



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
CAMPUS CAMPINA GRANDE - PB

ANÁLISE REOLÓGICA DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM CAL  
HIDRATADA

**Adriana Albuquerque Ferreira**

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena**  
**Co-orientador: Valter Ferreira de Sousa Neto**

CAMPINA GRANDE - PB

2018

ADRIANA ALBUQUERQUE FERREIRO

ANÁLISE REOLÓGICA DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR CAL  
HIDRATADA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
requisito obrigatório para a obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena**  
**Co-orientador: Valter Ferreira de Sousa Neto**

CAMPINA GRANDE - PB

2018

ADRIANA ALBUQUERQUE FERREIRO

ANÁLISE REOLÓGICA DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR CAL  
HIDRATADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação da Profª Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_. Nota: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

(Assinatura): \_\_\_\_\_  
Profª. D. Sc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena  
(Orientadora)  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): \_\_\_\_\_  
Valter Ferreira de Sousa Neto  
(co-orientador)  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura): \_\_\_\_\_  
Profº. D.Sc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
(Examinador interno)  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura): \_\_\_\_\_  
Profº. M.Sc. Jonny Dantas Patrício  
(Examinador externo)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais Marcelino e Francimar, por todo o suor que derramaram para que eu pudesse estar realizando um sonho.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela graça da vida, sabedoria e força de vontade. Por Sua infinita bondade e proteção.

Ao meu pai e minha mãe por serem meus pilares, acreditarem no meu potencial e não medirem esforços para a minha formação acadêmica.

À minha irmã Dollores por ser um exemplo de força e dedicação. Ao meu irmão Senna, pela confiança, amizade e por privar seu estudo para que eu pudesse concluir o meu.

Às minhas duas irmãs de vida Anne Kelly Machado e Mila Thais Rezende, por me permitirem compartilhar felicidades, tristezas, batalhas e vitórias, além de contribuírem significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu primo Thallysson por ter sido o incentivador inicial para que eu começasse meus estudos buscando meu crescimento longe de casa. Por sua amizade e luz esfuziante.

À minha segunda família formada pelos meus amigos em Campina Grande, que sempre foram suporte para uma formação sólida, tanto de conhecimentos, quanto de amizade. Em especial à Gabriel, Ayllanderson, Moema, Caison, Ingrid, Osires, Bervylly, Lucas, Fernando, Moisés, Carmem, Débora, Maria Alinne, Luciene, Júllia, Maria Luiza, Mateus Rodrigues e Matheus Leal, por estarem desde o início da graduação ao meu lado me incentivando e ajudando em todas as batalhas.

Ao amigo engenheiro Jordy Nascimento por ter me auxiliado em todo o processo de estágio, por sua bondade e amizade. Aos engenheiros Sarmiento e Leonardo que, juntamente ao engenheiro Jordy, me ensinaram tudo o que sei da prática da profissão.

Ao mestrando e co-orientador Valter Ferreira de Sousa Neto pelo apoio e orientação constante durante toda a realização deste trabalho, fornecendo tempo e dedicação, contribuindo substancialmente para a boa realização da pesquisa.

À orientadora Lêda Christiane Figueiredo de Lopes Lucena, pelo apoio e atenção durante o direcionamento e orientação deste trabalho.

Aos mestrandos Priscila e Christian, além do aluno de PIBIQ Conrado César e ao doutorando Daniel, por terem ajudado na realização dos ensaios, além de repassar conhecimentos importantes para a realização da pesquisa.

Aos técnicos Jadilson Trigueiro e Joseildo Cunha, pelo apoio na fase experimental.

À todos que contribuíram de forma direta e indireta para a realização desta pesquisa e conclusão desta etapa da minha vida.

## RESUMO

Nas últimas décadas, o aumento significativo do tráfego nas vias pavimentadas tem acelerado a deterioração dos revestimentos asfálticos. Por conta disso, tem-se estudado o uso de aditivos para modificar as propriedades do ligante asfáltico de modo a melhorar o desempenho em relação à, principalmente, deformações permanentes e vida de fadiga. Este trabalho avalia as alterações nas propriedades físicas e reológicas do CAP 50/70 modificado com partículas fracionadas de cal hidratada, obtidas a partir do uso de um moinho de bolas. Para isto foram realizados ensaios convencionais (penetração, viscosidade rotacional e ponto de amolecimento) e no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). O CAP 50/70 foi modificado com adição de partículas fracionadas de cal nos teores de 3%, 5% e 7% em massa do ligante puro. Os resultados nos ensaios empíricos, tanto os ligantes puro e como modificados, atenderam aos limites preconizados pela ANP e DNIT. As amostras modificadas apresentaram menor perda de massa no envelhecimento à curto prazo, se mostrando uma alternativa antioxidante. Além disso verificou-se que os ligantes modificados proporcionaram aumento do  $G^*$  (parâmetro de rigidez) e, conseqüentemente, da temperatura máxima de Performance Grade (PG), permitindo o uso dos ligantes estudados em temperaturas mais altas. O ligante modificado com teor de 5% de cal hidratada apresentou melhores resultados nos ensaios de deformação permanente (MSCR e LAS). Por fim, foi possível estabelecer que a adição de partículas fracionadas de cal hidratada ao CAP 50/70 é uma técnica viável e eficaz que atende aos requisitos do DNIT para uso em pavimentação.

