



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

**EFEITO DA ADIÇÃO DO ÓLEO DE ALGODÃO REFINADO NAS  
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE  
PETRÓLEO**

**IVNA DE SOUSA DANTAS**

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Co-orientador: MSc. Daniel Beserra Costa

Campina Grande-PB, Março de 2018.

**EFEITO DA ADIÇÃO DO ÓLEO DE ALGODÃO REFINADO NAS  
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE  
PETRÓLEO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, Março de 2018.

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

**IVNA DE SOUSA DANTAS**

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

Orientador: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Março/2018

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus. Pela vida, pela proteção e sabedoria, por estar concluindo meu curso, pela inspiração e paz.

Aos meus pais Jean e Ângela. Pelo amor incondicional, por tudo o que me deram, pelo exemplo e incentivo, sempre.

Aos meus irmãos, Igor e Fernanda, pelo apoio, companheirismo e amor.

A minha orientadora, Prof. Dra. Ana Maria G. D. Mendonça, pelas portas abertas e por sempre se dispor a me ajudar no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pela oportunidade e pela confiança depositada.

Ao meu co-orientador e amigo, Daniel Beserra, pela sua paciência e disponibilidade em me ajudar a executar os ensaios, sua ajuda foi fundamental para que eu pudesse produzir este trabalho.

A Ablenya e Christian por constante apoio e auxílio técnico em fases experimentais e análise da pesquisa deste projeto.

Aos amigos de curso Laís Loureiro, Lucas Toscano, Rebecca Andrade, Werley Targino, Hicaro Torres, Ablenya Barros, Brenda Oliveira, Giordano Ugulino, Luã Pedro, Paulo Henrique e Christian Ziegler. Esta caminhada foi muito mais leve por ter vocês ao meu lado.

Aos meus amigos de vida Bruna, Mariana, Vanessa e Joab, que estão sempre presentes e me incentivam a alcançar os meus objetivos.

À equipe do LEP pela enorme disponibilidade da infraestrutura física e instrumental.

A todos os professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC – UFCG) não só por todo conhecimento, mas também por toda a contribuição e lições de vida e humanidade.

A todos os meus amigos e familiares. Obrigada pela paciência nestes anos quando minha presença foi mais rara e por torcerem sempre por esta conquista.

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Jean e Ângela  
pelo amor incondicional, apoio,  
compreensão e por terem sempre  
me motivado.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Investimento Público Federal Aplicado em Transportes. ....	16
Figura 2: Avaliação das rodovias pesquisadas. ....	17
Figura 3: Classificação de misturas asfálticas em função da temperatura de produção. ....	26
Figura 4: Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo e durante vários anos de serviço. ....	31
Figura 5: Comportamento dos materiais (a) elástico, (b) viscoso e (c) viscoelástico. ....	34
Figura 6: Agitador mecânico FISATOM, modelo 722D. ....	39
Figura 7: Aparelho utilizado para realização do ensaio de penetração. ....	41
Figura 8: Conjunto anel e bola. ....	42
Figura 9: Viscosímetro rotacional Brookfield. ....	43
Figura 10: Estufa de filme fino rotativo utilizada para realizar o envelhecimento a curto prazo. ....	44
Figura 11: Reômetro de cisalhamento dinâmico. ....	44
Figura 12: Representação das tensões e deformações durante a realização do ensaio MSCR. ....	46
Figura 13: Localização das deformações $\epsilon_o$ , $\epsilon_c$ e $\epsilon_r$ em um ciclo de fluência e recuperação do ensaio MSCR. ....	47
Figura 14: Viscosidade rotacional nas referentes temperaturas após o envelhecimento a curto prazo RTFO. ....	54
Figura 15: Parâmetro $G^*/\text{Sen}\delta$ versus temperatura antes do envelhecimento a curto prazo. ....	55
Figura 16: Parâmetro $G^*/\text{Sen}\delta$ versus temperatura após o envelhecimento a curto prazo. ....	56
Figura 17: Grau de desempenho do ligante asfáltico modificado com o óleo de algodão refinado. ....	57
Figura 18: Grau de desempenho contínuo do ligante asfáltico modificado com o óleo de algodão bruto antes e após o envelhecimento a curto prazo RTFO. ....	57
Figura 19: PG tradicional e contínuo do ligante asfáltico modificado com o óleo de algodão refinado. ....	58
Figura 20: Compliância não-recuperável dos ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado, a 100 Pa. ....	59
Figura 21: Compliância não-recuperável dos ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado, a 3200 Pa. ....	59

## LISTA DE TABELA

Tabela 1: Classificação dos Cimentos asfálticos de petróleo segundo a norma regulamentadora 03/2005 da ANP. ....	21
Tabela 2: Algumas causas e tipos de deformação permanente. ....	29
Tabela 3: Ensaio de caracterização reológicas avançadas dos ligantes asfálticos. ....	45
Tabela 4: Classificação quanto ao valor de $J_{nr}$ (AASHTOO M320). ....	48
Tabela 5: Variação em massa após ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFO) ....	48
Tabela 6: Ensaio de penetração retida. ....	49
Tabela 7: Ensaio de aumento do ponto de amolecimento - Método do anel e bola ....	50
Tabela 8: Ensaio de penetração retida. ....	51
Tabela 9: Temperatura ideal para realização da Mistura Asfáltica após a adição do Óleo de Algodão Refinado. ....	53
Tabela 10: Viscosidade rotacional para os ligantes após o envelhecimento a curto prazo RTFO. ....	54
Tabela 11: Classificação do ligante pelo nível de tráfego. ....	60
Tabela 12: Percentual de recuperação (%R) para a tensão de 3200 Pa e diferença porcentual de $J_{nr}$ a 100 Pa e a 3200 Pa. ....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASTHO Officials	American Association Of State Highway And Transportation
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Material
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional de Trânsito
cP	centipoise
DNC	Departamento Nacional de Combustíveis
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
FHWA	Federal Highway Administration
IBP	Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos
IGG	Índice de Gravidade Global
MSCR	Fluência e recuperação sob tensão múltipla
NBR	Norma Brasileira Registrada
Pa.s	Pascal Segundo
PG	Grau de desempenho
PIB	Produto Interno Bruto
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
PPR	Porcentagem de Penetração Retida
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SHRP	Strategic Highway Research Program
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## RESUMO

A necessidade de um desenvolvimento sustentável e uma maior eficiência energética na área da pavimentação tem impulsionado a busca por temperaturas de usinagem e aplicação das misturas asfálticas inferiores às convencionalmente utilizadas. Objetivando a diminuição na temperatura pavimentação e menor consumo energético, busca-se substituir misturas a quente por misturas mornas. A utilização de misturas mornas propõe manter e até melhorar a qualidade dos pavimentos por meio do uso de menores temperaturas de execução. Surgem então, novas alternativas para atingir esse objetivo. O uso de aditivos oleicos como modificadores do ligante asfáltico pode ser um agente viável e favorável ao meio ambiente devido à possibilidade de promover reduções na viscosidade do ligante e uma diminuição na temperatura de usinagem e compactação. Desta forma, esta pesquisa visa avaliar as características reológicas básicas e avançadas da adição do óleo de algodão refinado ao ligante asfáltico nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. As amostras foram analisadas por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (RTFO), Performance Grade (PG), PG contínuo e Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). Os resultados demonstraram a que a adição do óleo nos teores estudados possibilitou uma redução das temperaturas de produção das misturas asfálticas em 10 °C para o maior teor de óleo adicionado ao ligante asfáltico. Após análise de todos os resultados determinou-se que o ligante com teor de 4% foi o teor ótimo de óleo de algodão refinado, oferecendo uma diminuição da temperatura em 6 °C e enquadrando-se como mistura morna.

**Palavras-chave:** Misturas mornas; Reologia; Aditivo verde.

## ABSTRACT

The appeal for a sustainable development and greater energy efficiency in the area of asphalt paving has led to the search for lower temperatures of mixing and application of asphalt mixtures than those usually applied. Aiming at decreasing the pavement production temperature and the energy consumption, replacing the hot mix asphalt by warm-mix asphalt (WMA) is desirable. The utilisation of WMA poses to maintain and even enhance the pavement quality by using lower temperatures of execution. Therefore, new alternatives arise to achieve the objective. The use of oleic additives as asphalt binders modifiers can be a viable tool and beneficial to the environment as it can change its viscosity-temperature behaviour. Therefore, this research aims to evaluate the basic and advanced rheological characteristics of the refined cotton oil addition to the asphalt binder in the contents of 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 6%. The samples were analysed by the tests of penetration, softening point, rotational viscosity, Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), Performance Grade (PG), continuous PG and Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). The results showed that the oil addition in the studied contents allowed a reduction up to 10 °C in the production temperatures of the asphalt mixture in relation the non-modified binder. After the analyses of all results, it was determined that 4% was the optimum content of refined cottonseed oil addition, offering a decrease of 6 °C, allowing to classify the mixture as WMA.

**Keywords:** Warm-mix asphalt; Rheology; Green Additive.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivos .....	15
1.1.1 Objetivo Geral .....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 Situação atual da pavimentação no Brasil .....	16
2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) .....	19
2.3 Ligantes asfálticos modificados .....	22
2.4 Misturas Asfálticas Mornas .....	24
2.5 Principais Defeitos dos Pavimentos e a Influência dos Ligantes Asfálticos ...	26
2.6 Envelhecimento dos ligantes asfálticos.....	30
2.7 Reologia dos Ligantes Asfálticos .....	32
2.8 Óleo de Algodão .....	34
<b>3. MATERIAIS .....</b>	<b>38</b>
3.1 Ligante asfáltico de petróleo .....	38
3.2 Óleo de algodão refinado.....	38
<b>4. MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
4.1 Produção da mistura do ligante asfáltico com a adição do óleo .....	39
4.2 Caracterização Reológica Básica dos Ligantes .....	40
4.2.1 Ensaio de Penetração.....	40
4.2.2 Ponto de Amolecimento .....	41
4.2.3 Viscosidade Rotacional .....	42
4.2.4 Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO .....	43
4.3 Caracterização Reológica Avançada dos Ligantes .....	44
4.3.1 Grau de Desempenho (PG) .....	45
4.3.2 Grau de Desempenho Contínuo .....	46
4.3.3 Ensaio de Fluência e Recuperação Sob Tensão Múltipla (MSCR).....	46
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
5.1 Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO.....	48
5.2 Ensaio de Penetração .....	49
5.3 Ponto de Amolecimento.....	50
5.4 Viscosidade Rotacional .....	51
5.5 Grau de Desempenho (PG) .....	55

5.6	Grau de desempenho contínuo.....	57
5.7	Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR).....	59
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>62</b>
6.1	Conclusões.....	62
6.2	Sugestões para futuras pesquisas.....	63
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>64</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo da pavimentação rodoviária vem adquirindo importância crescente ao longo dos últimos 60 anos no Brasil. Isso se dá devido à participação fundamental da malha rodoviária brasileira no transporte de cargas e de pessoas e da constante necessidade de melhoria da qualidade desta malha e de sua ampliação (NOGUEIRA, 2008).

Ao mesmo tempo em que a pavimentação de rodovias oferece benefícios ao usuário, durante a usinagem do ligante asfáltico e aplicação da mistura, em campo, ocorre elevado consumo energético e emissões de gases poluentes no meio ambiente. Neste cenário, a indústria da pavimentação tem pesquisado formas de minimizar impactos por meio do uso de misturas asfálticas mornas em substituição as tradicionalmente utilizadas em pavimentos flexíveis (LUCENA et al., 2016).

Buscando diminuir essas temperaturas, surgem meios que facilitam a obtenção deste objetivo. Segundo Lucena et al. (2016), destacam-se a adição de aditivos orgânicos ou químicos, emulsões e ligantes sintéticos, que podem diminuir consideravelmente as temperaturas no processo de operação.

Souza (2012) destaca que recentemente há uma busca crescente por produtos que visem a eficiência e que causem danos mínimos ou nulo ao meio ambiente, portanto, surgem junto a isso pesquisas sobre produtos oriundos de fontes renováveis e cuja exploração gere benefícios à população que os explora.

Motta (2011) destaca as seguintes vantagens na utilização de misturas mornas:

- (i) Menor emissão de poluentes atmosféricos;
- (ii) Melhoria do ambiente de trabalho na pavimentação (redução de fumos e odores de asfalto);
- (iii) Diminuição do consumo energético (menor consumo de combustível);

- (iv) Possível redução do envelhecimento do ligante asfáltico durante a usinagem (refletindo em maior flexibilidade e durabilidade em campo);
- (v) Menor dificuldade de aplicação em épocas ou locais de clima muito frio ou quando se tem que percorrer longas distâncias entre a usina e o campo (devido ao menor gradiente térmico em relação a misturas convencionais);
- (vi) Uso de maiores quantidades de mistura asfáltica fresada em reciclagem (devido à menor dificuldade de usinagem quanto à temperatura).

Segundo Putti et. al (2012), em relação a produção industrial, o óleo de algodão é o óleo vegetal mais antigo e com consumo em grande escala no Brasil, porém esse consumo foi reduzido com o aumento da produção da soja. Um fator positivo é o fato desse óleo já ser produzido para outros fins, torna extremamente baixo o custo da obtenção, o que caracteriza como uma vantagem importante.

Por possuir um maior ponto de fusão (comparando-se a outros óleos), o óleo de algodão aguenta maiores temperaturas sem que haja perda em sua qualidade e alterações significativas em suas propriedades (Silva, 2017).

Souza (2012) destaca que no Brasil, os estudos e aplicações destes tipos de tecnologias “verdes” iniciaram-se junto aos institutos de pesquisas, onde são desenvolvidas, em sua maioria, nos laboratórios com novas tecnologias e com fins acadêmicos.

