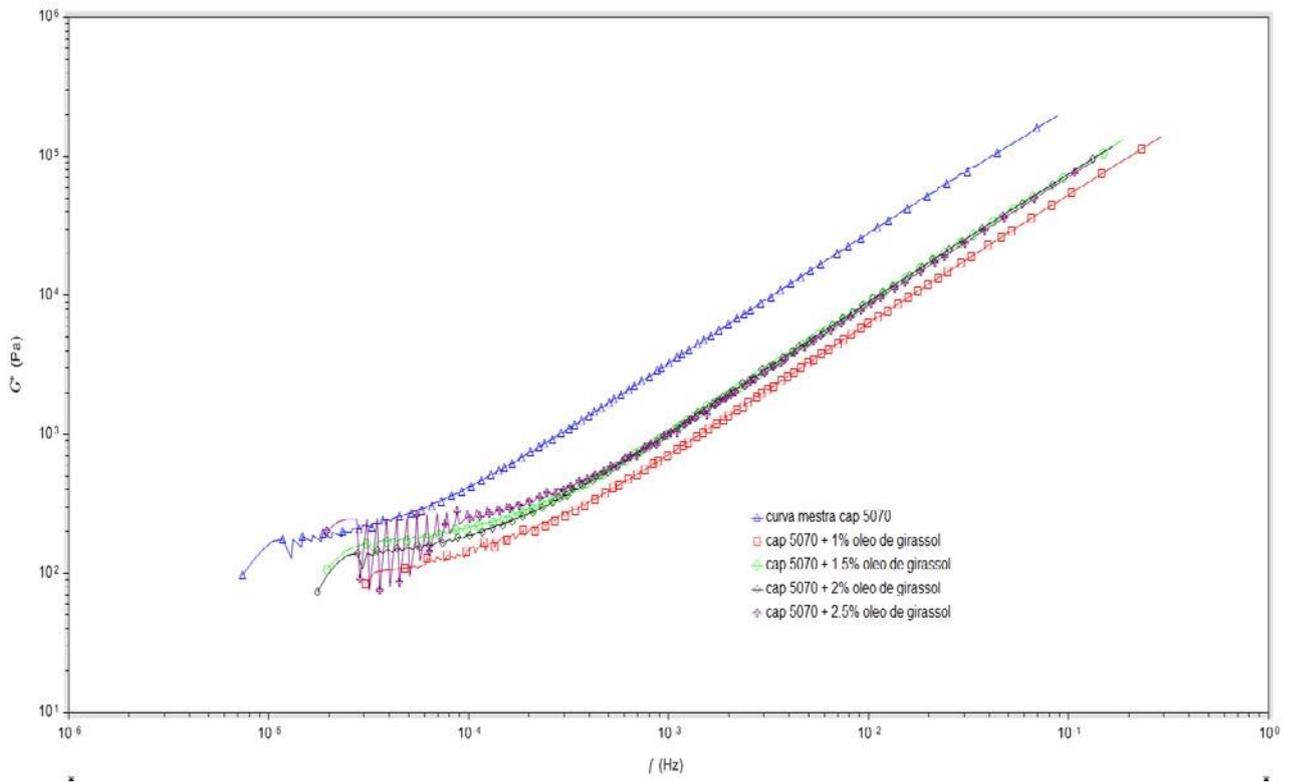
Figura 86 - Curva Mestre CCBit



Analisando a curva mestra referente ao aditivo CCBit e seus respectivos teores pode-se afirmar que os teores de 1,0 e 1,5% não foram eficazes com relação a alteração do comportamento do ligante asfáltico pois não demonstra aumento do Módulo Complexo quando comparado ao CAP puro. Entretanto, os teores de 2 e 2,5% apresentam um crescimento gradativo do Módulo complexo com o aumento da frequência, ou seja, a alteração proporcionada no ligante se mostra eficiente aumentando assim sua resistência.

Na Figura 87 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 com relação aos teores de óleo de girassol utilizados nesta pesquisa.