**Palavras Chave:** CAP, Cal Hidratada, Envelhecimento, Reologia.

## ABSTRACT

In the last decades, the significant increase of the traffic in the paved roads has accelerated the deterioration of the asphaltic coverings. Because of this, the use of additives has been studied to modify the properties of the asphalt binder, in order to improve the service performance mainly related to permanent deformations and fatigue life. This work proposes to evaluate changes in the physical and rheological CAP50/70 properties modified with fractionated hydrated lime particles, from the use of a ball mill. For that purpose, conventional tests were performed (penetration, rotational viscosity and softening point) and in the dynamic shear rheometer (DSR). The mixtures were performed with the addition of lime fractions at 3%, 5 % and 7% by mass of the pure binder. The results in the empirical tests, both the pure binder and the modified binder have met the recommended limits by the ANP and DNIT. The modified samples showed a lower loss of mass in the short term aging, showing an antioxidante alternative. In addition, it was found that the modified binders increase of the  $G^*$  (stiffness parameter) and, consequently, of the maximum of Performance Grade (PG), allowing the use of binders studied at higher temperatures, increased rigidity, enabling the use of binders studied at higher temperatures. The modified binder with 5% content of hydrated lime presented better results in the permanent deformation tests. Finally, it was possible to established that the fractional particles of hydrated lime addition to the CAP 50/70 is a feasible and effective technique that meets the requirements DNIT for use in paving.

**Keywords:** Aging, CAP, Hydrated Lime, Rheology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de blocos da classificação de ligantes asfálticos segundo o DNIT. ....	15
Figura 2: Esquema da análise química do ligante asfáltico.....	17
Figura 3: Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento.....	20
Figura 4: Trincas isoladas .....	28
Figura 5: Trincas intercaladas .....	28
Figura 6: Deformação Permanente nas Trilhas de Roda.....	29
Figura 7: Layout do procedimento utilizado no viscosímetro rotacional.....	32
Figura 8: Layout de um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).....	33
Figura 9: Relações entre o Módulo Complexo ( $G^*$ ), seus componentes ( $G'$ ), ( $G''$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ).....	33
Figura 10: Varredura de amplitude de amostra de ligante asfáltico.....	37
Figura 11: Modelo de fadiga .....	38
Figura 12: Moinho de bolas de alta energia .....	43
Figura 13: Penetrômetro.....	44
Figura 14: Realização do ensaio de ponto de amolecimento .....	45
Figura 15: Viscosímetro Brookfield.....	46
Figura 16: RTFO (Rolling Thin Film Oven).....	47
Figura 17: Reômetro de cisalhamento direto (DSR) do Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/UFMG.....	48
Figura 18: Análise granulométrica da cal hidratada fracionada.....	51
Figura 19: Resultados Ensaio de Penetração.....	52
Figura 20: Relação da penetração retida .....	53
Figura 21: Resultados Ensaio Ponto de Amolecimento .....	54
Figura 22: Variação dos pontos de amolecimento .....	55
Figura 23: Gráfico Viscosidade x Temperatura .....	57
Figura 24: Gráfico Viscosidade x Temperatura (pós RTFO).....	57
Figura 25: Incremento de viscosidade após envelhecimento .....	58
Figura 26: Resultados da variação de perda de massa por procedimento RTFO .....	60
Figura 27: Curvas do $G^*/\sin\delta$ versus temperatura .....	61
Figura 28: Curvas do $G^*/\sin\delta$ versus temperatura após envelhecimento à curto prazo .....	62
Figura 29: Grau de desempenho do CAP 50/70 e teores das partículas fracionadas .....	63
Figura 30: Valores da compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) .....	64
Figura 31: Porcentagem da recuperação a 100Pa e a 3200Pa para o ligante puro e amostras modificadas .....	65
Figura 32: Valores de $J_{nr}$ diff (%) dos ligantes estudados.....	66
Figura 33: Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável .....	67
Figura 34: Parâmetros A e B para CAP 50/70 e ligantes modificados .....	68
Figura 35: Estimativa da vida de fadiga do CAP 50/70 nos teores de 0%, 3%, 5% e 7% de cal ...	68

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Defeitos evitados com o uso da cal hidratada como modificador do ligante asfáltico.....	21
Tabela 2: Caracterização das propriedades físicas do ligante puro utilizado nesta pesquisa .....	41
Tabela 3: Características físico-químicas e granulometria da cal utilizada na pesquisa .....	42
Tabela 4: Análise granulométrica das porcentagens cumulativas .....	50
Tabela 5: Índices de suscetibilidade térmica do ligante .....	56
Tabela 6: Resultados Ensaio Viscosidade Rotacional.....	56
Tabela 7: Resultados Ensaio Viscosidade Rotacional pós RTFO.....	57
Tabela 8: Temperaturas de Usinagem e Compactação dos ligantes.....	59
Tabela 9: Resultados Procedimento RTFO .....	60
Tabela 10: Temperaturas de falha para ligantes puro e modificados .....	63
Tabela 11: Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de Jnr .....	65
Tabela 12: Valores estimados para vida de fadiga do ligante puro e teores de cal .....	69

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Principais modificadores de ligantes asfálticos (NCHRP, 2001).....	22
--	----