Esta pesquisa visou avaliar o efeito da adição do óleo de algodão refinado ao ligante asfáltico, e paralelamente ao estudo de Ziegler (2017), avaliar este efeito também nas propriedades reológicas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Esta pesquisa visa avaliar as características reológicas básicas e avançadas da adição do óleo de algodão refinado ao CAP 50/70 como um aditivo verde nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6% a fim de se obter propriedades de mistura morna

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as propriedades do ligante modificado com os teores de óleo de algodão refinado antes e depois de submetido ao procedimento de envelhecimento a curto prazo através dos ensaios básicos de reologia (perda de massa, ponto de amolecimento e penetração);
- Determinar a temperatura ideal para compactação da mistura asfáltica através do ensaio de viscosidade rotacional;
- Determinar as características reológicas avançadas do ligante modificado com o óleo de algodão refinado utilizando o reômetro (viscosidade rotacional, grau de desempenho, grau de desempenho contínuo e fluência e recuperação sob tensão múltipla);
- Determinar o teor ideal de adição do óleo de algodão refinado que mantenha ou melhore as características reológicas do ligante asfáltico.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

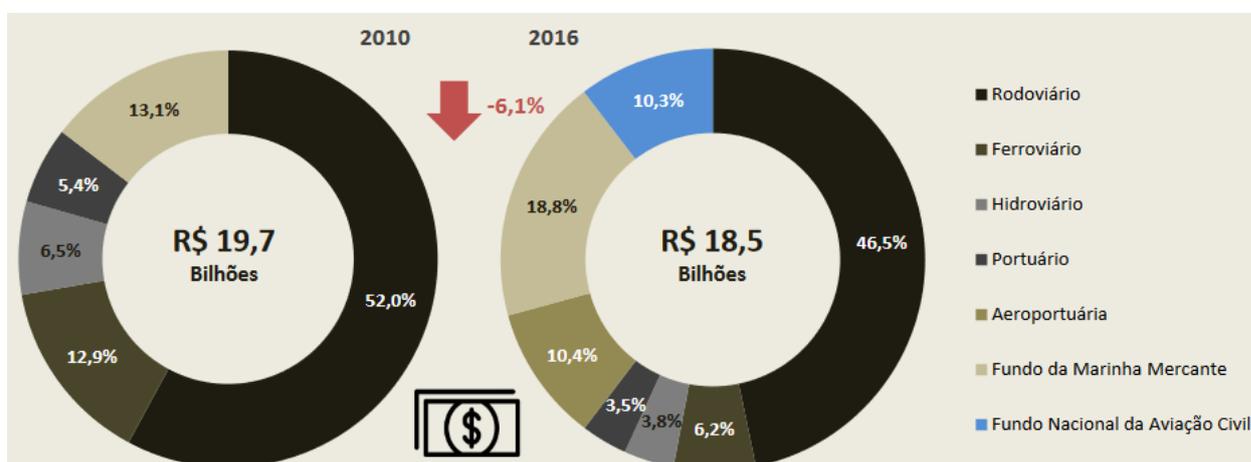
### 2.1 Situação atual da pavimentação no Brasil

Analisando o sistema de transportes brasileiros, nota-se um grande destaque para o modal terrestre. Esses sistemas são de extrema necessidade para as movimentações e deslocamentos de cargas e passageiros e são elementos fundamentais na caracterização econômica e social de um país.

O fato de apresentar uma forte demanda rodoviária faz com que a infraestrutura das estradas exerça um papel fundamental na mobilidade do Brasil, fazendo-se necessário que essa seja amplamente ofertada e em boas condições de uso.

Segundo o Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MTPA) e a Empresa de Planejamento e Logística S.A (EPL) (2016), Figura 1, houve um decréscimo no investimento público federal aplicado em transportes de 6,1% de 2010 para 2016, porém o setor rodoviário mantém-se, ainda, como setor de maior investimento.

**Figura 1:** Investimento Público Federal Aplicado em Transportes.



**FONTE:** MTPA e EPL (2016).

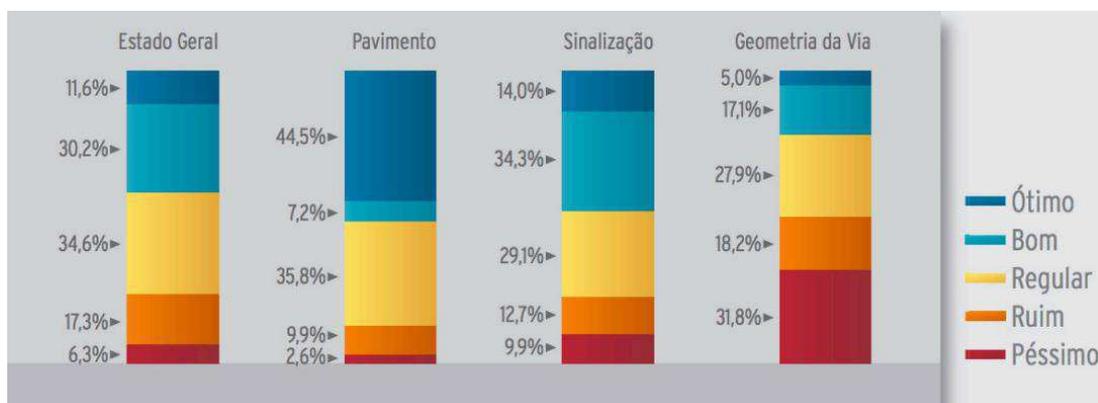
O fato de haver um maior investimento no modal rodoviário pode ser explicado não necessariamente por esse ser o modal mais utilizado, mas principalmente por exigir uma menor aplicação de capitais quando comparado aos demais.

Dados fornecidos pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) (2017) indicavam que em 2015 o trecho de malha rodoviária brasileira totalizava em uma extensão de 1.720.643,2 quilômetros, incluindo trechos com pavimentos e sem pavimentação. Desse total, 12,2% são pavimentados, sendo que 5,3% da malha pavimentada é de pista dupla e 0,7% estava em obras de duplicação. Em 2001 9,8% eram pavimentados, 3,4% da malha pavimentada era de pista dupla enquanto que 0,9% estava em obras de duplicação.

Analisando esses dados, nota-se que em 14 anos houve um crescimento na execução da pavimentação das malhas rodoviárias brasileiras (cerca de 40.000 quilômetros) ao comparar a extensão da malha pavimentada de 2001 com a de 2015, entretanto, um crescimento de forma lenta.

Ainda observando dados disponibilizados pela CNT (2017), Figura 2, percebe-se que 58,2% das rodovias avaliadas apresentam algum tipo de problema no estado geral. Dentre esses problemas, 48,3% apresentam problemas no pavimento, 51,7% apresentam deficiência na sinalização e 77,9% têm falhas na geometria.

**Figura 2:** Avaliação das rodovias pesquisadas.



**FONTE:** MTPA e EPL (2016).

\*a pesquisa avalia toda a malha federal pavimentada e os principais trechos estaduais também pavimentados

A qualidade do serviço executado nas vias rodoviárias e o crescimento da sua malha, no geral, não acompanham a demanda necessária para atender as necessidades de transporte de mercadorias e deslocamento de pessoas. Sendo possível verificar que apesar de haver crescimento da frota de veículos,

as rodovias, no geral, ainda apresentam inúmeros problemas, o que acarreta riscos de segurança para os usuários e constantes dispêndios com reparos e manutenções.

Grande parte de gastos públicos com rodovias são empregados em pavimentos. Considerando-se os custos para os usuários (consumo de combustível, desgaste de pneus e equipamentos), da ordem de 10 vezes maiores que os custos para os organismos rodoviários (construção, manutenção e restauração), tem-se que os custos totais da modalidade rodoviária podem representar de 2 a 17% do PIB de um país.

Avaliando-se esses números, nota-se que os mesmos indicam que o Brasil ainda precisa investir na primeira pavimentação asfáltica de suas malhas federais. A sociedade civil, acadêmica, industrial, empresarial e governamental deve ter conhecimento sobre o processo de deterioração das vias para que haja propostas de recuperação das mesmas a fim de garantir um fluxo contínuo e segurança aos usuários.

Uma adequada infraestrutura viária com revestimento asfáltico além de proporcionar benefícios diretos aos usuários com a melhoria dos níveis de conforto e segurança, e ainda a redução dos custos operacionais dos veículos, incrementa o progresso socioeconômico do país. O que influencia positivamente na qualidade de vida, estruturação espacial das comunidades, disponibilidade de transporte coletivo, promovendo o escoamento da safra agrícola e incremento às riquezas nacionais.

De acordo com Bernucci et al. (2008), os gastos com reconstrução e manutenção precoce dos pavimentos brasileiros são inaceitáveis uma vez que há disposição de equipamentos de laboratório e de campo que permite um melhor entendimento dos materiais e de métodos de projeto teórico-empíricos. A existência de uma infraestrutura laboratorial e a formação de recursos humanos de alto nível na área torna possível a investigação de materiais alternativos e novas tecnologias para as camadas do pavimento.

## **2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

Segundo Bernucci et al. (2008), o asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. No Brasil cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico. O asfalto utilizado na pavimentação tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo.

O Cimento Asfáltico de Petróleo é o asfalto obtido especialmente para apresentar as qualidades e consistências próprias para o uso direto na construção de pavimentos (DNIT, 2006).

O CAP é oriundo do processo de refinamento do petróleo ou do asfalto natural encontrado em jazidas. É um material com durabilidade elevada, alta flexibilidade e é bastante resistente à ação de ácidos, sais e álcalis – além de possuir propriedades de impermeabilização e boa aderência aos agregados. É um material complexo que apresenta um comportamento viscoso, caracterizado pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga, e susceptibilidade térmica, caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura (ROBERTS, 1998).

De acordo com Félix (2009), somente sob condições extremas o CAP se comporta como um sólido elástico (baixa temperatura e grande tempo de carregamento) ou como líquido viscoso (alta temperatura e grande tempo de carregamento). A sua cor característica é negra ou marrom escuro e esse fato deve-se à elevada quantidade de betume em sua composição.

Atualmente predomina-se o CAP obtido através do refinamento de petróleo, substituindo o alcatrão cuja obtenção era feita através do processo de destilação ou queima do carvão.

O CAP é aplicado em processos a quente, porém com uma limitação em sua temperatura, não ultrapassando 177°C, evitando que ocorra oxidação e craqueamento térmico do ligante.

A temperatura ideal de emprego e aplicação será determinada pela relação viscosidade/temperatura, a fim de se obter a melhor consistência para uma melhor execução.

Pereira (2016) destaca que as propriedades do CAP dependem da fonte e do processo de refino que o originou. O conhecimento da química do CAP é vital para o esclarecimento de processos que ocorrem na pavimentação.

O CAP é composto basicamente por duas frações, os maltenos - constituídos pelos compostos saturados, aromáticos e resinas, que apresentam baixa polaridade e os asfaltenos - que constitui a fração mais pesada e polar do ligante asfáltico

A consistência pode ser influenciada pela quantidade de asfalto e malteno, por exemplo. Se apresentando em pequenas quantidades, acarretará na suscetibilidade à temperatura e problemas com deformações plásticas. Já se apresentando de forma excessiva, causará uma perda de elasticidade, originando fissuras no CAP.

Segundo Balbo (2007), o CAP é um ligante popular na engenharia civil devido ao fato de possuir boa aderência com muitos agregados e devido as suas propriedades, dentre elas a capacidade de impermeabilização.

A Norma DNIT 095/2006 – EM – Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de material, foi elaborada tendo por base o Anexo I – Regulamento Técnico nº 3/2005, da Resolução ANP nº 19, de 11/07/2005 e está baseada na Norma DNIT 001/2002-PRO. De acordo com essa norma podemos obter a classificação do CAP (Tabela 1) que é feito através do ensaio de penetração, no qual a consistência é medida em décimos de milímetros, quanto menor o valor, maior será a consistência do CAP. Outros ensaios complementam classificações para o CAP, sendo eles: ensaio de ponto de amolecimento, de viscosidade, ponto de fulgor, ductilidade e o efeito do envelhecimento em curto prazo.

Ainda de acordo com essa norma, a classificação do CAP é dada por: CAP 30/45 (rígido), CAP 50/70 (médio), CAP 85/100 (médio) e CAP 150/200 (mole).

**Tabela 1:** Classificação dos Cimentos asfálticos de petróleo segundo a norma regulamentadora 03/2005 da ANP.

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
A 135°C	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
A 150°C		90	50	43	36		
A 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade BrookField							
A 135°C, min. SP 21, 20 rpm, min.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
A 150°C min.		203	112	97	81		
A 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em Tricloroetileno, min	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25°C, min	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							
Varição em massa, máx.	%massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Ductilidade a 25°C, min.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

FONTE: ANP (2005).

### 2.3 Ligantes asfálticos modificados

A NBR 7208 (ABNT, 1990) esclarece que asfalto modificado é o material resultante da adição de determinadas substâncias, como, por exemplo, polímeros, ao cimento asfáltico de petróleo.

O impacto do tráfego nas rodovias, juntamente com a crise do petróleo na década de 70, impulsionou o desenvolvimento de asfaltos modificados. Com objetivo de reduzir os custos de construção e reparação, novas alternativas e soluções estão sendo desenvolvidas. Souza (2012) destaca que os asfaltos modificados podem ser classificados em: asfaltos modificados por polímeros, por agentes de rejuvenescimento e por produtos naturais.

Segundo Lucena (2005), buscando melhorias para a diminuição da temperatura das misturas asfálticas, surgem meios que facilitam o alcance deste objetivo, dentre eles podem-se destacar a adição de aditivos orgânicos ou químicos, emulsões e ligantes sintéticos, que podem diminuir as temperaturas de operação e usinagem em cerca de 37°C. Percebe-se, então, que há uma grande necessidade de acentuar as pesquisas que envolvem misturas mornas para que possa identificar novas técnicas e, verificar dentre as existentes, quais as mais apropriadas para se utilizar no Brasil.

Os *asfaltos modificados por polímeros* podem ou não ser resultantes de reações químicas no processo de incorporação. Segundo IBP (1999), os polímeros quando adicionados ao asfalto podem alterar profundamente o comportamento reológico do asfalto, melhorar as propriedades mecânicas, numa grande faixa de temperatura e apresenta como principais vantagens: diminuição da suscetibilidade térmica; melhoria das características adesivas e coesivas; aumento da resistência ao envelhecimento; elevação do ponto de amolecimento; diminuição do ponto de ruptura Fraass e maior resistência à deformação permanente.

Feita uma comparação entre o asfalto puro e modificado, Lucena (2005) chegou a uma conclusão de que os asfaltos que foram incorporados polímeros têm uma redução na susceptibilidade térmica e nas deformações permanentes causadas pelo tráfego, resultando em uma maior vida útil dos pavimentos.

Além de diminuir gastos com reparos e manutenções, a utilização desses agentes também tem um papel importante. Segundo Salini (2000), o emprego de borracha reciclada de pneus em pavimentos asfálticos constitui-se em uma tecnologia alternativa, ambientalmente correta e eficaz do ponto de vista técnico-econômico, que vem sendo utilizada com cada vez mais ênfase em países desenvolvidos.