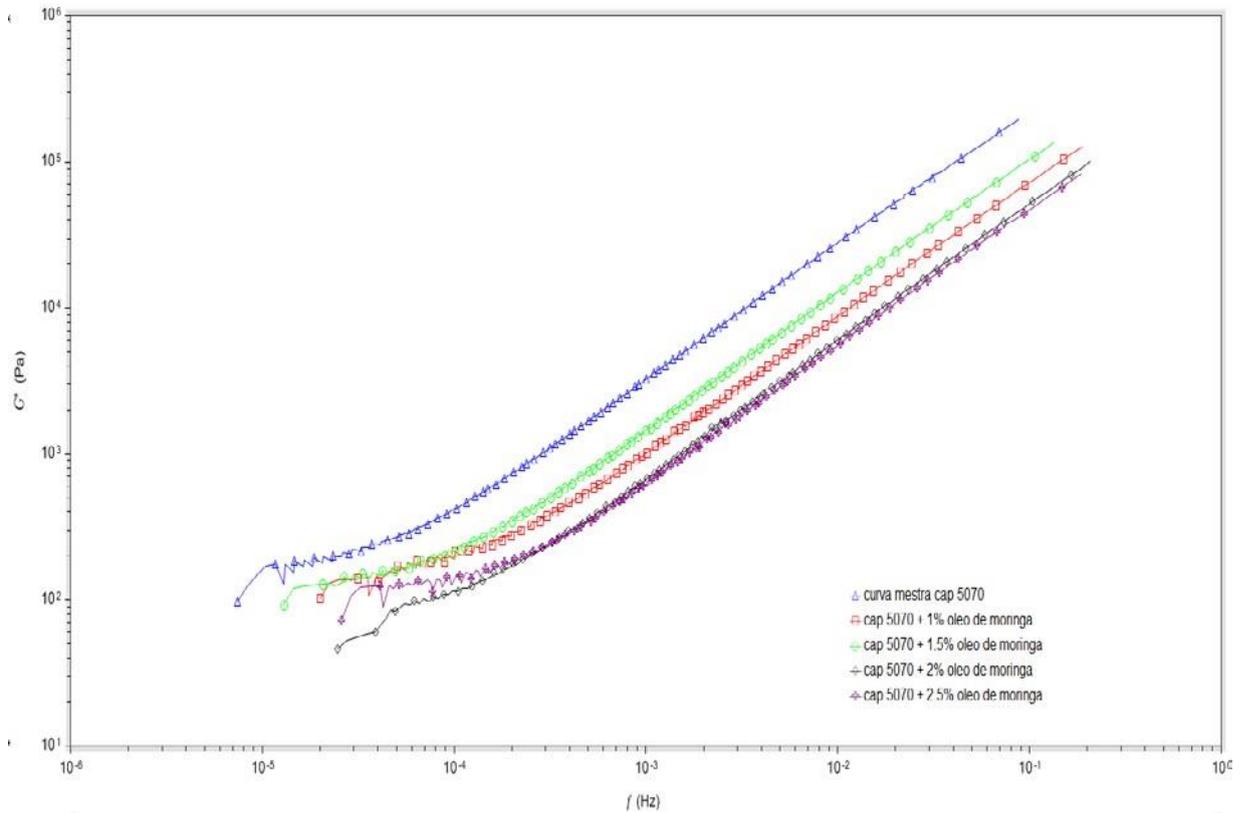
Figura 87 - Curva Mestre Óleo de Girassol



Observando-se a curva mestra referente ao óleo de girassol pode-se afirmar que após a adição de 1,5% em diante os resultados passam a ser similares como pode ser visto pela sobreposição das curvas. Pode-se afirmar que a adição do óleo de girassol é efetiva com relação a redução da temperatura de trabalhabilidade do ligante o que pode ser comprovado pela redução da viscosidade do mesmo após a adição do óleo de girassol. Verifica-se que ocorre uma perda de resistência pelo CAP que pode ser visto por sua redução no módulo complexo que também pode ser justificado pela redução da viscosidade.