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1.	Objetivos .....	14
1.1.1.	Objetivo Geral .....	14
1.1.2.	Objetivos Específicos .....	14
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1.	Ligantes asfálticos .....	15
2.1.1.	Composição química dos Ligantes Asfálticos.....	16
2.1.2.	Envelhecimento dos ligantes asfálticos .....	18
2.2.	Modificadores de ligantes asfálticos.....	20
2.2.1.	Ligantes asfálticos modificados com cal hidratada.....	23
2.2.2.	Produção de partículas de cal hidratada em escala nanométrica.....	24
2.2.3.	Ligantes modificados com nanopartículas de cal.....	25
2.3.	Defeitos nos pavimentos .....	27
2.4.	Reologia dos ligantes asfálticos.....	30
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
3.1.	Materiais .....	41
3.1.1.	Ligante asfáltico.....	41
3.1.2.	Cal.....	42
3.2.	Métodos .....	42
3.2.1.	Procedimento de moagem .....	42
3.2.2.	Procedimento de mistura .....	43
3.2.3.	Caracterização dos Ligantes Asfálticos .....	43
3.2.3.1.	Penetração.....	44
3.2.3.2.	Ponto de amolecimento .....	45
3.2.3.3.	Viscosidade Rotacional .....	46
3.2.4.	RTFO (Envelhecimento) .....	46
3.3.	Ensaio reológicos.....	47
3.3.1.	Performance Grade .....	48
3.3.2.	MSCR (Multiple Stress Creep Recovery).....	48
3.3.3.	LAS (Linear Amplitude Sweep) .....	49
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>50</b>
4.1.	Moagem da cal.....	50
4.2.	Propriedades físicas do ligante modificado .....	51
4.2.1.	Ensaio de Penetração.....	51
4.2.2.	Ensaio de Ponto de Amolecimento .....	53
4.2.3.	Ensaio de Viscosidade Rotacional .....	56
4.3.	Propriedades reológicas dos ligantes modificados.....	61
4.3.1.	Grau de desempenho (PG).....	61

4.3.2.	Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) .....	63
4.3.3.	Varredura linear de amplitude (LAS) .....	67
5.	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>70</b>
5.1.	Sugestões para pesquisas futuras .....	70
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>72</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento do volume de tráfego, o excesso de cargas e a carência de manutenção têm contribuído para a degradação prematura dos pavimentos asfálticos. Devido à magnitude e a repetição de aplicação de cargas, com o passar do tempo, desenvolvem-se patologias na estrutura dos pavimentos. Essas degradações ocorrem principalmente na formação de deformações permanentes e de trincas por fadiga.

A formação de trilhas de rodas é um tipo de deformação permanente do pavimento que comumente leva a perda da regularidade e serventia do mesmo, problema que se acentua em temperaturas de serviço mais elevadas. Fissuras por fadiga normalmente causam danos severos à estrutura do pavimento e as fissuras térmicas, perpendiculares a ação do tráfego, ocorrem devido a exposição do pavimento à baixas temperaturas (FERNANDES, 2009).

Outro ponto que se deve dar ênfase é em relação ao envelhecimento do ligante asfáltico. Este processo pode ocorrer tanto durante sua usinagem quanto na compactação e, também, ao decorrer da sua vida de serviço. A oxidação, principal causa deste fenômeno, aumenta a consistência do ligante que, em amplitudes exageradas, pode diminuir significativamente a vida útil do revestimento (TONIAL, 2001).

Uma opção para promover o aumento da vida útil dos pavimentos é a adição de modificadores de ligantes asfálticos que elevem a resistência à fadiga e minimizem as deformações permanentes. Para isto tem-se utilizado técnicas de modificação de ligantes asfálticos, e.g. polímeros, fíleres, fibras e recentemente os nanomateriais, que têm apresentado viabilidade técnica e econômica para este fim (MARINHO FILHO, 2017).

Entre estes modificadores, a cal hidratada incorporada à mistura asfáltica vem sendo amplamente utilizada. Esta incorporação enrijece a mistura, tornando-a mais resistente a deformações permanentes, retarda o trincamento ocasionado pela fadiga, e ainda melhora a adesividade entre o agregado e o ligante. Outra característica observada é que a cal reduz o teor de ligante asfáltico quando utilizada como fíler, o que diminui os custos da execução de pavimentos (NÚNEZ et al., 2007).

Nanotecnologia é a tecnologia que envolve a fabricação de estruturas, aparelhos e sistemas com propriedades e funções novas devido a arranjos dos seus átomos na escala de 1 a 100 nanômetros ou menos. Dentre os materiais nanoestruturados têm-se as nanopartículas, nanocristais, nanofios, nanofitas, nanotubos e nanocompósitos.

Kavussi & Barghabany (2015) mostraram que a utilização de nanopartículas de cal

hidratada podem incrementar a vida útil de um pavimento quanto a fadiga. Os autores realizaram ensaios de varredura de amplitude (LAS), cujos resultados indicaram que a amostra que continha 10% de nano cal apresentou resistência a fadiga 49% superior àquela contendo 10% de cal hidratada. Os autores determinaram que 5% de cal nano-hidratada foi a quantidade ótima desse material a ser adicionado ao ligante.

Diab et al. (2013) usaram cal hidratada e nano cal (com tamanhos de 50 nm e 100 nm, respectivamente) para analisar a diferença que se obteria nas propriedades reológicas do ligante asfáltico para misturas quentes. As nano partículas de cal foram adicionadas ao aglutinante de asfalto a proporções de 5%, 10% e 20% (em peso) e estudadas no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). Os autores concluíram que a aplicação da cal hidratada com o teor de 20% por peso de aglutinante pode ser substituída pela adição de quase 5% (em peso) de nano partículas de cal (50 nm).