Segundo Bernucci et al. (2008), os *agentes rejuvenescedores* são utilizados devido ao ligante asfáltico sofrer algumas perdas de componentes e sofrer certo enrijecimento. Para que haja a regeneração da flexibilidade do ligante, utiliza-se o processo de reciclagem a quente ou a frio. Essa técnica tem como objetivo a reaplicação dos agregados e ligantes do revestimento antigo. A utilização dos agentes rejuvenescedores nesse processo tem como intuito reduzir a viscosidade e repor os compostos aromáticos e resinas para recomposição das características do ligante (ductilidade e consistência) que foram perdidos de vido ao processo de envelhecimento ao decorrer da utilização do pavimento. Conforme IBP (1999), esses agentes são denominados segundo o Regulamento Técnico DNC nº 04/97, de aditivos asfálticos de reciclagem para mistura a quente.

Alguns agentes rejuvenescedores podem ser descritos como “aditivos verdes” sendo, em sua maioria, oriundos de fontes renováveis e biodegradáveis. O processo de adição de oleaginosas aos ligantes asfálticos para alterar suas características pode ser reconhecida também como uma alternativa sustentável, uma vez que ao diminuir a temperatura de usinagem e compactação há, também, a redução da emissão de gases tóxicos.

Os *asfaltos modificados por produtos naturais* são produtos que recebem a adição de elementos naturais como fibras de biomassa, lodos, asfalto natural e enxofre ao cimento asfáltico de petróleo de forma a melhorar algumas das suas propriedades mecânicas (SOUZA, 2012). Todavia, essa técnica não se evidencia quando comparada às demais, tendo em vista que os asfaltos modificados por polímeros apresenta um maior desempenho e ganha maior destaque no cenário brasileiro (IBP, 1999).

De acordo com Souza (2012), cada vez mais nota-se o aumento do emprego de modificadores para melhoria das propriedades de um CAP em misturas asfálticas. Esses modificadores exercem uma função de melhoria de desempenho dos pavimentos, fazendo com que haja o aumento da resistência ao acúmulo de deformações permanentes e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento do material e melhorando a adesividade.

## **2.4 Misturas Asfálticas Mornas**

Segundo Merighi (2015), as misturas asfálticas podem ser classificadas como misturas a quente, mornas, semimornas e a frio. Nas misturas a quente o agregado é aquecido a uma temperatura entre 10 a 15°C acima da temperatura do ligante, que não pode ultrapassar 177°C (BERNUCCI et al., 2008). O processo de produção das misturas mornas e semimornas são executadas a temperaturas inferiores às misturas quentes, no caso das misturas mornas, são preparadas acima de 100°C e as misturas semimornas abaixo de 100°C (MOTTA, 2011). Já as misturas a frio são produzidas em temperatura ambiente, com emulsão asfáltica.

Motta (2011) destaca as seguintes vantagens na utilização de misturas mornas:

- i) Menor emissão de poluentes atmosféricos;
- ii) Melhoria do ambiente de trabalho na pavimentação (redução de fumos e odores de asfalto);
- iii) Diminuição do consumo energético (menor consumo de combustível);
- iv) Possível redução do envelhecimento do ligante asfáltico durante a usinagem (refletindo em maior flexibilidade e durabilidade em campo);
- v) Menor dificuldade de aplicação em épocas ou locais de clima muito frio ou quando se tem que percorrer longas distâncias entre a usina e

o campo (devido ao menor gradiente térmico em relação a misturas convencionais);

- vi) Uso de maiores quantidades de mistura asfáltica fresada em reciclagem (devido à menor dificuldade de usinagem quanto à temperatura).

Tendo em vista que o processo de adição de borrachas e polímeros às misturas asfálticas vem crescendo largamente na área de pavimentação e que o mesmo exige uma maior temperatura de usinagem se comparado aos de asfalto convencionais, Motta (2011) destaca, então, a importância do emprego de misturas mornas e semimornas.

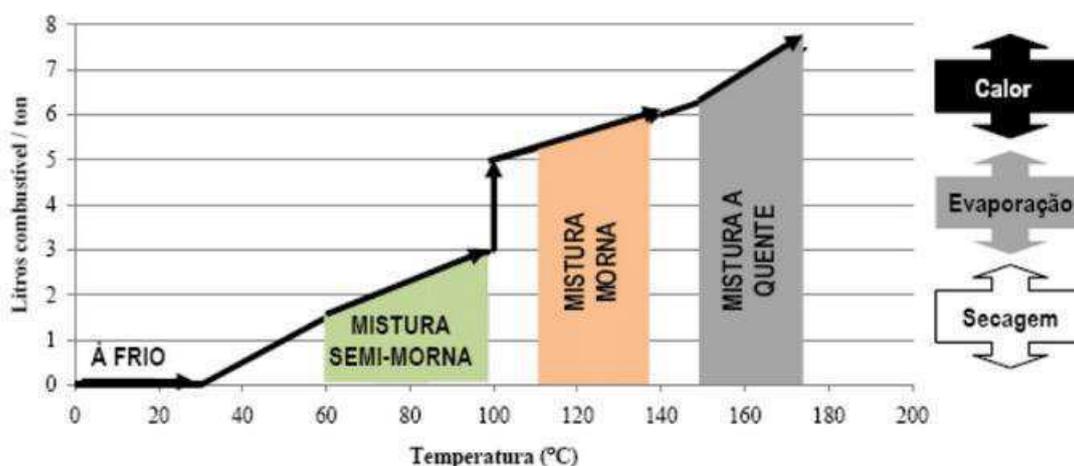
Segundo Penz (2010), as misturas asfálticas mais utilizadas no Brasil são produzidas a quente e a frio. Nota-se vantagens ao se trabalhar com misturas a quente em relação ao trabalho com misturas a frio, podendo destacar o fato de gerar uma maior resistência aos esforços provenientes do tráfego de veículos. Por outro lado, deve-se observar que ao se trabalhar com asfaltos submetidos a altas temperaturas certas desvantagens são evidentes, dentre elas a exposição dos trabalhadores, afetando a saúde e segurança dos mesmos, bem como o aumento do consumo energético nas usinas de asfalto, aumento da emissão de gases e vapores poluentes oriundos da queima de combustíveis fósseis, além de acelerar o processo de envelhecimento dos ligantes, tornando-os passíveis a trincamentos e deformações.

As razões citadas anteriormente já são suficientes para tentar buscar alternativas para reduzir tais temperaturas no processo de produção de uma mistura asfáltica. Faz-se necessário o estudo e aprimoramento desse tipo de mistura, destacando as questões ambientais, econômicas e de segurança, bem como as vantagens em relação às demais misturas asfálticas.

Deve-se ter consciência, que a temperatura influencia na viscosidade da mistura, como aponta Penz (2010). Possuindo uma viscosidade elevada, os agregados movem-se com certa dificuldade na rolagem do rolo compressor. Já à baixas viscosidades, os agregados se movem muito facilmente, prejudicando a aderência após a compactação.

A figura 3 apresenta uma classificação das misturas asfálticas quanto a temperatura de produção. A concessionária da rodovia Osório-Porto Alegre S/A e a UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (2007, p. 24) determinaram as faixas de temperaturas para misturas a frio entre 20 e 50°C, misturas asfálticas a quente entre 140 e 170°C e as misturas asfálticas mornas entre 105 e 135°C.

**Figura 3:** Classificação de misturas asfálticas em função da temperatura de produção.



**FONTE:** (NAKAHARA et al., 2010)

Segundo D'Angelo et al. (2008), as misturas asfálticas mornas podem ser classificadas em dois tipos: as que usam água e as que usam alguma forma de aditivo orgânico ou cera para a redução da temperatura. A água em contato com o asfalto quente se transforma em vapor expandindo o asfalto e diminuindo a viscosidade da mistura. A diminuição da viscosidade de misturas com inserção de aditivos orgânicos acontece quando o ponto de derretimento da cera é atingido.

## 2.5 Principais Defeitos dos Pavimentos e a Influência dos Ligantes Asfálticos

A grande problemática ao se projetar e construir uma rodovia é conseguir atender a necessidade de suporte e durabilidade, assim como atender as demandas estruturais e funcionais. Deve-se enfatizar a importância em haver uma manutenção periódica e não correções funcionais, estruturais ou

até mesmo uma possível reconstrução do pavimento. Além da manutenção periódica, também faz-se necessário a atuação de planos estratégicos para que ocorra uma intervenção. Essas intervenções podem incluir uma simples selagem de trincas ou execução de camadas asfálticas delgadas (BERNUCCI et al., 2008).

O Brasil possui uma vasta área territorial e uma extensa malha rodoviária. Como citado anteriormente, de acordo com CNT (2017), 58,2% das rodovias brasileiras apresentam algum tipo de problema no estado geral, e dentre esses problemas, 48,3% estão classificados com alguma deficiência no pavimento.

Condições não favoráveis ao uso da rodovia podem ser consequentes de falhas nas fases de projeto ou construção, que variam desde o mau emprego de materiais (tipo de ligante asfáltico, teor e quantidade de vazios, bem como propriedades dos agregados como adesividade e granulometria), falta de controle da fase de usinagem ou no processo de compactação da mistura (MARINHO FILHO, 2017).

Para oferecer uma vida útil prolongada ao pavimento, a rodovia deve ser projetada de modo a atender e distribuir os esforços verticais advindos do tráfego de veículos; oferecer conforto e segurança aos usuários e resistir aos esforços horizontais de desgaste.

A absorção dos esforços ocorre de tal maneira que as tensões verticais irão se situar próximas aos pontos de aplicação dessa carga de maneira gradativa (RIBEIRO, 2017).

Os defeitos na superfície dos pavimentos podem ser identificados a olho nu e classificados de acordo com a Norma DNIT – TER 005 (2003), Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos – Terminologia, que no Brasil, é responsável por definir os termos técnicos relacionados aos defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis e também por padronizar os termos empregados na elaboração de normas, manuais, projetos e textos relativos aos pavimentos flexíveis.

Os principais defeitos encontrados nas rodovias brasileiras são destacados, descritos e catalogados pela norma DNIT 005 (2003), tais defeitos são considerados para cálculo de indicador de qualidade da superfície do pavimento (IGG – Índice de Gravidade Global) e são eles: fendas (F);

afundamento (A); corrugação e ondulações transversais (O); exsudação (EX); desgaste ou desagregação (D); panela ou buraco (P); e remendos (R).

A utilização de ligantes asfálticos modificados apresenta melhorias nas propriedades reológicas contribuindo para o aumento da resistência do revestimento betuminoso. Em longo prazo, os problemas relacionados aos ligantes podem acarretar as trincas por fadiga, deformação permanente e envelhecimento por oxidação.

Como o foco principal desse trabalho é a avaliação reológica do CAP modificado com adição do óleo de algodão refinado e, dentre os defeitos citados, os resultados obtidos permitem fazer uma relação entre as propriedades dos ligantes com a deformação permanente e trincas por fadiga, estes serão mais destacados.

A deformação permanente em trilha de roda é um problema de desempenho em pavimentos asfálticos, elas acontecem devido às cargas que se movimentam sobre o pavimento fazendo com que o mesmo se deforme. Parte da deformação consegue ser recuperada (deformação elástica), porém, outra parte não consegue se recuperar com o passar da carga (deformação plástica e posteriormente permanente). Incluem-se dentre as deformações permanentes em pavimentos, os afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões. Tais deformações ocorrem devido ao fato de que o pavimento flexível possui como características mais significativas aquelas advindas dos materiais de natureza viscoplástica, que ao sofrer aplicação de carga ao decorrer do tempo sofrer com deformações que não são recuperáveis. (MOURA, 2010; PETER, 2010; DNIT, 2006).

Além de estar relacionada com cargas, as deformações permanentes sofrem fortes influências devido a fatores advindos do material que constitui o pavimento, como os agregados e ligantes asfálticos. Bernucci et. al (2008) relaciona a grande dependência da resistência à deformação plástica em materiais asfálticos ao esqueleto pétreo. Levando em consideração que a temperatura também é fator que tem forte influência nessas deformações, pode-se então evidenciar a influência do ligante asfáltico devido ao seu comportamento termo-sensível (BARROS, 2017).

Dentre as consequências das deformações observadas nos pavimentos, DNIT (2006) destaca a irregularidade longitudinal que afeta a distribuição dinâmica das cargas, a qualidade do rolamento, causando danos aos veículos e consequente custo operacional dos mesmos e ainda acúmulo de água que gera risco à segurança dos motoristas e usuários em geral. As causas das deformações permanentes podem estar associadas ao tráfego, ou não, como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Algumas causas e tipos de deformação permanente.

<b>Causa Geral</b>	<b>Causa específica</b>	<b>Exemplo de defeito</b>
<b>Associada com o carregamento</b>	Carregamento concentrado ou em excesso	Fluência plástica (ruptura por cisalhamento)
	Carregamento de longa duração ou estático	Deformações ao longo do tempo (creep)
	Grande número de repetições de carga	Afundamento nas trilhas de roda
<b>Não associada com o carregamento</b>	Subleito constituído de solo expansivo	Inchamento ou empolamento
	Solos compressíveis na fundação do pavimento	Recalque diferencial

**Fonte:** DNIT (2016).

Segundo DNIT (2003), de forma resumida, as fendas são descontinuidades na superfície do pavimento e podem se manifestar nas formas de fissuras e trincas, sendo as trincas mais facilmente detectadas a olho nu. A exsudação é causada pela migração do asfalto para a superfície, está ligada diretamente ao teor de ligante, bem como ao volume de vazios. Os desgastes são causados pelos esforços tangenciais advindos do tráfego de veículos e que é efeito do arrancamento do agregado do pavimento. Por fim, as panelas são causadas por diversos fatores (além dos já citados anteriormente) e o seu surgimento tem caráter evolutivo, como por exemplo: uma simples

fissura transforma-se em uma trinca e sob ação de fatores como tráfego e intempéries, se transformar em um buraco.

Segundo Ribeiro (2017), as trincas formadas por fadiga podem ser isoladas ou interligadas. As fendas do tipo couro de jacaré representam o estágio avançado de fadiga, surgem de forma isolada e com decorrer do tempo interligam-se. Se não houver manutenção ou reparo, tendenciam ao desprendimento de bloco e formação de ninhos.

Marinho Filho (2017) destaca que a reologia dos ligantes asfálticos possui importância significativa na avaliação do comportamento dos ligantes asfálticos em relação à variação de temperatura e frequência de cargas aplicadas, possibilitando uma melhor escolha do ligante a ser utilizado de acordo com as condições que serão submetidas as misturas asfálticas.

## **2.6 Envelhecimento dos ligantes asfálticos**

O processo de envelhecimento do ligante asfáltico e da mistura asfáltica ocasiona diminuição significativa na vida útil da camada de pavimentação alterando suas características e propriedades. Sabe-se que a perda ou redução dessas propriedades afeta diretamente o desempenho das misturas asfálticas. É o processo no qual o CAP altera suas características, desde a fase de estocagem até o manuseio, aplicação e serviço. O envelhecimento da mistura asfáltica pode ocorrer por diversos fatores, os quais incluem-se os efeitos da temperatura, do ar, da luz solar e do tempo, ocasionando na mistura enrijecimento e fragilidade, e, conseqüentemente o surgimento de trincas, desagregações, maior suscetibilidade aos efeitos da umidade e aumento da consistência com perda de suas características aglutinantes (LEITE, 1999 e CAVALCANTI, 2010).