Na Figura 88 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 com relação aos teores de óleo de moringa utilizados nesta pesquisa.

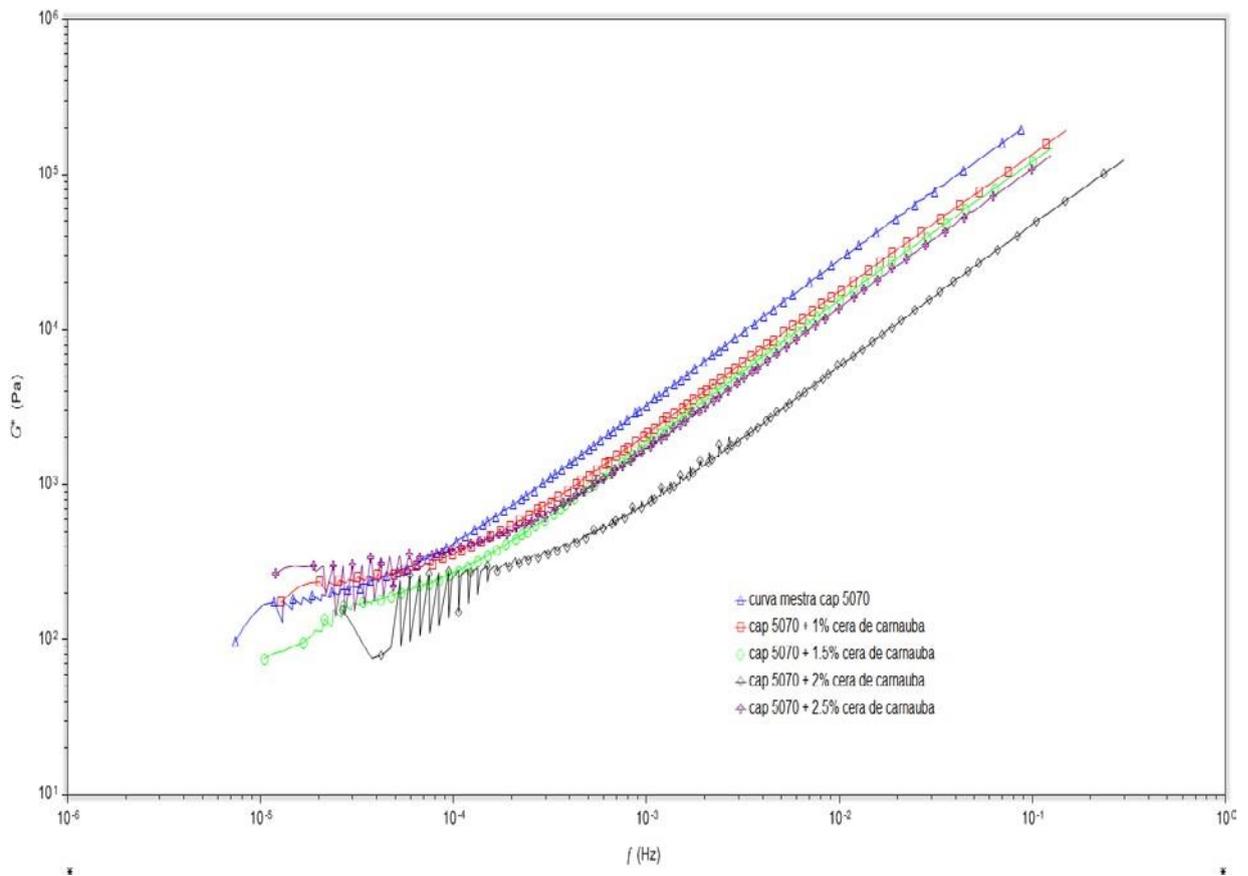
Figura 88 - Curva Mestre Óleo de Moringa