Tendo em vista o exposto acima, este trabalho tem como objetivo avaliar a adição da cal hidratada, moída no moinho de bolas, no ligante asfáltico por meio de ensaios físicos e reológicos.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Avaliar o efeito da incorporação de cal hidratada moída,  $Ca(OH)_2$ , como agente modificador do ligante asfáltico (CAP 50/70), nas propriedades físicas e reológicas.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- avaliar a utilização de moinho de bolas para a produção de nanopartículas de cal;
- avaliar os efeitos da incorporação de cal hidratada fracionada nas propriedades físicas e reológicas de ligantes asfálticos;
- estudar a influência da incorporação de cal hidratada fracionada no envelhecimento dos ligantes asfálticos submetidos ao procedimento RTFO.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

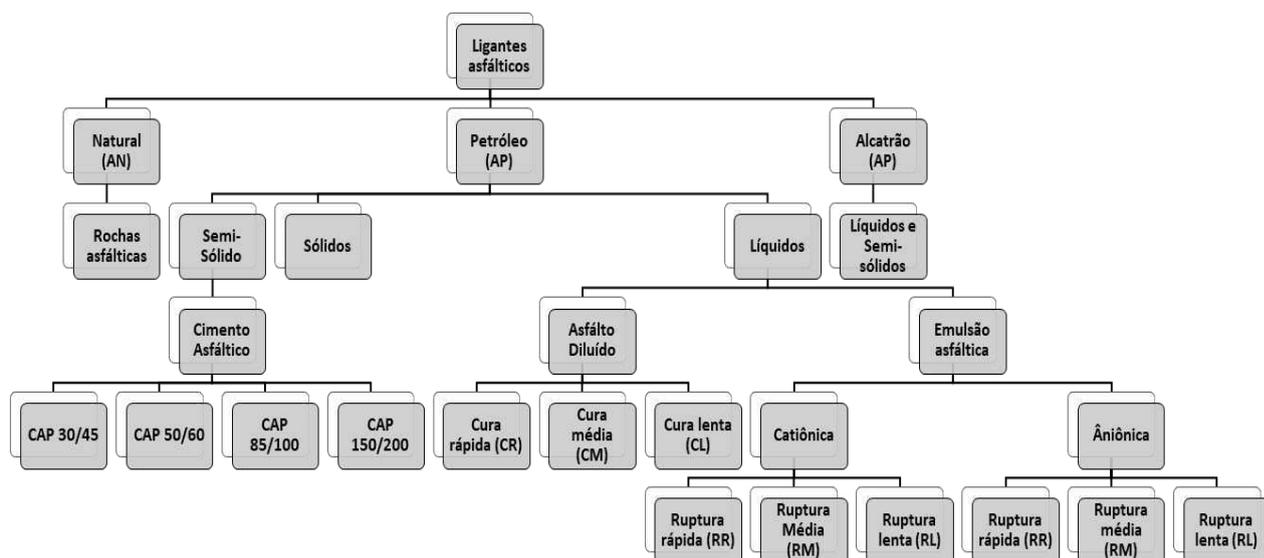
### 2.1. Ligantes asfálticos

Ligante asfáltico pode ser definido como “[...] mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção.” (BERNUCCI et al., 2010).

Para que o ligante asfáltico tenha um desempenho satisfatório no pavimento, ele deve apresentar propriedades diferenciadas no que diz respeito ao comportamento dos demais materiais asfálticos, como maior coesão e adesão aos agregados, grande resistência ao envelhecimento, susceptibilidade térmica adequada a faixa de utilização de temperatura do pavimento, alta resistência à fadiga e à deformação térmica.

Os ligantes asfálticos possuem três grandes divisões: ligante asfáltico natural (asfalto natural), ligante asfáltico de petróleo (asfalto de petróleo) e alcatrão. A Figura 1 apresenta os tipos de ligantes asfálticos e seus derivados.

Figura 1: Diagrama de blocos da classificação de ligantes asfálticos segundo o DNIT.



Fonte: Adaptado do DNIT, 1996.

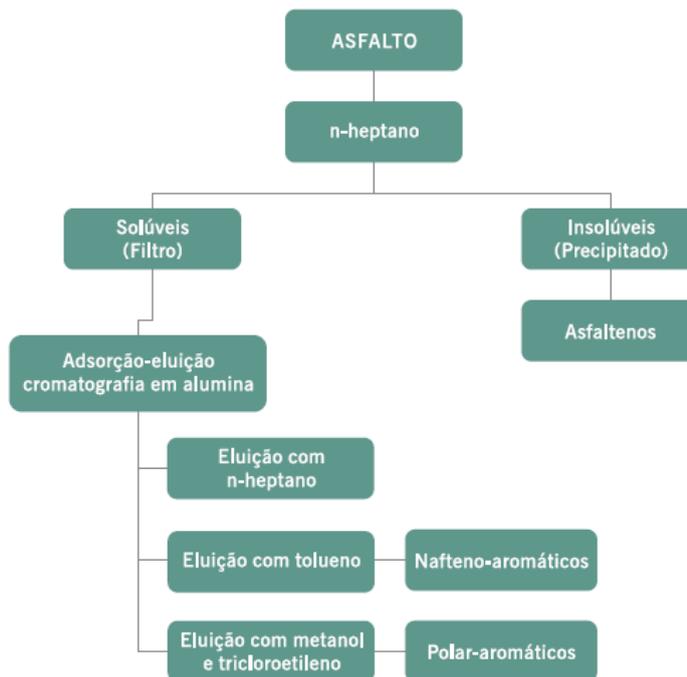
Os ligantes asfálticos podem ser divididos em basicamente dois tipos: os destinados a pavimentação e os destinados a indústria. Os ligantes para pavimentação são: cimento asfáltico, asfalto diluído, emulsão asfáltica e asfalto modificado. Os asfaltos industriais são os asfaltos oxidados e os asfaltos modificados para impermeabilização. Um dos pontos que diferenciam esses ligantes asfálticos é sua composição química.

### **2.1.1. Composição química dos Ligantes Asfálticos**

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática. Existem perto de 1.500 tipos de petróleo explorados no mundo, porém somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto (SHELL, 2003).

A composição química do ligante asfáltico tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas. O tipo de fracionamento pelo qual o ligante é submetido também é fator que influencia na sua composição química. O método empregado para separar os constituintes é conhecido como SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos). Na cromatografia, o ligante é diluído em n-heptano e um filtro capta a parte solúvel, genericamente denominada maltenos que compreendem os saturados, aromáticos e resinas, enquanto que a parte insolúvel precipitada são os asfaltenos. A Figura 2 mostra a representação esquemática desses componentes do ligante asfáltico (SHELL, 2003).