De acordo com Silva (2011), existem diversas reações passíveis de se acontecer nos CAPs e estão incluídos: oxidação, endurecimento exsudativo, endurecimento físico e perda de voláteis. Dentre elas a oxidação é o principal fator que ocasiona esse processo de envelhecimento.

Apesar das conseqüências negativas, vale salientar que esse endurecimento colabora (até certo ponto) aumentando a resistência do pavimento às deformações permanentes (CAVALCANTI, 2010).

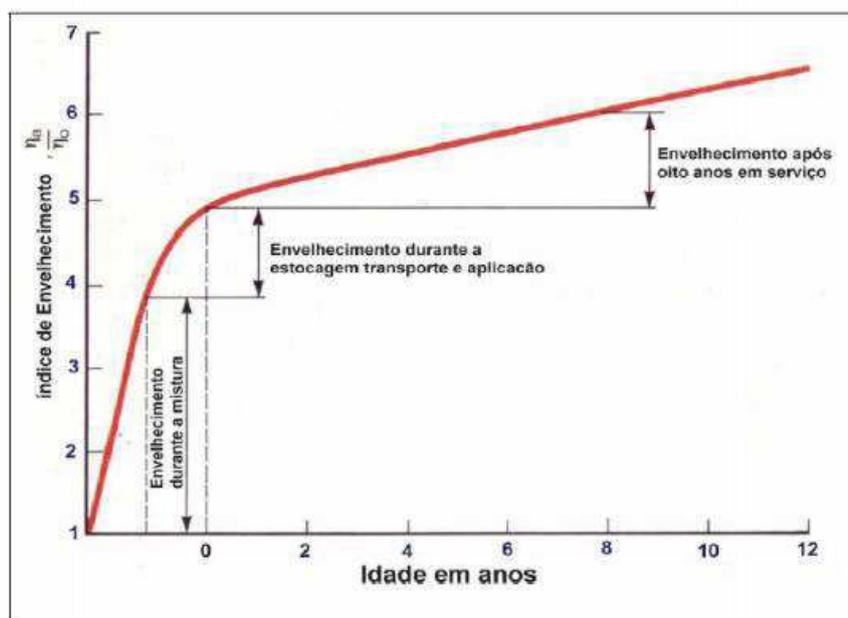
O aumento na consistência é associado à sua viscosidade e faz com que o material fique mais duro e rígido e menos elástico, além disso, nota-se um aumento no ponto de amolecimento e uma diminuição na penetração (SILVA, 2011).

Os principais fatores que influenciam no envelhecimento do CAP em curto prazo são a temperatura e o grau de exposição do ligante ao oxigênio do ar. Esses fatores levam em consideração o tempo de estocagem, manuseio e aplicação (RODRIGUES, 2006).

Ainda segundo Rodrigues (2006), e baseado no gráfico da Figura 4, o envelhecimento do ligante ocorre em três etapas:

- i) A primeira ocorre na fase de usinagem e é a mais impactante, sofrendo cerca de 60% do envelhecimento do ligante;
- ii) A segunda representa cerca de 20% do envelhecimento, podendo ser representada pelo processo de transporte, espalhamento e compactação em obra;
- iii) A terceira é o envelhecimento que ocorre durante toda a vida útil do ligante, devido a exposição às condições climáticas.

**Figura 4:** Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo e durante vários anos de serviço.



**FONTE:** WHITEOAK (1980) apud BERNUCCI ET. AL (2002).

Nota-se, portanto, que grande parte do envelhecimento ocorre nas duas primeiras fases (a curto prazo), destacando a necessidade de haver uma maior atenção nas etapas iniciais.

O fato de haver um maior impacto no processo de envelhecimento na primeira etapa ocorre, segundo Greco (2004), devido ao fato de que na fase de usinagem a mistura estar submetida a altas temperaturas e também está mantida a grade exposição do ar, havendo uma reação entre as moléculas do asfalto com o oxigênio. A partir disso, o ligante apresenta-se com maior viscosidade e com as propriedades físicas e reológicas comprometidas.

Na segunda etapa o problema ocorre devido ao fato de o ligante asfáltico estar exposto a altas temperaturas e apresentar maior superfície de contato com o oxigênio. Já a terceira, ocorre devido às condições climáticas e por estar sujeito às condições de tráfego.

O procedimento de envelhecimento a curto prazo surgiu como forma de aprimorar os estudos referentes a esse fenômeno e simula o envelhecimento a curto prazo por meio dos mecanismos de oxidação e evaporação, que são os mecanismos que assimilam aos processos nas fases de usinagem, espalhamento e compactação da mistura (BERNUCCI et al., 2008).

Por ser um material termoplástico, à baixas temperaturas e durante carregamento rápido o ligante asfáltico comporta-se como um sólido vítreo, já à altas temperaturas e carregamento lento, comporta-se como um fluído viscoso.

Portanto, verifica-se que a forma que o ligante asfáltico responde ao esforço depende tanto da temperatura como do tempo de aplicação da carga.

## **2.7 Reologia dos Ligantes Asfálticos**

A reologia é a ciência que permite estudar o comportamento tensão-deformação de um ligante asfáltico levando em consideração a temperatura submetida e o tempo de aplicação da carga, obtendo-se a definição de rigidez a partir desses parâmetros. Assim, dependendo desses fatores o material pode exibir um comportamento elástico e/ou viscoso.

Como explicado anteriormente, durante a sua vida de serviço os ligantes podem ficar submetidos à exposição de altas temperaturas e carregamentos

devido ao tráfego de veículos. Esses fatores fazem com que hajam mudanças químicas no ligante e ocorra o envelhecimento que caracteriza-se como um complicador adicional, o que irá refletir em mudanças no seu comportamento reológico (SILVA, 2017).

O estudo laboratorial vem analisando essas mudanças através de procedimentos de envelhecimento acelerado de ligantes asfálticos com o objetivo de comparar as propriedades reológicas do material antes do envelhecimento como envelhecido.

Segundo Mothé (2009), a importância de avaliar as propriedades reológicas se dá pelos seguintes motivos:

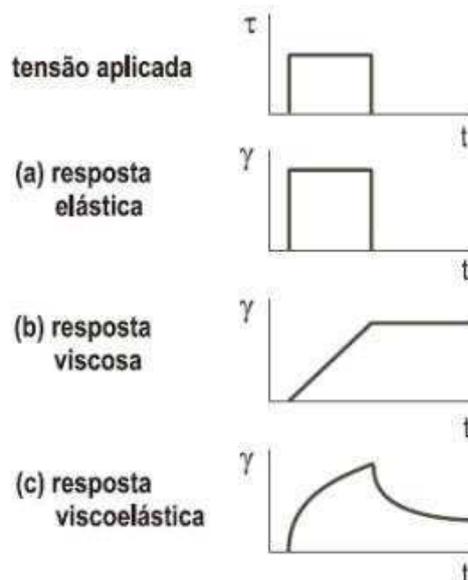
- i) Entendimento e relacionamento da reologia com os problemas na superfície do pavimento;
- ii) Determinação das diferenças entre os asfaltos oriundos de diferentes petróleos e processos de refino;
- iii) Seleção orientada das temperaturas para as operações de usinagem e construção das camadas asfálticas;

A utilização do uso de ensaios reológicos para a identificação de correlações confiáveis entre as propriedades básicas dos ligantes asfálticos com o desempenho da mistura em serviço e, visa obter uma estimativa da vida de fadiga resistente à deformação permanente e resistência às trincas térmicas dos concretos asfálticos. Com isso, destaca-se a importância da não utilização de ensaios com caráter empírico, pois os mesmos não representam bem o comportamento e desempenho de misturas asfálticas em campo (MARINHO FILHO, 2017).

Em um ensaio de fluência, como ilustrado na Figura 5, um material elástico se deforma à medida que aumenta-se a tensão aplicada. Em seguida, sob um carregamento constante a deformação também se mantém constante independente do tempo e ao remover o carregamento, o material retorna à sua condição inicial (Figura 5.a). Quanto ao material viscoso (Figura 5.b), este deforma-se a uma taxa constante até que a tensão seja removida. Assim o material se manterá deformado, pois neste caso não há recuperação. Já para um material viscoelástico (Figura 5.c), este apresenta uma deformação imediata com a aplicação da tensão, em seguida, uma deformação gradual

com o tempo e após cessar o carregamento, o material apresenta uma deformação residual que pode ou não ser recuperada, a depender do tempo e da intensidade da tensão aplicada (FAXINA, 2006).

**Figura 5:** Comportamento dos materiais (a) elástico, (b) viscoso e (c) viscoelástico.



FONTE: FAXINA (2006).

## 2.8 Óleo de Algodão

O óleo de algodão é derivado das sementes *Gossypium hirsutum* (Americano) ou *Gossypium barbadense* (Egípcio). O algodão envolve as sementes do algodoeiro e, embora seja macio, suas fibras possuem boa resistência ao serem submetidas a esforços de tração, sendo bastante utilizado na confecção de tecidos (FABIANO, 2012).

A qualidade do óleo de algodão, assim como o conteúdo dos ácidos graxos, depende principalmente das condições climáticas as quais o algodão é submetido em campo após a colheita. Numa mesma região, em um ano, a qualidade do óleo pode mudar de acordo com a variação das condições climáticas.

Com objetivo de facilitar o processo de esmagamento do grão e retirada da casca, o caroço de algodão deve passar um período de secagem, estando

em local ventilado e protegido contra efeitos do sol até que sua umidade máxima esteja em torno de 13% (MORETO; FETT, 1998).

Tradicionalmente a importância da produção do algodão se dá pelo fato de sua semente ser favorável na produção de óleo e também do línter, um subproduto que tem grande importância do mercado têxtil, sendo bastante utilizado na fabricação de fio de tecelagem. A partir do surgimento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), houve uma maior atenção para esse óleo, visto que no Brasil há uma área de produção com extensão total de aproximadamente 1 milhão de hectares e a possibilidade de ser uma fonte importante de matéria-prima na produção de biodiesel, uma vez que o cultivo do algodoeiro não afeta a produção de alimentos para o homem (DANTAS, 2006 e CARVALHO, 2015). O fato de já ser produzido para outros fins, torna extremamente baixo o custo da obtenção de óleo de algodão, caracterizando-se como uma vantagem importante.

Segundo Putti et al. (2012), em relação a produção industrial, o óleo de algodão é o óleo vegetal mais antigo e tem consumo em grande escala no Brasil, porém seu consumo foi reduzido com o aumento da produção da soja. Por possuir um maior ponto de fusão (comparando-se a outros óleos), o óleo de algodão aguenta maiores temperaturas sem que haja perda em sua qualidade e alterações significativas em suas propriedades (SILVA, 2016).

Beltrão e Pereira (2000) destacam que a espécie de algodoeiro *Gossypium* é responsável por 90% da produção mundial de algodão. Estima-se que essa produção, realizada em mais de 65 países, está distribuída em cerca de 33,31 milhões de hectares.

O algodoeiro pode ser considerado como “o boi vegetal”, pois possui inúmeras aplicações e total aproveitamento pelo homem. A semente de algodão é composta pelos seguintes componentes: 12,5% de línter, 15,2% de óleo bruto, 46,7% de torta (resíduo da extração do óleo), 20,7% de casca e 4,9% de resíduos produzidos durante o processo industrial (BELTRÃO; PEREIRA, 2000).

A produção de óleo bruto e dos resíduos industrializados é composta de três etapas básicas:

- a) armazenamento das sementes oleaginosas;
- b) preparação da matéria-prima e;
- c) extração do óleo bruto.

Existem duas possíveis formas de se extrair o óleo: por prensagem mecânica e por solvente. Deve-se haver uma atenção especial em cada etapa, pois cada uma delas se faz fundamental para que haja a garantia na qualidade do óleo gerado e o produto final obtido afeta sensivelmente o processo que ocorrerá posteriormente de refino.

Segundo Putti et al. (2012), logo após o processo de separação da fibra, o principal produto do algodão é o óleo comestível. No seu processamento obtém-se:

1. Os subprodutos primários: o línter, a casca e a amêndoa;
2. Os secundários: farinha integral, óleo bruto, torta e farelo;
3. Os terciários: óleo refinado, borra, farinha desengordurada.

Putti et al. (2012) destaca o surgimento de um novo projeto de pesquisa que objetiva o melhoramento genético do algodão, visando um aumento em seu teor de óleo sem que haja alterações em sua fibra e sem perder sua proteína. Em média, as sementes possuem um teor de 14% a 16% de óleo, porém, há possibilidades de que o teor atinja 32%. Na última etapa, durante o procedimento de refino dos óleos comestíveis, a clarificação é a que tem maior importância na determinação da qualidade e estabilidade do produto final.

Segundo Fabiano (2012), neste processo ocorre a remoção dos seguintes componentes:

- ✓ Substâncias coloidais, proteínas, fosfatídeos e produtos de sua decomposição;
- ✓ Ácidos graxos livres e seus sais, ácidos graxos oxidados, lactonas, acetais e polímeros;
- ✓ Pigmentos como clorofila, gossipol, xantofila e carotenóides;
- ✓ Substâncias voláteis, como hidrocarbonetos, alcoóis, aldeídos, cetonas e ésteres de baixo peso molecular;
- ✓ Substâncias inorgânicas tais como: sais de cálcio e de outros metais, silicatos, fosfatos e outros;

✓ Umidade.

Sendo necessária, principalmente a remoção dos ácidos graxos livres e fosfatídios (misturas de ésteres, ácidos graxos, ácido fosfórico e glicerol), pois estes afetam a estabilidade do produto (FABIANO, 2012).

### **3. MATERIAIS**

#### **3.1 Ligante asfáltico de petróleo**

O ligante asfáltico utilizado na presente pesquisa foi cedido pela empresa JBR e foi classificado através do ensaio de penetração como sendo do tipo 50/70. Este ligante asfáltico é normatizado em todo o território nacional e suas especificações estão prescritas no Regulamento Técnico 19/2005 da ANP.

#### **3.2 Óleo de algodão refinado**

O óleo de algodão foi obtido no comércio local, sendo um produto de fácil aquisição e de produção em larga escala.