Assim como o óleo de girassol analisando a curva mestre do CAP+óleo de moringa verificou-se que a adição do óleo de moringa resultou numa redução do módulo complexo quando comparado ao CAP puro e se mostrou efetiva quanto a redução da temperatura de trabalhabilidade do CAP que também pode ser comprovado pela redução ocorrida na sua viscosidade. Também pode-se verificar que apesar de serem os mais efetivos na redução da temperatura praticamente não há diferença entre os de 2,0 e 2,5%, entretanto o teor de 2,5% possui uma maior susceptibilidade a variações térmicas que pode ser observado pela oscilação no começo de sua curva.

Na Figura 89 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 com relação aos teores de cera de carnaúba utilizados nesta pesquisa.

Figura 89 - Curva Mestre Cera de Carnaúba



Analisando a curva mestra relacionada a cera de carnaúba e seus respectivos teores pode-se observar uma redução de temperatura de trabalhabilidade em todos os teores utilizados principalmente no de 2,0%. Pode-se verificar uma redução no valor do módulo complexo, o que infere uma perda de resistência, que pode ser justificada pela redução da viscosidade que foi verificada nesta pesquisa. Pode-se observar também que os teores de 1,0; 1,5 e 2,5% apresentam comportamentos similares e destaca-se a alta susceptibilidade térmica nos teores de 2,0 e 2,5% que pode ser confirmado pelas oscilações na curva.

### 5.0 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais deste trabalho fornecem conhecimento do comportamento das misturas asfálticas mornas produzidas com a incorporação do CCBIt, óleo de girassol, óleo de moringa e cera de carnaúba em relação aos ensaios das propriedades reológicas do ligante asfáltico (Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade Rotacional, etc) e aos ensaios envolvendo as “propriedades reológicas especiais” (PG, MSCR, Curva Mestre) entre outras análises. Destacam-se as seguintes conclusões:

- **Em relação à penetração**

As misturas modificadas com CCBIt e com a cera de carnaúba apresentaram uma redução destes valores quando comparados ao CAP puro, indicando um aumento de rigidez e resistência. Enquanto que a adição dos óleos obtiveram resultados superiores ao CAP puro, indicando perda de rigidez do material e ganho de trabalhabilidade.

- **Em relação ao ponto de amolecimento**

Verificou-se que tanto o CCBIt quanto a cera de carnaúba obtiveram temperaturas acima do CAP puro, tal aumento pode ser interpretado como vantajoso tendo em vista que está diretamente ligado ao aumento da resistência do ligante asfáltico. Os óleos por sua vez sofrem uma redução na temperatura do ponto de amolecimento, redução essa que pode comprometer o comportamento das misturas quando empregadas em campo, tornando o CAP muito sensível às temperaturas ambiente, também implica na perda de resistência do CAP e ganho na sua trabalhabilidade, o que dependendo da situação pode ser a vantagem almejada.

- **Em relação à viscosidade rotacional**

Pode-se observar que todos os aditivos obtiveram êxito em reduzir a viscosidade quando comparados com o CAP puro o que implica uma redução das temperaturas de compactação e usinagem. Dentre os resultados destacam-se os óleos que obtiveram bons resultados donde o maior foi o óleo de moringa que conseguiu uma redução na temperatura de compactação, de 18,3°C para o teor de 2,5% porém reduz o seu desempenho.

- **Em relação à PG**

Observa-se que dentre os aditivos estudados, o CCBit se sobressai nesse ensaio pois não apenas igualou a temperatura com o CAP puro mas o ultrapassou proporcionando uma temperatura de aplicação maior que a do CAP puro. Os demais aditivos não obtiveram o mesmo êxito tendo os óleos uma redução da temperatura e a cera de carnaúba apenas igualou o valor do CAP puro.