Figura 2: Esquema da análise química do ligante asfáltico



Fonte: adaptado de Shell, 2003

Bernucci et al. (2010) apresenta os quatro principais constituintes extraídos pelo SARA e os define da seguinte maneira:

- a) asfaltenos: a coloração do ligante preto ou marrom escuro é conferida por esta parcela. Composição formada por aglomerados de compostos polares e polarizáveis formados por associações intermoleculares, constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas. Constituem entre 5% a 25% do ligante asfáltico, refletindo na dureza e viscosidade (quanto maior o percentual de asfaltenos, mais duro e mais viscoso será o ligante).
- b) resinas: responsáveis pelo comportamento como solução (Sol) ou como gelatina (Gel), são compostos de hidrogênio e carbono, com pequena proporção de oxigênio, enxofre e nitrogênio. São sólidos ou semissólidos marrom-escuros com natureza polar fortemente adesiva.
- c) aromáticos: líquido viscoso amarelo polar, participando em maior proporção no asfalto (40 a 65%).

- d) saturados: óleos viscosos não-polares transparentes, compondo de 5 a 20% dos asfaltos.

O ligante asfáltico é composto de 90% a 95% de hidrocarbonetos e de 5% a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes, e cujas propriedades físicas estão associadas à sua temperatura. Em temperaturas baixas, o ligante se comporta quase como um sólido e à medida que a temperatura aumenta, a viscosidade diminui e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido. Esse comportamento o torna um material termoviscoelástico. Desta forma, a avaliação da susceptibilidade térmica dos ligantes é um dos critérios mais utilizados de classificação, fazendo a medição direta ou indiretamente da sua consistência ou viscosidade em diferentes temperaturas (BERNUCCI et al., 2010).

Em 1987, nos Estados Unidos, os estudos do Strategic Highway Research Program (SHRP) produziram a metodologia SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) com os objetivos de estender a vida útil do pavimento e reduzir os custos de sua manutenção, minimizando falhas prematuras.

Essa metodologia desenvolve especificações para o controle de três principais defeitos dos pavimentos flexíveis: deformações permanentes, trincamento por fadiga e trincas térmicas. Com enfoque nestes defeitos, as especificações SUPERPAVE classificam o ligante em função da temperatura, ou seja, se baseia na realização de medidas das propriedades reológicas do ligante sobre o efeito de diferentes temperaturas, estimando faixas em que o ligante pode ser utilizado. Estas faixas são denominadas Grau de Desempenho (PG), e podem ser definidas por duas temperaturas limites, sendo uma máxima, que garante a resistência à deformação permanente e uma mínima, que indica a resistência a formação de trincas térmicas (LUCENA et al., 2005).

### **2.1.2. Envelhecimento dos ligantes asfálticos**

Atualmente, um dos grandes desafios da pavimentação é reduzir o envelhecimento do ligante asfáltico durante todo o seu ciclo de aplicação, pois este oxida lentamente quando em contato com o ar.

Envelhecimento de um ligante asfáltico é o processo de endurecimento sofrido durante a estocagem, usinagem, aplicação e em serviço. Há o aumento na consistência, resultado da

alteração de suas características físicas, químicas e reológicas, resultando em um comportamento em serviço diferente daquele apresentado nos ensaios de laboratório.

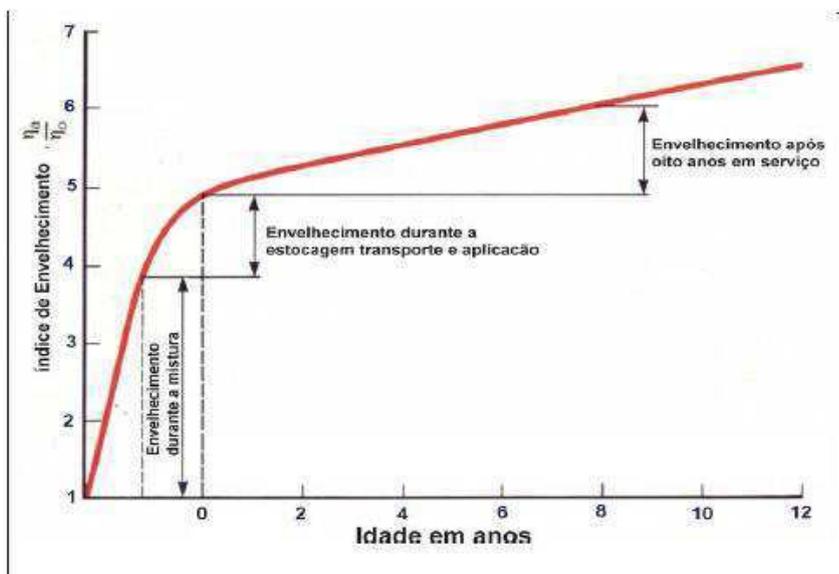
*Asphalt Experiments at Washington* foi o primeiro estudo realizado sobre envelhecimento de ligante asfáltico, por A. W. Dow, ocorrido no ano de 1903. Como produto da pesquisa concluiu-se que o aquecimento do ligante asfáltico reduzia o peso e a penetração do ligante recuperado de misturas (BELL et al, 1994).