## 4. MÉTODOS

### 4.1 Produção da mistura do ligante asfáltico com a adição do óleo

Utilizando o agitador mecânico de baixo cisalhamento da marca FISATOM, modelo 722D (Figura 6), através das análises e procedimentos estabelecidos nos estudos realizados por Ziegler (2017), Souza (2012) e Faxina (2006), objetivando a avaliação do comportamento de amostras de ligante asfáltico associados a compostos oleicos, escolheu-se os parâmetros a serem utilizados para a realização da mistura do CAP 50/70 com óleo de algodão refinado.

A mistura asfáltica foi submetida a um aquecimento prévio em estufa a 120°C por cerca de 90 minutos para garantir a fluidez necessária que possibilitasse a homogeneização.

O material foi depositado em um béquer e inserido na manta do agitador mecânico e submetido a uma rotação de 406 rpm para assegurar uma homogeneidade na distribuição da mistura.

Ao se atingir a temperatura de estabilização (135°C), adicionou-se o aditivo oleaginoso em proporção ao peso do ligante puro e aguardou-se 20 minutos para a homogeneização da mistura. Foi adicionado ao ligante o óleo de algodão refinado, separadamente, os teores 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%.

**Figura 6:** Agitador mecânico FISATOM, modelo 722D.



**FONTE:** Ziegler (2017)

## 4.2 Caracterização Reológica Básica dos Ligantes

Como citado anteriormente, foram utilizados ensaios para medir as propriedades reológicas fundamentais e empíricas dos ligantes asfálticos puro e modificado.

A fim de caracterizar os ligantes asfálticos foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, antes e após o procedimento de RTFO, seguindo a metodologia apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3:** Ensaios de caracterização reológicas básicas dos ligantes asfálticos.

Procedimento	Metodologia
Penetração	DNIT 155/2010-ME
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010-ME
Viscosidade Rotacional	ABNT NBR 15184
Envelhecimento a curto prazo	ABNT 15235/09

### 4.2.1 Ensaio de Penetração

Segundo DNIT (2010), penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo (5 segundos) e temperatura (25°C).

O procedimento foi realizado para se obter três medidas individuais de penetração, a média é aceita se a diferença entre as medidas desses três valores encontrados não excederem o limite especificado em norma. É observado que quanto menor a penetração da agulha, menor será a consistência do material. A Figura 7 mostra o equipamento utilizado para a realização desse ensaio.

**Figura 7:** Aparelho utilizado para realização do ensaio de penetração.



#### **4.2.2 Ponto de Amolecimento**

O ponto de amolecimento é uma medida empírica determinada pela menor temperatura na qual uma esfera metálica passa por um anel, ambos padronizados, preenchido com o material betuminoso e percorre uma determinada distancia, sob condições pré-estabelecidas. É um método desenvolvido para medir a temperatura na qual o asfalto possui uma determinada consistência.

Neste ensaio, duas bolas de aço com peso e dimensões especificadas são posicionadas no centro de um anel metálico padronizado, cada. O conjunto é colocado dentro de um béquer contendo água à temperatura normal. Aquece-se a água contida no béquer a uma taxa controlada a fim de provocar o amolecimento do ligante asfáltico. Ao amolecer, o ligante não suporta mais o peso da bola, fazendo com que as esferas se desloquem para o fundo do béquer e, ocorrendo isso, anota-se a temperatura na qual as esferas tocam a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio. Caso a diferença de temperatura entre as duas amostras exceda 2°C, tem-se a necessidade de realizar novamente o ensaio.

**Figura 8:** Conjunto anel e bola.



#### **4.2.3 Viscosidade Rotacional**

O ensaio de viscosidade rotacional permite determinar a viscosidade dos ligantes e suas propriedades de consistência. É utilizada nas análises relacionadas com as operações de bombeamento e a estocagem dos ligantes asfálticos. A partir dos dados obtidos neste ensaio foi possível obter-se a curva viscosidade-temperatura.

Utilizou-se um controlador de temperatura, juntamente ao viscosímetro rotacional, o qual permitiu fazer a medição do torque necessário para que a haste de prova (spindle) rodasse ao ser mergulhado no ligante à temperatura, resistência à penetração e ponto de amolecimento já definidos, sob velocidade constante e uniforme. A rotação obtida determinou uma força necessária para vencer a resistência que a viscosidade do material fluido oferece ao movimento rotacional. O ensaio foi realizado nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C.

**Figura 9:** Viscosímetro rotacional Brookfield



#### **4.2.4 Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO**

Este ensaio teve como objetivo simular o envelhecimento que o CAP sofre, por oxidação e evaporação, durante o processo de usinagem numa instalação de produção de misturas asfálticas, mediu-se o efeito do calor e do ar em uma película em movimento de materiais asfálticos semissólidos.

Colocou-se aproximadamente 35g de amostra do ligante asfáltico em um recipiente padronizado que foram inseridos em um refratário vazado e submetido a giros contínuos a 163°C por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos.

Depois de realizado o procedimento, fez-se a medição dos respectivos pesos para verificar a perda de massa e alterações nas propriedades físicas de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. A Figura 10 representa o aparelho para realizar o aparelho a curto prazo.

**Figura 10:** Estufa de filme fino rotativo utilizada para realizar o envelhecimento a curto prazo.



### 4.3 Caracterização Reológica Avançada dos Ligantes

Utilizou-se o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), Figura 11, para medir as propriedades reológicas avançadas dos ligantes asfálticos puros e modificados. Segundo Shiroma (2012), estes são aparelhos que possibilitam a escolha de análise através de diferentes métodos (tensão ou taxa de deformação controlada), a realização de testes dinâmicos oscilatórios e que permitem a obtenção de várias medidas em um único teste.

**Figura 11:** Reômetro de cisalhamento dinâmico.



Obtem-se, através desse equipamento, o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperaturas e frequências de carregamentos desejados. O reômetro possui alta sensibilidade, alto controle da temperatura e taxa de deformação, obtendo assim resultados com uma maior precisão.

**Tabela 3:** Ensaios de caracterização reológicas avançadas dos ligantes asfálticos.

Procedimento	Metodologia
Grau de desempenho (PG)	ASTM D6373-15
Grau de desempenho contínuo	ASTM D6373-15
Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)	ASTM D7405-08

#### 4.3.1 Grau de Desempenho (PG)

É importante que os ligantes utilizados nas misturas asfálticas apresentem propriedades que ofereça bom desempenho nas condições que o pavimento será submetido em serviço. Tais condições envolvem as situações com solicitações em temperaturas mais elevadas, mais baixas e também o volume de tráfego.

As temperaturas do Grau de desempenho (PG) são definidas por dois valores, um grau quente máximo e um frio mínimo. Nesta pesquisa identificou-se apenas o PG máximo para as amostras de ligante asfáltico puro e modificado, devido as características climáticas que os pavimentos brasileiros são submetidos.

Foi feita uma varredura em função da razão entre o módulo complexo ( $G^*$ ) e o seno do ângulo de fase ( $\text{sen } \delta$ ) para se definir o PG de uma amostra de ligante asfáltico para temperaturas. O indicador é calculado a partir de uma escala de variação de  $6^\circ$  em  $6^\circ$  graus Celsius entre cada leitura. A faixa de temperaturas inicial utilizada para se alcançar o PG foi a de  $46^\circ\text{C}$ - $82^\circ\text{C}$ .

O PG corresponde à faixa de temperaturas na qual os valores de  $G^*/\text{sen } \delta$  são superiores a 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo. A temperatura máxima será obtida com o ponto de falha determinado no ensaio (BERNUCCI ET. AL, 2007).

### 4.3.2 Grau de Desempenho Contínuo

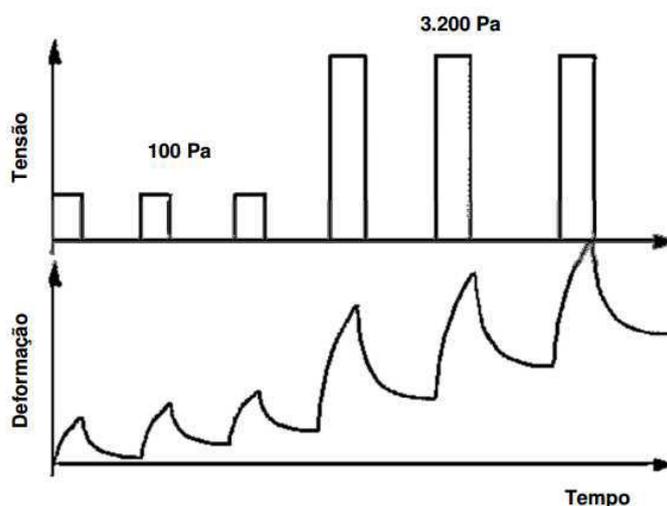
Nesta pesquisa também se realizou a avaliação do PG continuado, que consiste em analisar o ponto de falha do ensaio com uma variação de 1°C entre cada leitura, diferentemente do PG que varia de 6 em 6 graus.

Segundo Ziegler (2017), fazendo o uso do PG continuado é possível se obter o valor exato do PG, oferecendo assim resultados mais precisos e a obtenção de uma melhor avaliação entre as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo.

### 4.3.3 Ensaio de Fluência e Recuperação Sob Tensão Múltipla (MSCR)

O ensaio de MSCR determina o grau de elasticidade do ligante em temperatura elevada juntamente com a deformação acumulada recuperável. Utilizou-se o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) aplicando-se uma carga constante de 1s na amostra do ligante asfáltico e deixou que a mesma descansasse um período de 9s. Repetiu-se o ciclo por 10 vezes e em dois níveis distintos de tensão (100 e 3200 Pa), sem que houvesse intervalo de tempo ao se alterar o nível, como é representado na Figura 12.

**Figura 12:** Representação das tensões e deformações durante a realização do ensaio MSCR



**FONTE:** DOMINGOS et al. (2016).

A temperatura utilizada para cada amostra correspondeu a sua temperatura do PG. Pelo fato de sua análise resultar de amostras submetidas a

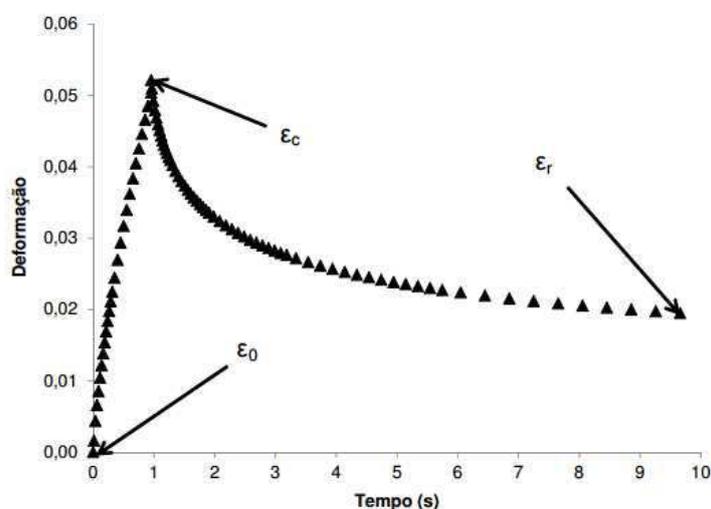
uma aplicação repetida de carga e repouso, considera-se como um parâmetro de deformação associado ao carregamento que ocorre em pavimentos sobre ação de cargas em movimento.

Obteve-se dois parâmetros no MSCR: o percentual de recuperação elástica (%Rec) e a compliância não recuperável ( $J_{nr}$ ). Tais propriedades foram originadas através de três leituras de deformação na amostra em cada um dos 10 ciclos de fluência e recuperação:

- $\epsilon_0$ , medida no início do ciclo de fluência, no tempo  $t=0s$ ;
- $\epsilon_c$ , medida no final do ciclo de fluência, no tempo  $t=1s$ ;
- $\epsilon_r$ , medida no final do ciclo de recuperação, no tempo  $t=10s$ .

A Figura 13 representa a localização dessas deformações em um ciclo de fluência e deformação.

**Figura 13:** Localização das deformações  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_c$  e  $\epsilon_r$  em um ciclo de fluência e recuperação do ensaio MSCR.



**FONTE:** DOMINGOS et al. (2016).

A classificação quanto ao volume do tráfego é dada pelo  $J_{nr}$  sendo dividida em quatro tipos: tráfego padrão (S), tráfego pesado (H), tráfego muito pesado (V) e tráfego extrapesado (E). As especificações quanto ao valor de  $J_{nr}$  estão apresentadas na norma AASHTO M320 e reproduzida na tabela 4:

**Tabela 4:** Classificação quanto ao valor de  $J_{nr}$  (AASHTOO M320).

Condição de envelhecimento	Propriedade	Limite máximo (kPa <sup>-1</sup> )	Nível de tráfego	Número de solicitações
Envelhecimento no RTFOT	$J_{nr}$ a 3.200Pa na temperatura do PG	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
		2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
		1,0	Muito pesado (V)	> 30 milhões
		0,5	Extremamente pesado (E)	> 100 milhões

**FONTE:** FHWA (2011).

## 5. RESULTADOS

Neste tópico serão expostos os resultados do procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO) dos ligantes asfálticos puro (CAP 50/70) e com adição de óleo de algodão refinado nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. Em seguida, são apresentadas as caracterizações dos referidos ligantes com base nos ensaios convencionais e posteriormente resultados dos ensaios especiais.

### 5.1 Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO

As amostras foram submetidas ao envelhecimento a curto prazo RTFO, comparou-se os pesos antes e após o procedimento para se obter a variação de massa. Os resultados estão representados na Tabela 5:

**Tabela 5:** Variação em massa após ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFO)

Amostra	Perda de massa (%)
CAP 50/70	0,121
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Refinado	0,038
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Refinado	0,041
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Refinado	0,027
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Refinado	0,030
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Refinado	0,026
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Refinado	0,043
ANP nº 19/2005	≤ 0,500

Analisando as especificações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) através da resolução Nº 19/2005, pode-se dizer que as variações de massa apresentadas na Tabela 5 estão dentro dos critérios estabelecidos.

## 5.2 Ensaio de Penetração

Também foram feitas comparações com os resultados obtidos no ensaio de penetração para antes e depois do procedimento de RTFO os quais encontram-se na Tabela 6:

**Tabela 6:** Ensaio de penetração retida

Amostra	Penetração (dmm)	Penetração após RTFO (dmm)	Penetração retida (%)
CAP 50/70	63,2	47,0	74,4
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Refinado	85,8	61,2	71,33
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Refinado	107,8	71,8	66,60
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Refinado	110,6	71,4	64,56
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Refinado	150,2	81,4	54,19
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Refinado	184,5	100,0	54,20
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Refinado	211,2	124,8	59,09
ANP nº 19/2005	-	-	Mín. 55,00

Pode-se observar um aumento na penetração com o aumento da adição do óleo de algodão refinado, porém, nota-se uma diminuição nos valores após o envelhecimento em curto prazo em RTFO, o que ocorre devido a ocorrência de envelhecimento do CAP.