- **Em relação ao MSCR**

Analisando os resultados observa-se, de modo geral que a adição dos modificadores ao CAP puro proporcionou um aumento nos valores de R do material. Observa-se que a adição do CCBit promoveu o incremento do percentual de recuperação do material de maneira significativa, o que demonstra um certo comportamento elástico do aditivo, o que pode ser classificado como uma ação benéfica do aditivo. Os outros aditivos não apresentaram uma recuperação significativa, conseqüentemente não causando nenhum benefício nesse critério. Destaca-se que apenas o teor de 1% dos aditivos, com exceção da cera de carnaúba, obtiveram classificação de tráfego pesado de acordo com a FHWA superando assim a classificação do CAP puro, entretanto, tais valores foram encontrados para a PG de 58°C que se encontra 6°C abaixo do CAP puro, ou seja, tais valores podem não ser satisfatórios se utilizados a uma temperatura maior que 58°C.

- **Em relação às curvas mestre**

Para o CCBit, nos teores de 2 e 2,5% ocorre um aumento gradativo do Módulo complexo à medida que a frequência aumenta, ou seja, a alteração proporcionada no ligante se mostra eficiente aumentando assim sua resistência. Para os óleos verifica-se que ocorre uma perda de resistência pelo CAP, que pode ser vista por sua redução no módulo complexo que também pode ser justificado pela redução da viscosidade. Para a cera de carnaúba, pode-se verificar uma redução no valor do módulo complexo, o que infere uma perda de resistência que pode ser justificada bem como a redução da temperatura pela redução da viscosidade que foi verificada nesta pesquisa.

- **Considerações finais**

Fazendo uma análise geral pode-se afirmar que o teor ideal para utilização do CCbit está entre 2 e 2,5% tendo em vista que estes teores apresentaram bons resultados em termos de resistência ao envelhecimento e uma redução média de 5°C na temperatura de usinagem e compactação. Para os óleos deve-se considerar o teor de 1,0%, pois apresentam uma redução considerável na temperatura de usinagem e compactação sem comprometer muito o seu desempenho. No caso da cera de carnaúba o teor de 2,0% seria o ideal pois além de apresentar uma melhor trabalhabilidade apresentando uma redução média de 8,5°C nas temperaturas de usinagem e compactação, ele também aumentou a resistência do CAP ao envelhecimento.

- **Sugestões para pesquisas futuras**

- Construir trechos experimentais utilizando os aditivos mencionados nesta pesquisa para monitoramento de sua resposta ao tráfego e determinação de sua vida útil.
- Estudar o comportamento mecânico das misturas utilizando óleo de girassol e óleo de moringa para determinar suas capacidades de aplicação.
- Verificar o custo benefício das misturas desenvolvidas nesta pesquisa visando descobrir a viabilidade financeira das mesmas.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO, 2007, *Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 283, Washington, D. C.
- ABNT NBR 15184 (2004) Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP
- ABNT, 2000, Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento Método do anel e bola. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 6560.
- ANDERSON, M.; D'ANGELO, J.; WALKER, D. MSCR: A better tool for characterizing high temperature performance properties. *EUA. Asphalt*, v. 25, n.2, p. 15-16, 2010.
- ASTM D6373 – 15 2008 Specification for Performance Graded Asphalt Binder. 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 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.
- ABDULKARIM, S.M., LONG, K., LAI, O.M., et al. “Frying quality and stability of high-oleic Moringa oleifera seed oil in comparison with other vegetable oils”, *Food Chemistry*, v.105, pp. 1382–1389, 2007.
- ABRAHAM, HERBERT, 1938. *Asphalts and Allied Substances: Their Occurrence, Modes of Production, Uses in the Arts, and Methods of Testing* (4th ed.). New York: D. Van Nostrand Co. Retrieved 16 November 2009. Full text at Internet Archive (archive.org)