Estudo realizado pela Petrobrás (1992) verificou que os principais fatores que influenciam no envelhecimento de um ligante asfáltico a curto prazo, considerado o tempo durante a estocagem, manuseio e aplicação, são a temperatura e o grau de exposição do ligante ao oxigênio do ar. Portanto, quanto maior a superfície específica e a temperatura de um ligante, maior seu grau de oxidação, sendo que altas temperaturas (130 à 180°) e baixas superfícies específicas (ligante em tanque sem circulação) o envelhecimento é relativamente lento. Da mesma forma, ligante em temperaturas relativamente baixas, como as que ocorrem no pavimento, em que o ligante se apresenta com grande superfície específica, também apresentam envelhecimento relativamente lento. No entanto, em temperaturas elevadas e grandes superfícies específicas (como ocorre na usinagem, manuseio e espalhamento antes da compactação), o envelhecimento é acelerado.

Whiteoak (1991) apresentou um gráfico que relaciona o envelhecimento do ligante com o tempo decorrido. Este gráfico, demonstrado na Figura 3, apresenta valores típicos de envelhecimento do ligante nas diversas etapas de construção e utilização de um pavimento. O autor define o índice de envelhecimento como a relação entre a viscosidade após o envelhecimento em cada instante ( $\eta_a$ ) e a viscosidade original do ligante ( $\eta_0$ ).

Tonial (2001), a partir de pesquisas realizadas por Whiteoak (1991), Kandhal & Chakraborty (1996), Fonseca (1995) e Mirza & Witczak (1995) apresenta os fatores que influenciam no processo de envelhecimento do ligante em uma mistura asfáltica a curto e a longo prazo. A curto prazo, os fatores determinantes no envelhecimento são: temperatura de usinagem, espessura de película, tipo de usina, tempo de espalhamento e compactação. Para envelhecimento a longo prazo, o teor de vazios, a espessura de película, a absorção e a espessura da camada asfáltica são elementos representativos no processo de oxidação do ligante asfáltico.

Figura 3: Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento



Fonte: WHITEOAK (1991)

## 2.2. Modificadores de ligantes asfálticos

O aumento das solicitações impostas pelo tráfego aliado às variações climáticas tem causado a deterioração prematura de pavimentos flexíveis construídos com ligantes asfálticos convencionais (ZHANG et al., 2015).

Visando melhorar o comportamento mecânico e conseqüentemente o desempenho funcional dos pavimentos, os modificadores são adicionados aos ligantes asfálticos para aumentar a resistência ao acúmulo de deformações permanentes e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica. Fang et. al (2013) afirmam que a modificação do ligante tem como papel melhorar propriedades do material como adesividade, susceptibilidade térmica, resistência à oxidação, resistência ao envelhecimento e durabilidade.

Segundo Read & Whiteoak (2003) o modificador deve possuir disponibilidade para ser utilizado sem restrição de quantidade, resistir à degradação causada pelas temperaturas as quais os ligantes asfálticos são submetidos, ser compatível com o ligante asfáltico devendo não haver separação de fases, ser capaz de ser processado em equipamentos convencionais, garantir adesividade com os agregados e ser fisicamente e quimicamente estável durante as etapas de estocagem, compactação e em serviço. A Tabela 1 traz um resumo do Quadro 1 com o modificador em estudo. O Quadro 1 apresenta os principais modificadores utilizados

em ligantes asfálticos e os respectivos defeitos no qual esses modificadores agem como melhorador de desempenho segundo a NCHRP (2001).

Tabela 1: Defeitos evitados com o uso da cal hidratada como modificador do ligante asfáltico

<b>Tipo de modificador</b>	<b>Classe</b>	<b>Defeito evitado</b>
<b>Fíler</b>	Mineral: Cal Hidratada	Deformação Permanente
		Envelhecimento Oxidativo
		Dano por umidade
<b>Antistrips</b>	Cal Hidratada	Dano por umidade
<b>Antioxidantes</b>	Cal Hidratada	Dano por umidade
		Envelhecimento Oxidativo

Quadro 1: Principais modificadores de ligantes asfálticos (NCHRP, 2001).

Tipo de modificador	Classe	Efeito				
		DP <sup>a</sup>	TF <sup>b</sup>	TBT <sup>c</sup>	DU <sup>d</sup>	EO <sup>e</sup>
Fíler	Negro de Fumo	X				X
	Mineral: Cal Hidratada	X				X
	Cinzas	X				
	Cimento Portland	X				
Extensores	Enxofre	X	X	X		
	Lignina de madeira				X	
Polímeros-Elastômeros	Estireno-butadieno (SB)	X		X		
	Estireno-butadieno-estireno (SBS)	X	X	X		
	Estireno-isopropeno (SIS)	X				
	Estireno-butadieno-borracha látex (SBR)	X		X		
	Policloropreno látex	X		X		
	Borracha natural	X				
	Acrilonila-butadieno-estireno (ABE)					
Polímeros-Plastômeros	Etileno-vinil-acetato (EVA)	X	X			
	Monômero Etileno-propileno-dieno (MEPD)	X				
	Etileno-acrilato (EA)	X				
	Poliisobutileno	X				
	Polietileno (alta e baixa densidade)	X		X		
	Polipropileno	X				
Borracha de Pneu	Diferentes tamanhos, tratamentos e processos	X	X	X		
Oxidantes	Compostos Manganeses	X				
Hidrocarbonetos	Aromáticos			X		
	Naftênicos					
	Parafínicos			X		
	Gás óleo leve			X		
	Asfaltemos: processo com resina (ROSE)	X				
	Asfaltemos: processo (DAS)	X				
	Asfaltemos: processo (DMEX)	X				
	Óleo de Xisto				X	X
	Asfaltos Naturais: Trindade	X	X	X	X	
	Gilsonite	X			X	
Antistrips	Aminas: Amidoaminas				X	
	Aminas				X	
	Poliamidas				X	
	Cal hidratada				X	
	Organometálicos				X	
Fibras	Polipropileno	X	X	X		
	Poliéster	X		X		
	Aço	X	X	X		
	Reinforcement	X	X	X		
	Natural: Celulose	X				
	Mineral	X				
Antioxidantes	Carbonato: Chumbo			X		X
	Zinco			X		X
	Negro de Fumo		X			X
	Sais de cálcio					X
	Cal hidratada				X	X
	Fenóis					X
	Aminas				X	X

a : Deformação permanente

c: Trincamento em baixas temperaturas

e: Envelhecimento oxidativo

b: Trincamento por fadiga

d: Dano por umidade

### **2.2.1. Ligantes asfálticos modificados com cal hidratada**

Segundo Gouveia (2006) o fíler (material de enchimento) atua como:

- material inerte: promove o fechamento da mistura e aumenta sua estabilidade (pó-de-pedra);
- material ativo: altera a trabalhabilidade da mistura, enrijecendo o mástique e contribui para o aumento das resistências à deformação permanente, ao envelhecimento e ao dano por umidade.

A nível mundial, a cal hidratada é reconhecida como um dos principais modificadores das misturas asfálticas, uma vez que ela é utilizada para ajudar a resolver problemas dos pavimentos, como por exemplo, o dano por umidade. A cal também reduz o envelhecimento do ligante, melhora a resistência a fadiga e a deformação aparente, entre outros (KIM et al., 2008).

Bernucci et al. (2010) afirma que a cal, em especial, tem vantagem em relação a outros fíleres (cimento Portland e o pó de pedra), que se deve ao tamanho das suas partículas, uma vez que, em geral, cerca de 80% delas têm diâmetros inferiores aos demais e, por isso, maiores quantidades de cal podem se concentrar no ligante asfáltico disponível/efetivo e promover mudanças nas suas características originais.

Grande (2011) analisou os efeitos da cal hidratada nas propriedades mecânicas e susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas. A pesquisa foi realizada com a adição de cal hidratada em concentrações de 1,5 e 3% no ligante asfáltico (CAP 50/70). A partir da análise das propriedades mecânicas com os ensaios de Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração Indireta, o autor obteve aumento na rigidez e na flexibilidade do ligante, além de diminuir a susceptibilidade ao dano por umidade (adquirida com adição de 1,5% de cal hidratada). Portanto, a cal aumenta a rigidez do ligante asfáltico, altera as propriedades dos finos e melhora a estabilidade da mistura.

Estudos realizados por Bock et al. (2009) avaliaram o comportamento mecânico e de adesão/coesão de mistura com adição de cal. Na 1ª etapa, foi substituído 1,0% do pó-de-pedra pela mesma quantidade de cal, obtendo como resultados alterações positivas nas propriedades das misturas asfálticas, como resistência à deformações permanentes. Na 2ª etapa foram feitos ensaios de módulo de resiliência e Creep Dinâmico em corpos de provas

que continham adição de cal, concluindo que houve aumento na resistência a deformação permanente de misturas asfálticas.

Bianchetto et al. (2007) afirmam que, apesar das vantagens, a adição de fíler deve ser racionalmente controlada por causa do tipo e conteúdo do mesmo, que deve ser determinado de acordo com as propriedades físicas e volumétricas desejadas. Porém, o uso descontrolado e sem projeto do fíler pode ocasionar resultados contrários aos esperados. Desta forma, a concentração crítica é atingida quando o mástique começa a enrijecer de forma exacerbada, ocasionando fragilidade no sistema.

A partir destas análises, tendo que a introdução de partículas de fíler mineral no ligante asfáltico tem como efeito um aumento do módulo de deformabilidade, as nanopartículas poderão também apresentar um efeito semelhante, originando um ligante modificado com um módulo de deformabilidade mais alto que o do ligante original (CRUCHO et al., 2016).

Com a finalidade de melhorar a contribuição da cal na fabricação dos pavimentos se busca reduzir o tamanho da partícula em termos nanométricos. Desta forma, aumentaria a área de superfície de contato das partículas e assim melhorar a interação entre o ligante e as partículas de nano cal (DIAB et al., 2013).

### **2.2.2. Produção de partículas de cal hidratada em escala nanométrica**

Apesar da eficácia da cal hidratada ser uma função do teor e do método de uso, o tamanho das partículas também é relevante. Recentemente, o uso de nanomateriais em infraestrutura de pavimentos asfálticos vem ganhando espaço entre pesquisadores e cientistas.

Cheng et al. (2011) usaram a máquina de abrasão Los Angeles (LA) para produzir tamanhos menores de partículas de cal hidratada. Por este método, a redução das partículas ocorre com o desgaste por abrasão por meio do impacto entre estas e esferas de aço. Os autores obtiveram partículas com 660 nm de diâmetro, que é aproximadamente 50% do tamanho normal do fíler.

Gajovic et al. (2002), utilizaram o método de moagem de bolas de alta energia para a preparação de nanopartículas de dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) e dióxido de zircônio ( $ZrO_2$ ).

Os autores indicaram o moinho de bolas como uma alternativa eficaz para preparação de nanopartículas e concluíram que o parâmetro mais importante responsável pela diminuição das partículas é a relação bola para pó (BPR).

Kavussi & Barghabany (2015) produziram partículas em escala nano a partir da cal hidratada (fíler) utilizando moinho de bolas. Parâmetros como velocidade, tempo e relação bola para pó (BPR) foram otimizados usando um procedimento de tentativa e erro. A moagem foi realizada com a adição de isopropanol, material que controla o processo de moagem e impede que as partículas se aglomerem. Uma proporção de 5:1 foi selecionada como o BPR. Desta forma, 100 g de cal hidratada e 500 g de esferas de aço foram inseridas nos copos do moinho. A cal hidratada foi moída por 10 h em velocidade de 220 rpm. Os autores obtiveram partículas com diâmetro médio de 281  $\mu\text{m}$ , classificando este material como nano partícula.