Analisando os trabalhos de Ziegler (2017), Portugal (2016), Costa (2015) e Souza (2012), percebe-se também um aumento da penetração com a adição de agentes modificadores oleicos, ou seja, nesta pesquisa já se esperava o

mesmo comportamento. De acordo com a penetração retida pode-se verificar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento: quanto maior for a porcentagem de penetração retida (PPR) menor será a sensibilidade ao envelhecimento. A Resolução ANP Nº 19/2005 define o mínimo de 55% para esse parâmetro. Observa-se que as amostras com adição de 4% e 5% não se enquadram nos critérios. O resultado para a amostra de 6% já apresenta uma diferença de consistência elevada, não representando de forma satisfatória o desempenho do ligante asfáltico.

### 5.3 Ponto de Amolecimento

Obtiveram-se os pontos de amolecimento através da média de duas temperaturas, as quais os resultados estão expostos na Tabela 7:

**Tabela 7:** Ensaio do ponto de amolecimento - Método do anel e bola

Amostra	Ponto de amolecimento (°C)	Ponto de amolecimento após RTFO (°C)	Aumento do ponto de amolecimento (°C)
CAP 50/70	50,00	53,50	+3,50
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Refinado	46,0	51,0	+5,00
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Refinado	43,5	50,0	+6,50
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Refinado	43,0	47,0	+4,00
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Refinado	40,0	47,0	+7,00
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Refinado	40,5	45,0	+4,50
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Refinado	37,5	44,0	+6,50
ANP nº 19/2005	-	-	Aumento no ponto de amolecimento, Máx. + 7 °C Redução no ponto de amolecimento, Máx. - 5 °C

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que determina a consistência do ligante e determina a temperatura que o ligante atinge uma certa condição de escoamento. Segundo Santos (2017), este parâmetro está relacionado com a manutenção das propriedades do ligante a elevadas temperaturas e ao aumento da resistência à deformação permanente.

Analisando as pesquisas de Ziegler (2017), Portugal (2016), Costa (2015) e Souza (2012) observa-se que o fato de ocorrer uma diminuição na consistência do ligante asfáltico com a adição do óleo de algodão refinado já era um resultado a ser esperado. Todas as amostras se enquadraram com os critérios da resolução Nº 19/2005 da ANP.

#### 5.4 Viscosidade Rotacional

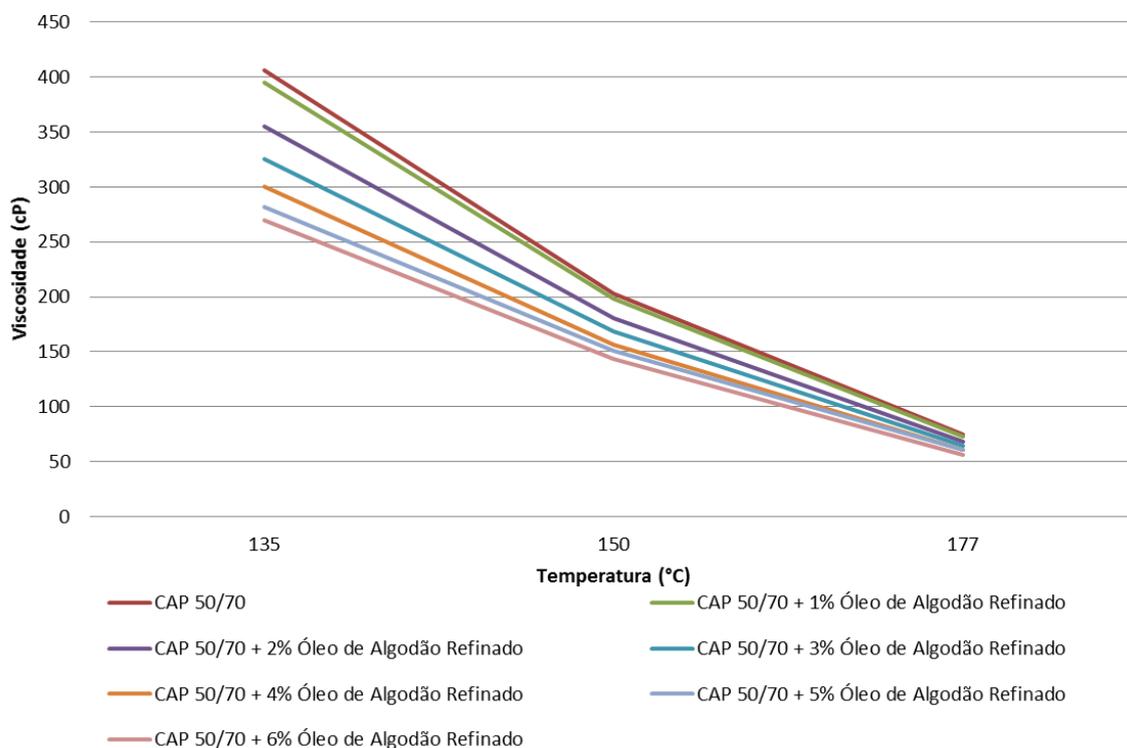
Realizou-se o ensaio de viscosidade rotacional nas amostras com adição dos teores de óleo de algodão refinado antes e após envelhecimento a curto prazo RTFO. Na Tabela 8 estão expostos os resultados obtidos no ensaio antes do envelhecimento nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C. Esse ensaio foi realizado de acordo com critérios estabelecidos na norma NBR 15184.

**Tabela 8:** Ensaio de penetração retida

Amostra	Viscosidade rotacional (cP)		
	135°C	150°C	177°C
CAP 50/70	406,25	202,50	74,75
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Refinado	395,00	198,00	72,50
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Refinado	355,00	181,00	68,00
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Refinado	325,00	168,00	64,50
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Refinado	300,00	156,00	61,00
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Refinado	282,50	151,00	61,00
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Refinado	270,00	143,00	56,50

Na Figura 14 está ilustrado o comportamento apresentado pelos ligantes quando submetidos ao ensaio de viscosidade rotacional.

**Figura 14:** Viscosidade rotacional para os ligantes.



A utilização do viscosímetro rotacional permitiu a realização de uma análise mais eficaz da influência causada ao se adicionar o óleo de algodão refinado sobre o comportamento mecânico do ligante. Isso se dá pelo fato de permitir relacionar a variação da viscosidade com o acréscimo dos teores de óleo.

Ao analisar a Figura 14, percebe-se que houve uma diminuição da viscosidade do ligante com o acréscimo dos teores do óleo de algodão refinado principalmente nas temperaturas mais baixas do ensaio. Bernucci et al. (2008) aponta que a temperatura ideal do CAP para a realização da mistura asfáltica deve se situar em  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s quando medida com o viscosímetro rotacional. Na Tabela 09 são apresentadas as temperaturas de mistura encontradas através de interpolação, para a adição do óleo de algodão refinado.

**Tabela 9:** Temperatura ideal para realização da Mistura Asfáltica após a adição do Óleo de Algodão Refinado.

Amostra	Temperatura ideal para a mistura asfáltica
CAP 50/70	156°C
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Refinado	154°C
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Refinado	152°C
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Refinado	150°C
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Refinado	148°C
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Refinado	147°C
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Refinado	146°C

Os resultados indicam que o acréscimo de óleo de algodão refinado tem grande influência na diminuição da viscosidade do CAP e, portanto, na diminuição da temperatura ideal para a mistura asfáltica. Tal efeito proporcionou uma diminuição da temperatura ideal para a mistura asfáltica em 10°C para o maior teor de óleo de algodão refinado.

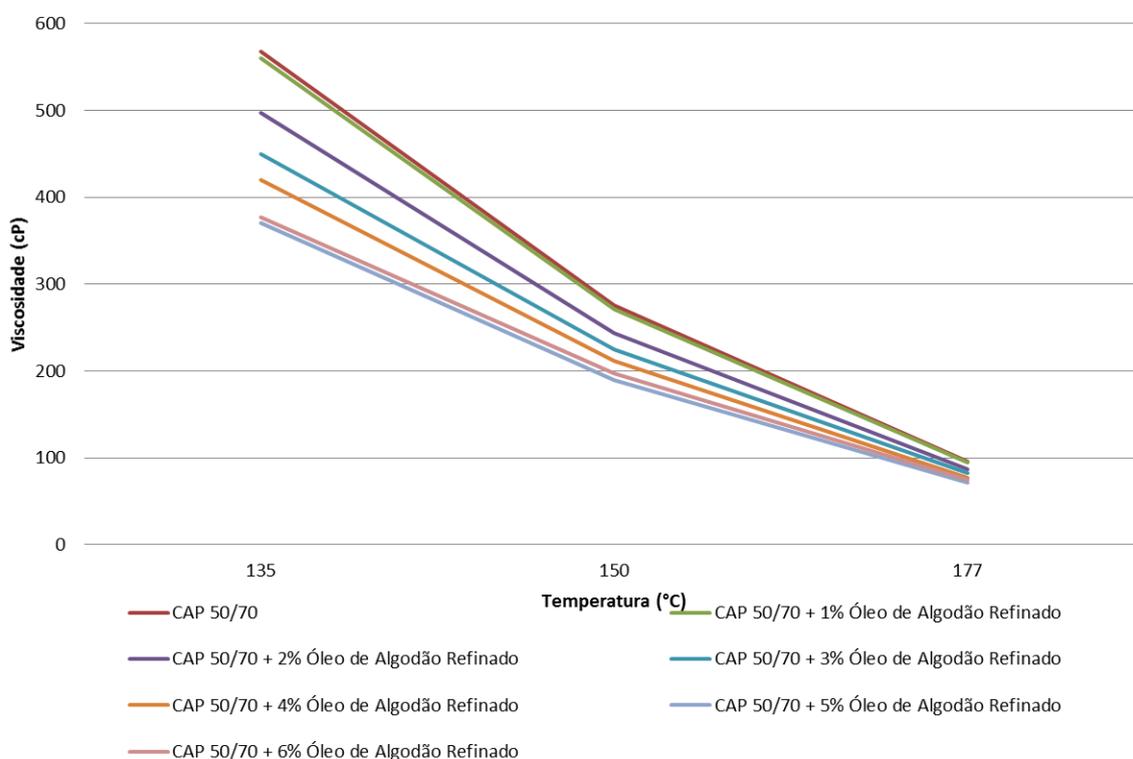
De acordo com o exposto no Federal Highway Administration (FHWA, 2008), misturas consideradas como usinadas a quente possuem temperaturas superiores a 150°C. Ao analisar os resultados expostos na Tabela 9, pode-se então afirmar que o ligante puro e com teores de 1% e 2% de óleo estão classificados como misturas a quente, enquanto que o ligante com teores de 3%, 4%, 5% e 6% enquadram-se como misturas mornas.

Na Tabela 10 e Figura 15, são apresentados os valores da viscosidade rotacional após o envelhecimento a curto prazo RTFO.

**Tabela 10:** Viscosidade rotacional para os ligantes após o envelhecimento a curto prazo RTFO

Amostra	Viscosidade rotacional (cP)		
	135°C	150°C	177°C
CAP 50/70	567,50	275,50	95,50
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Refinado	560,00	271,00	95,00
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Refinado	497,5	244,00	87,00
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Refinado	450,00	225,00	82,00
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Refinado	420,00	211,00	77,50
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Refinado	370,00	189,00	71,50
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Refinado	377,50	197,00	75,00

**Figura 15:** Viscosidade rotacional nas referentes temperaturas após o envelhecimento a curto prazo RTFO.



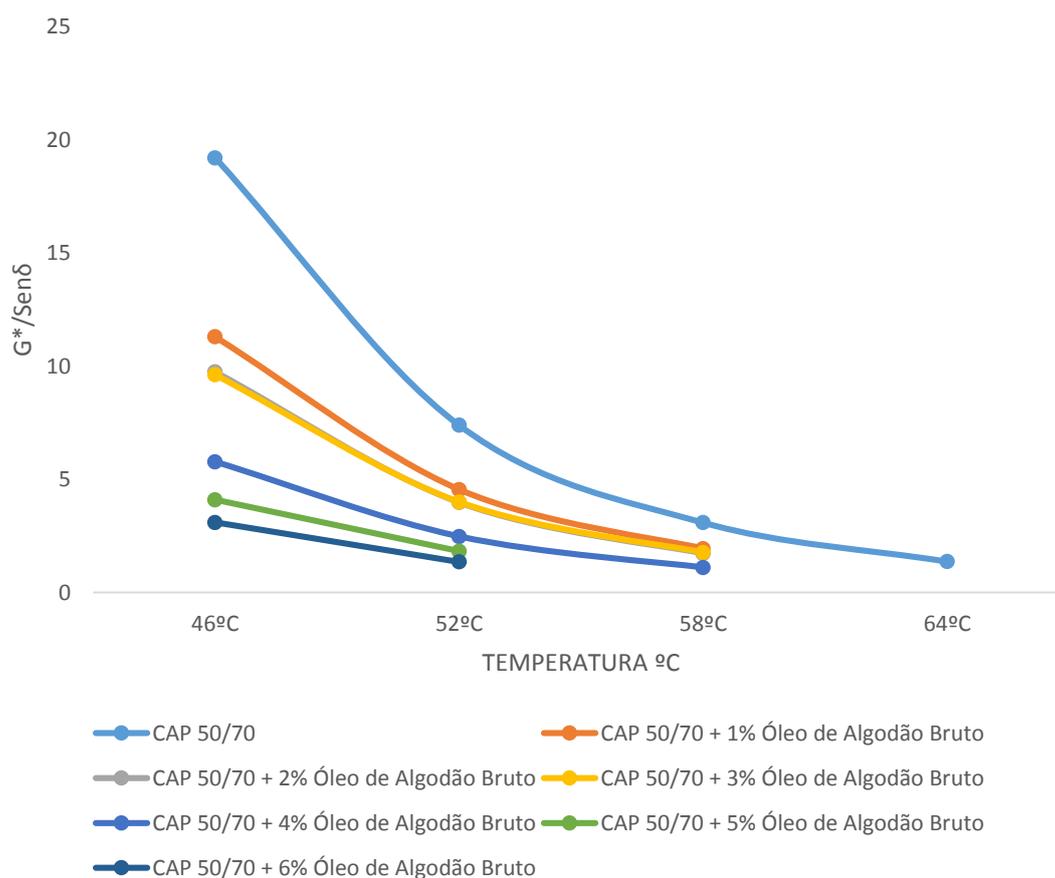
Observando o gráfico dos resultados do ensaio de viscosidade para os ligantes modificados após procedimento de envelhecimento, nota-se a

semelhança de comportamento com o do ligante não envelhecido. Conforme o esperado, as amostras incorporadas com os teores de óleo de algodão aumentaram a viscosidade após o envelhecimento.