- BARTHEL, W.; MARCHAND, J.-P.; DEVIVERE, M., Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite. In: Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 2004.
- BECHARA, M. F., FAXINA, A. L., FABBRI, G. T. P., LEITE, F. M., SOARES, J. B., SOARE, S. A. “Avaliação dos Efeitos dos Envelhecimentos a Curto e a Longo Prazos por meio de Curvas Mestre”. In: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP no 19º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, Jun, 2008.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B., Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- BUDNY, J. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas morna, 2012. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BUTTON, J. W.; ESTAKHRI, C.; WIMSATT, A., A Synthesis of Warm-Mix Asphalt, Texas A&M University System, EUA, 2007.
- CAVALCANTI, L. S., “Efeito de alguns modificadores de ligantes na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas”. 2010. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CHEN, M.; LENG, B.; WU, S.; SANG, Y. Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. Construction and Building Materials. China. n. 66, p. 286-298, 2014b.
- CHOWDHURY, A.; BUTTON, J.W., A Review of Warm Mix Asphalt, Texas A&M University System, EUA, 2008.
- D’ALVA, O. A., O Extrativismo da Cera de Carnaúba no Ceará, 193p. Dissertação de D’ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. Warm-mix asphalt: European practice. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008.

- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 131/2010. Determinação do Ponto de Amolecimento- método Anel e Bola. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 155/2010. Determinação da Penetração . Rio de Janeiro, 1998.
- DOMINGOS, M. D. I, Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos. Dissertação de mestrado- Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2011.
- DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com copolímero SBR e ácido polifosfórico. Transportes. São Paulo. v. 23, n. 2, p. 56-64, 2015
- FAXINA, A. L. Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha. 2006. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- FILHO, N.W. Avaliação da Influência da redução das Temperaturas de Usinagem e de Compactação no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas. 2013. Dissertação, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil.
- HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of Aspha-Min® zeolite for use in warm mix asphalt. Report 05-04. Auburn: NCAT, 2005a.
- HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of Evotherm® for use in warm mix asphalt. Report 06-02. Auburn: NCAT, 2006.
- HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt. Report 05-06. Auburn: NCAT, 2005b.
- HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Field performance of warm mix asphalt. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 87., 2008, Washington. Anais... Washington: TRB, 2008.

- KRISTJANSBOTTIR, O. Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving. 2006. 92 p. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – University of Washington. Washington, USA.
- LIMA, A. T., 2003, Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente, Dissertação de Msc. UFC, Fortaleza, Brasil. Mestrado – Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2004.
- LUCENA, L. C. F. L.; SILVEIRA, I. V.; COSTA, D. B. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. Revista Matéria, Brasil, v. 21, n. 01, p. 72-82, 2016.
- MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M., CONSTANTINO, R. S., Princípios de Projetos e análise Superpave de Misturas Asfálticas. In: IBP, Rio de Janeiro, RJ, 1996.
- MOTTA, R. S. Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético, 2011. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.
- NEWCOMB, D. An introduction to warm-mix asphalt, 2006. National Asphalt Pavement Association, Lanham.
- OLIVEIRA, R. B. ESTUDO SOBRE O EFEITO DO CCBIT-113AD NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS, 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil.
- OLIVEIRA, Z.L. Avaliação do uso da Moringa oleífera Lam para fitorremediação e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Dissertação de M.Sc. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- OTTO, G. G., Misturas asfálticas mornas: Verificação da fadiga e do módulo complexo. 179p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2009.
- Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption. Transportation Research Record, No.2040. TRB, 2007.

- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2007.
- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; CREWS, E. Field performance of warm mix asphalt at the NCAT test track. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 86., 2007,
- ROSA JÚNIOR, J. M.; Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (cap50/70) modificado com polímeros funcionalizados, 2015. Dissertação de mestrado-Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.
- RÜHL, R. Lower temperatures: The best for asphalt, bitumen, environment and health and safety. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 4., 2008, Copenhagen. Anais... 2008.
- SOARES, F. A. A, Imagens fotográficas realizadas às margens da BR116, Km73, em 11/06/2013.
- SOUSA FILHO, A.C., Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas, 85p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2006.
- SOUZA, L. J. S. ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO MODIFICADO COM ÓLEO DE MAMONA. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, Brasil, 2012.
-