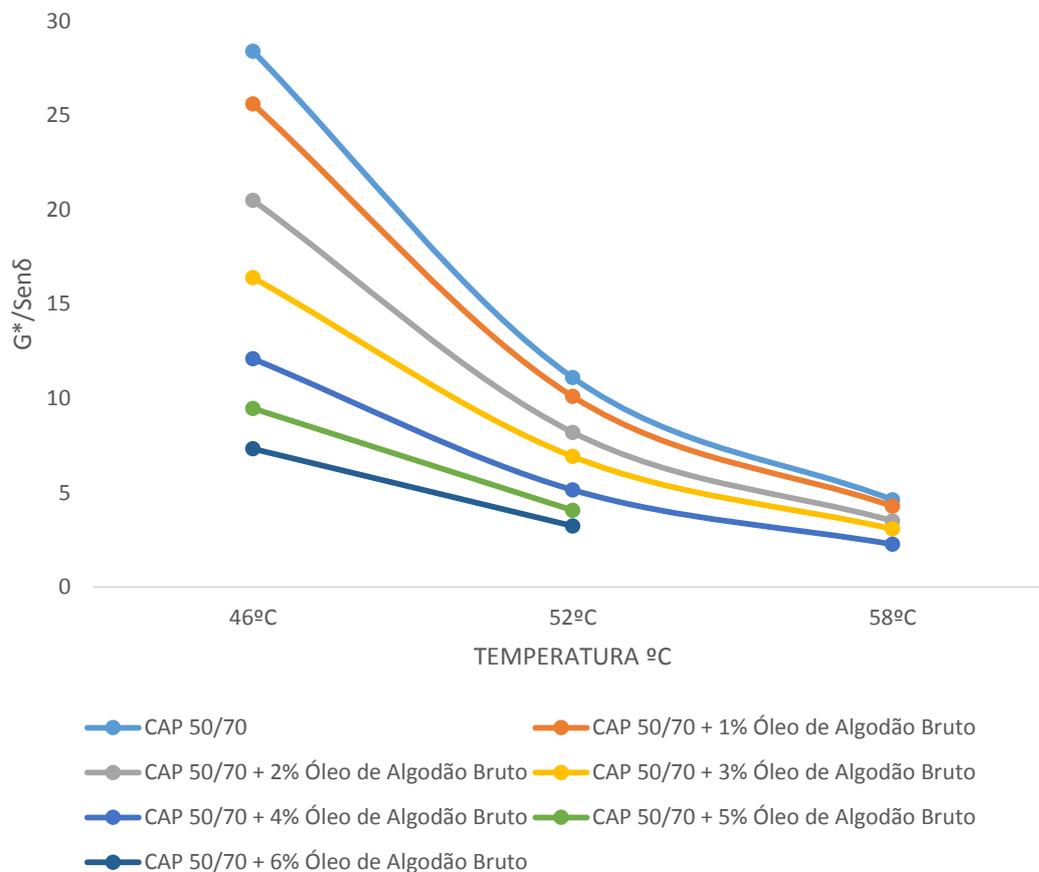
### 5.5 Grau de Desempenho (PG)

Nas Figuras 16 e 17 são ilustradas as curvas  $G^*/\text{sen}\delta$  versus temperatura na faixa de 46°C a 64°C, para as misturas contendo o óleo de algodão refinado antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo, respectivamente. Observa-se que o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  diminuiu com o aumento do teor de óleo e da temperatura.

**Figura 16:** Parâmetro  $G^*/\text{Sen}\delta$  versus temperatura antes do envelhecimento a curto prazo.



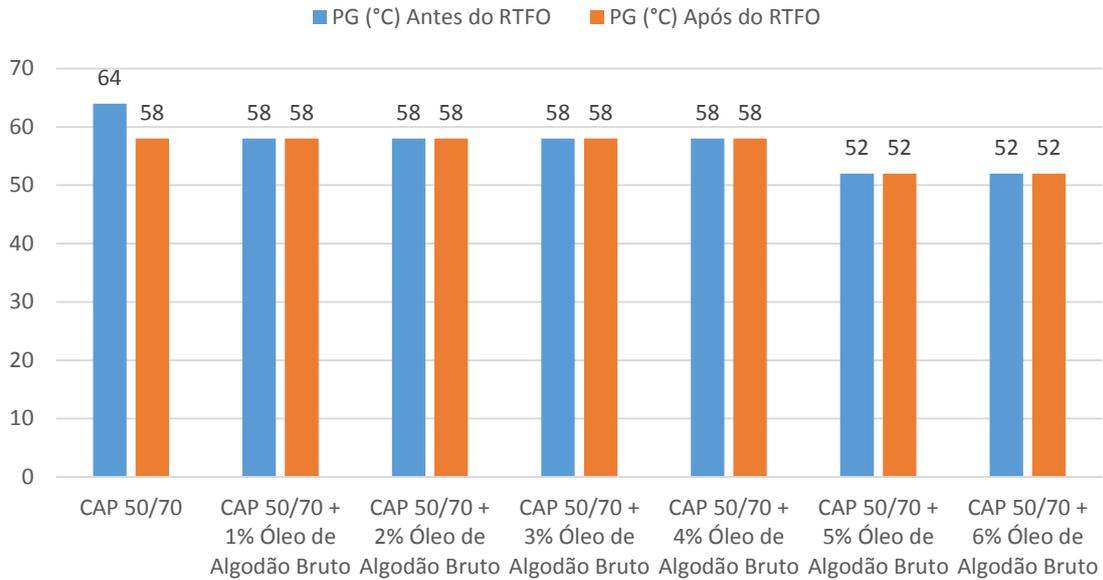
**Figura 17:** Parâmetro  $G^*/\text{Sen}\delta$  versus temperatura após o envelhecimento a curto prazo.



Após o RTFO as misturas ficaram mais rígidas, com parâmetros  $G^*/\text{sen}\delta$  em torno de duas vezes mais elevados do que antes do procedimento, comportamento observado também nos estudos de Ziegler (2017) e Portugal (2016). A diminuição da rigidez com o aumento da temperatura indica um aumento da resistência à fissuração por fadiga. Os resultados obtidos são consistentes com os resultados de ponto de amolecimento e viscosidade rotacional encontrados na literatura.

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 18, percebe-se que o PG obtido para o CAP 50/70 após o envelhecimento se manteve constante do teor de 1% até a adição de 4% de óleo de algodão bruto no valor de 58°C. Nos teores de 5% a 6% do agente modificante, o PG diminuiu em uma classe e foi classificado como sendo de 52°C. Portanto, a partir do teor de 5% o ligante modificado perde parte da sua resistência, podendo ser utilizado apenas para locais onde a temperatura do pavimento de rodagem não ultrapasse os 52°C.

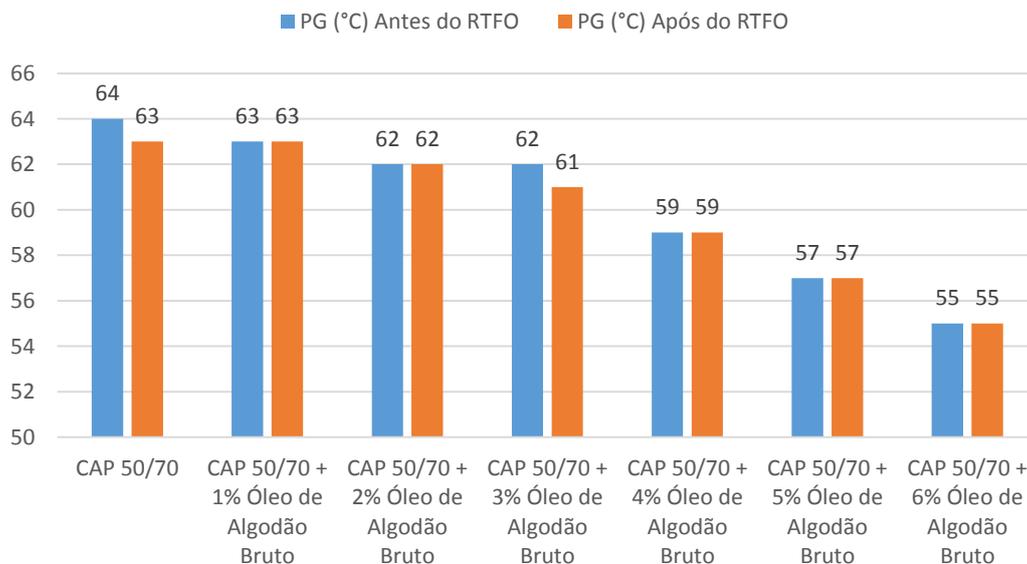
**Figura 18:** Grau de desempenho do ligante asfáltico modificado com o óleo de algodão refinado



### 5.6 Grau de desempenho contínuo

A Figura 19 apresenta os resultados de PG contínuo antes e após o envelhecimento a curto prazo RTFO.

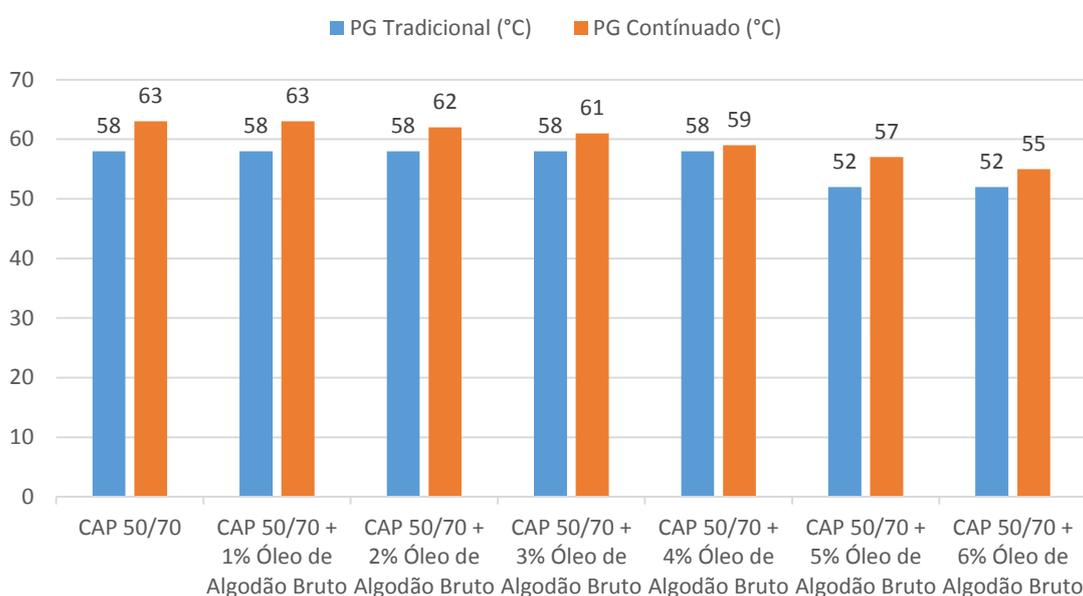
**Figura 19:** Grau de desempenho contínuo do ligante asfáltico modificado com o óleo de algodão bruto antes e após o envelhecimento a curto prazo RTFO



Observando que cada classe do grau de desempenho possui uma amplitude de 6°C, ligantes de diferentes origens podem estar numa mesma classe, porém com diferenças de PG variando em até 6°C. Por isso, destaca-se

a importância de se analisar os ligantes de acordo com a sua variação unitária. Esta variante do ensaio de PG possibilita uma análise mais próxima do comportamento dos ligantes asfálticos modificados com o óleo de algodão refinado. Seguindo o especificado na norma ASTM D6373-15, utilizou-se os valores da temperatura de falha do ligante após o processo de envelhecimento como PG. Foi realizada, também, a comparação entre PG e PG contínuo, (Figura 20).

**Figura 20:** PG tradicional e contínuo do ligante asfáltico modificado com o óleo de algodão refinado.



O fato de o PG variar em amplitude de 6°C também implica na determinação de graus de desempenho mais baixos do que o real. Observando a Figura 19, pode-se notar que no CAP puro e nas misturas com adição de 1%, 2%, 3%, 5% e 6%, a variação do PG tradicional para o PG contínuo é de 3°C a 5°C. O teor de ligante modificado que apresenta uma menor diferença nessa comparação é o de 4%, podendo-se afirmar que o seu valor de PG está próximo do seu verdadeiro ponto de falha.

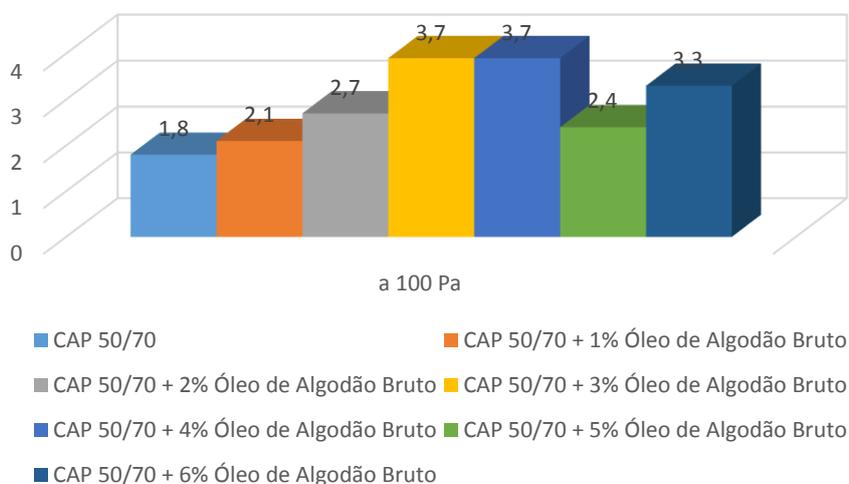
Observa-se então que o teor ótimo vai ficar entre 3% e 4% de óleo de algodão refinado. O CAP com adição de 3% destaca-se aqui pelo fato de possuir a consistência de 61°C muito próximo ao do CAP puro, 63°C, e pelo fato de não apresentar uma perda tão grande quanto o de 4%, 59°C. Porém,

esse teor só pode ser determinado após a avaliação dos resultados obtidos no ensaio de MSCR.

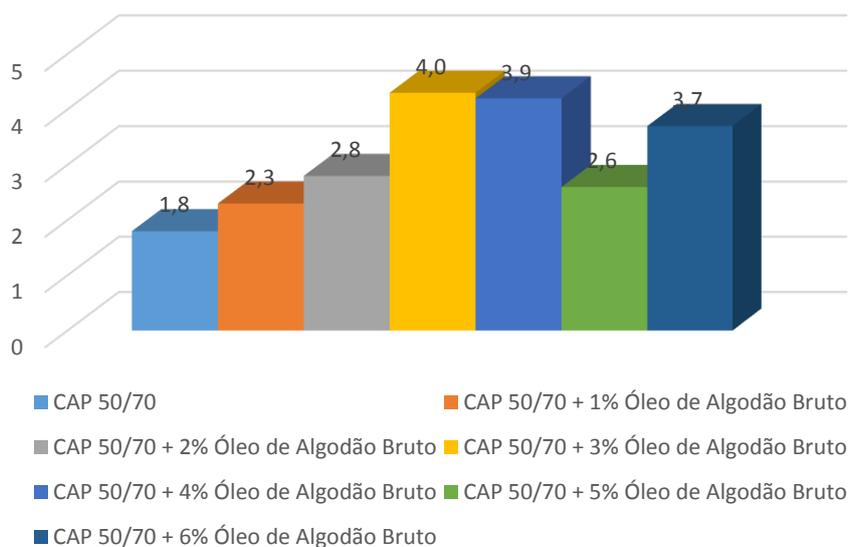
### 5.7 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

Os valores da compliância não-recuperável  $J_{nr}$  a 100 Pa e a 3200 Pa estão ilustradas nas Figuras 21 e 22:

**Figura 21:** Compliância não-recuperável dos ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado, a 100 Pa.



**Figura 22:** Compliância não-recuperável dos ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado, a 3200 Pa.



A análise da compliância permite a classificação do ligante pelo trafego, conforme estão exibidos na Tabela 11:

**Tabela 11:** Classificação do ligante pelo nível de tráfego.

Amostra	Jnr a 3200Pa na temperatura do PG	Nível de tráfego
CAP 50/70	1,8	Pesado
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Refinado	2,3	Padrão
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Refinado	2,8	Padrão
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Refinado	4,0	Padrão
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Refinado	3,9	Padrão
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Refinado	2,6	Padrão
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Refinado	3,7	Padrão

É notável que a compliância não-recuperável dos ligantes asfálticos não possui uma mudança brusca entre as tensões de 100 Pa e de 3200 Pa. De acordo com a classificação da AASHTOO M320, o ligante puro pode ser classificado para tráfego pesado, enquanto que os ligantes adicionados teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6% do óleo de algodão refinado são classificados para tráfego padrão.

Volta-se então à análise da escolha do teor ótimo do ligante asfáltico. Com os resultados obtidos através de avaliações de ensaios anteriores foi possível observar que seria adequado utilizar o teor de 3% ou 4% e, a partir do ensaio de MSCR, observou-se que houve resultados muito próximos dos mesmos teores tratados, optando-se pelo teor de 4% que apresenta uma menor viscosidade e se enquadra na categoria de misturas mornas.

Analisou-se o percentual de recuperação (%R) para a tensão de 3200 Pa e a diferença percentual de Jnr a 100 Pa e a 3200 Pa. Os resultados estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12:** Percentual de recuperação (%R) para a tensão de 3200 Pa e diferença percentual de  $J_{nr}$  a 100 Pa e a 3200 Pa.

Amostras	Percentual de recuperação (%R) para a tensão de 3200 Pa	Diferença percentual de $J_{nr}$ a 100 Pa e a 3200 Pa
CAP 50/70	1,50%	3,80%
CAP 50/70 + 1% Óleo de Algodão Bruto	1,1%	7,10%
CAP 50/70 + 2% Óleo de Algodão Bruto	0,80%	6,70%
CAP 50/70 + 3% Óleo de Algodão Bruto	0,60%	8,80%
CAP 50/70 + 4% Óleo de Algodão Bruto	0,40%	7,00%
CAP 50/70 + 5% Óleo de Algodão Bruto	1,10%	8,50%
CAP 50/70 + 6% Óleo de Algodão Bruto	1,70%	15,00%

O Asphalt Institute (2010) estabelece que deve existir um limite entre a diferença percentual entre a compliância não-recuperável a 100Pa e a 3200Pa de 75%, nota-se que todos se enquadram nesse critério. Desta forma o ligante asfáltico não é excessivamente suscetível a alterações no nível de tensão para os teores de óleo de algodão bruto estudados.

## **6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

### **6.1 Conclusões**

O procedimento de envelhecimento a curto prazo permitiu avaliar as propriedades reológicas (básicas e avançadas) dos ensaios que precisam prever o comportamento sob esta condição de envelhecimento.

Ao medir-se a perda de massa antes e após RTFO, e analisando as especificações da ANP através da resolução N<sup>o</sup> 19/2005, pode-se dizer que os resultados obtidos das variações de massa de todos os teores enquadraram-se nos critérios estabelecidos, não ultrapassando o limite de 0,5%.

Quanto ao ponto de amolecimento, todas as amostras se enquadraram com os critérios da resolução N<sup>o</sup> 19/2005 da ANP que avalia o aumento no ponto de amolecimento. Isso não significa que todas apresentem boa propriedade para aplicação, exemplificando-se o teor de 6% que apresentou ponto de amolecimento de 37,5°C, que é um fator limitante para o seu emprego em locais submetidos a altas temperaturas.

Ao analisar os resultados obtidos através do ensaio de viscosidade rotacional, percebeu-se que quanto maior o teor de óleo adicionado à mistura, menor a viscosidade. Através de interpolação, encontraram-se as temperaturas ideais para as misturas asfálticas, caracterizando-se como misturas mornas apenas os ligantes com teor de 3%, 4%, 5% e 6%. A adição de óleo provocou diminuição da temperatura ideal para a mistura asfáltica em 10°C para o maior teor de óleo de algodão refinado. Notou-se também, como esperado, que após o RTFO houve um aumento geral na viscosidade.

Ao analisar os resultados obtidos com os ensaios de PG tradicional e PG continuado, percebe-se que quanto menor a diferença entre eles mais próximo está do verdadeiro ponto de falha.

Ainda sobre a análise do PG, observou-se que o teor ótimo ficou entre 3% e 4% de óleo de algodão refinado. O CAP com adição de 3% destaca-se pelo fato de possuir a consistência de 61°C muito próximo ao do CAP puro, 63°C, e pelo fato de não apresentar uma perda tão grande quanto o de 4%, 59°C.

A partir do ensaio de MSCR, observou-se que houve resultados muito próximos dos teores de 3% e 4%, optando-se pelo teor de 4% que apresenta uma menor viscosidade e se enquadra na categoria de misturas mornas ao analisar a temperatura ideal para usinagem. A utilização desse teor reduziu a temperatura ideal de compactação da mistura em 8°C.

A análise da viscosidade do ligante tem grande importância devido a necessidade de se envolver com os agregados da mistura e trabalhabilidade em campo. Além de que uma alta viscosidade necessita de altas temperaturas para realizar o processo de pavimentação.

A escolha do teor ótimo de 4% levou em consideração que tanto os resultados de reologia básica (ponto de penetração, amolecimento e variação de massa antes e após RTFO) apresentaram redução aceitável e os reológicos avançados (viscosidade rotacional, PG tradicional, PG continuado e MSCR) indicaram que a perda de consistência do teor 4% não foi tão significativa quanto ao puro.

Chega-se então a conclusão de que a adição do óleo de algodão refinado ao cimento asfáltico de petróleo caracteriza-se como alternativa sustentável. Destaca-se a redução da temperatura e conseqüentemente a redução de emissão de gases tóxicos ao meio ambiente e aos quais os trabalhadores serão expostos. Portanto, a sua utilização é viável do ponto de vista ambiental, econômico e reológico.

## **6.2 Sugestões para futuras pesquisas**

Como sugestão para pesquisas futuras, segere-se:

- Avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas produzidas com a adição dos modificadores utilizados na pesquisa;
- Realizar a análise da composição química dos ligantes modificados por meio do ensaio FTIR;
- Avaliar misturas asfálticas produzidas com temperaturas inferiores às temperaturas determinadas pelo ensaio de viscosidade rotacional brookfield.

## 7. REFERÊNCIAS

AASHTO (2005) M320 – **Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder**.

American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C., EUA.

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

ABNT (2005) NBR 15184 – **Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

ABNT (2009) NBR 15235/09 – **Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.

ANP (2005) 03/2005 – **Classificação por penetração**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Brasil.

ASPHALT INSTITUTE (2010a) **Guidance on the use of the MSCR test with the AASHTO M320 specification**. Asphalt Institute Guidance Document.

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

ASTM (2002) D4402 – **Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus**. American Society for Testing and Materials, EUA.

ASTM (2008) D 7175– **Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. American Society for Testing and Materials, EUA.

ASTM (2008) D 7405 – **Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. American Society for Testing and Materials, EUA.

ASTM (2013) D 2872 – **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. American Society for Testing and Materials, EUA.

ASTM (2015) D6373 – **Standard Specification for Performance Grades Asphalt Binder**. American Society for Testing and Materials, EUA.

ABNT (1990) NBR 7208 – **Materiais betuminosos para emprego em pavimentação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

BALBO, J. T.. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARROS, L, M. **Deformação Permanente De Misturas Asfálticas: Avaliação Do Desempenho Conforme Critério De Flow Number De Misturas Quentes E Mornas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

BELTRÃO, N. E. M.; **O Agronegócio do Algodão no Brasil**, 1ª edição, EMBRAPA, Campina Grande –PB, 1999, V. 1.

BELTRÃO, N. E. M.; PEREIRA, J. R. **A Semente do Algodoeiro I. Uso “In Natura” na Alimentação Animal**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Comunicado Técnico. Campina Grande, PB, 2000.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

CARVALHO, L. P. **Melhoramento do Algodoeiro Herbáceo Visando ao Aumento do Teor de Óleo nas Sementes**. Campina Grande, PB. ISSN 0103 – 0205. Embrapa Algodão, 2015.

CAVALCANTI, L, S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligante na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

CONCESSIONÁRIA DA RODOVIA OSÓRIO-PORTO ALEGRE S/A- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO. **Estudo de misturas asfálticas “mornas”**. Porto Alegre, 2007.

COSTA, D. B.; CAVALCANTE, F. P.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDOÇA, A. M. G. D.; LIRA, Y. C. **Influência da adição do óleo de linhaça nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo**. 44º RAPV e 17º ENACOR. Maceio, 2015.

DANTAS, H, J. **Estudo Termoanalítico, Cinético e Reológico de Biodiesel Derivado do Óleo de Algodão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Atlas do transporte 2015 - 2016**. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 15 de março de 2018.

D'ANGELO, J.; DONGRÉ. R. **Practical use of multiple stress creep and recovery test: Characterization of styrene-butadiene-styrene dispersion and other additives in polymer-modified asphalt binders**. Transportation research record. Washington D. C., 2009.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Publicação IPR - 720, 2006.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2006.

FABIANO, A. R. **Produção de Óleo Vegetal de Algodão com Processo Misto**. Projeto de Conclusão de Curso. Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis. Assis, SP, 2012.

FÉLIX, G. B. **Estudo da Incorporação de Resíduo Polimérico no Asfalto – Propriedades Físicas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2009.

GRECO, J. A. S. **Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – UFSCAR, São Carlos, SP, 2004.

IBP. **Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos**. 7ª ed. IBP/Comissão do Asfalto. Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L.F.M. **Estudos de Preparo e Caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

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**. artigo 11681, pp.65-75, 2016.

LUCENA, M. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros.** Tese (Doutorado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2005.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.

MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.** Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.

Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil; Empresa de Planejamento e Logística S.A. **Anuário Estatístico de Transportes 2010-2016.** Brasil, Governo Federal, 2016.

MORETTO, Eliana; FETT, Roseane. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos.** São Paulo: Editora Varela, 1998.

MOTHÉ, M. G. **Estudo Do Comportamento De Ligantes Asfálticos Por Reologia e Análise Térmica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

MOTTA, R. S. **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético.** Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011

MOURA, E. **Estudo De Deformação Permanente Em Trilha De Roda De Misturas Asfálticas Em Pista E Em Laboratório.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NOGUEIRA, M. G. **Comparação do Comportamento em Campo de Concretos Asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para Revestimentos de Pavimentos.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo SP, 2008.

PENZ, G. **Propriedades Mecânicas De Misturas Asfálticas Mornas Com Adição De Zeólitas Sintetizadas.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2010.

PEREIRA, G. S. **Estudo da Interação Química e do Comportamento Reológico de Asfaltos Modificados por Terpolímero de Etileno-Acrilato de Metila-Metacrilato de Glicidilae Ácido Polifosfórico.** Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2016

PETER, E. A. **Simulação de Deformação Permanente em Camadas Asfálticas: Dependência da Velocidade de Aplicação da Carga e da Temperatura.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

PETROBRÁS. **Asfalto – Informações Técnicas.** v 1.1. 2015. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/>. Acesso em: 15 de março de 2018.

PORTUGAL, A. C. X. **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

PUTTI, F. F.; LUDWIG, R.; MACINI, N. **Análise da Viabilidade da Produção de Biodiesel a Partir do Uso do Algodão.** VIII Fórum Ambiental da Alta Paulista, v.8, n.7, 2012, p. 127-142, 2012.

RIBEIRO, Thiago Pinheiro. **Estudo Descritivo das Principais Patologias em Pavimento Flexível.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 04. Ano 02, Vol. 01. pp 733-754, Julho de 2017.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D-Y; KENNEDY, T. W. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction - NAPA Educational Foundation - Lanham, Maryland, 1998.**

RODRIGUES, A. R. S. **Caracterização Química e Reológica do Cimento Asfáltico de Petróleo Utilizado na Cidade de Manaus Modificado por Borracha Moída de Pneus Inservíveis e Polímeros.** Dissertação de Mestrdo. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, AM, 2006.

SALINI, R, B. **Utilização De Borracha Reciclada De Pneus Em Misturas Asfálticas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2000.

SILVA, A. O. **Estudo do Comportamento Reológico de Ligantes Asfálticos: CAP 50-70, CAP 55-75 e CAP AB-8.** Trabalho de Conclusão de Curso. Araruna, PB, 2017.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2011.

SILVA, J. P. S.; ARAUJO, R. F. **Estudo do Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos a Partir do Modelo de Arrhenius.** Revista Desafios. Aparecida de Goiania, v. 00, n. 00, 2016.

SOUZA, J.L.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, 2012.

ZIEGLER, C, R. **Avaliação da Adição do Óleo de Algodão Bruto nas Propriedades Reológicas do Cimento Asfáltico de Petróleo.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2017.