### **2.2.3. Ligantes modificados com nanopartículas de cal**

A nanotecnologia é o estudo de materiais, dispositivos e sistemas em nível molecular, considerando fenômenos associados a interações atômicas e moleculares que influenciam fortemente as propriedades macroscópicas do material (YOU et al., 2011).

Desenvolvimentos recentes no campo das nanotecnologias vêm permitir a produção e aplicação de nanopartículas como aditivos para melhoria das propriedades de diversos materiais. A modificação de ligantes com a introdução de nanopartículas apresenta-se promissora na melhoria das propriedades do ligante em especial de sua susceptibilidade térmica. As nanopartículas identificadas como tendo mais potencial para a modificação de ligantes são: nanoargila, nanosílicas, nanocal hidratada, nanoplásticos, nanofibras e nanotubos de carbono (CRUCHO et al., 2016).

Segundo Saha & Nilufar (2010) a adição de nanomateriais, com uma porcentagem entre 1% e 5% em peso, pode ser utilizada para melhorar as propriedades físicas, mecânicas e reológicas dos ligantes asfálticos. Isto ocorre devido ao aumento da área de superfície e conseqüentemente a energia envolvida no processo, e pode ser necessário para remediar patologias como a deformação permanente.

Alvarado (2015) fez um estudo no qual buscou-se analisar o desempenho do ligante

asfáltico ao utilizar nanopartículas de cal como aditivo e, dessa forma, observar se ocorria mudanças significativas nas propriedades reológicas e na adesividade ao reduzir o tamanho da partícula. O autor realizou os ensaios de recuperação sob tensões múltiplas (MSCR), reômetro de flexão de viga (BBR) e reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), além do goniômetro (analisando o ângulo de contato), para avaliar a deformação permanente e resistência à fadiga. Os resultados do ensaio de MSCR apresentaram o ligante com nanopartículas de cal mais resistentes à deformações permanentes. Além disso, verificou-se uma melhora na resistência à fadiga ao utilizar nano cal. A partir da análise dos parâmetros de perda de aderência (obtido por meio de medições do ângulo de contato e energia superficial livre) e resistência retida foi possível determinar quantitativamente a melhora das adesividade nos ligantes com adição de nano cal, verificando melhoras que vão desde 5% até 11%.

Barros et al. (2017) estudaram a incorporação de hidróxido de cálcio (cal hidratada) e óxido de cálcio (cal virgem) em nanodimensões para aumentar a durabilidade dos pavimentos e reduzir o dano de deformação permanente. A incorporação de materiais foi realizada a partir da adição a teores de 1%, 3% e 5% por peso em massa de ligante. Os resultados demonstraram que a adição de 5%, das nanopartículas ao ligante é uma alternativa eficaz no melhoramento das suas propriedades para uso em pavimentação, pois a adição deste teor mostrou melhorias significativas na propriedade reológica estudadas, ou seja, aumento na resistência à deformação permanente.

Shen et al. (2011) estudaram influência das nanopartículas de cal nas misturas asfálticas à quente. Ao adicionar 1% de nanopartículas de cal à mistura os autores obtiveram 10% de aumento de força de tração direta em comparação com mistura com cal hidratada de tamanho regular. Verificou-se também que a adição de 0,5% de nanopartículas de cal nas misturas à quente obtiveram as mesmas propriedades de antistripping (dano por umidade) que misturas com 1% de cal hidratada de tamanho regular.

Cheng et al. (2011) investigou o efeito do tamanho de cal hidratada sobre a susceptibilidade à umidade de misturas à quente (WMA). As partículas de nano cal foram obtidas utilizando o equipamento “Los Angeles” (a redução das partículas ocorre com o desgaste por abrasão por meio do impacto entre estas e esferas de aço) e adicionadas à mistura à quente para análise comparativa entre misturas aditivadas com partículas de cal hidratada em tamanho regular. O tamanho médio de 1,3  $\mu\text{m}$  da cal utilizada foi reduzido a

660 nm, onde os autores classificaram as partículas obtidas como nanométricas. As amostras com nano partículas apresentaram maiores valores resistência à tração direta e resistência à ação da água em comparação àquelas com partículas de cal em tamanho regular.

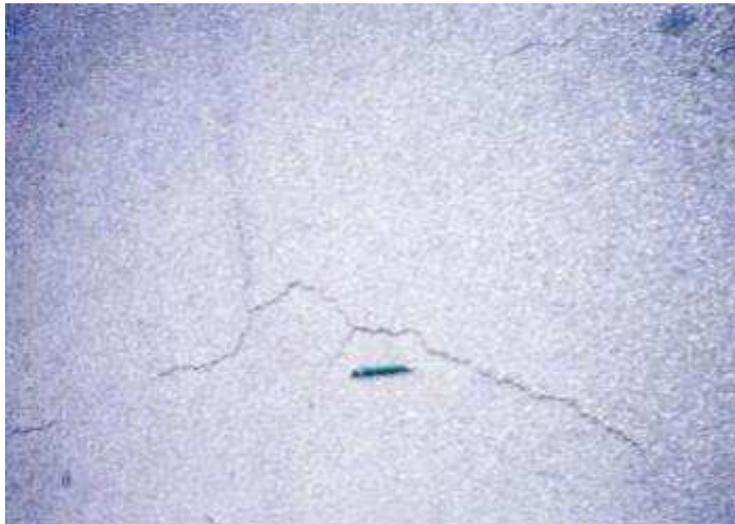
Diante dos dados apresentados, reitera-se a influência positiva nas propriedades dos ligantes asfálticos após a adição de nanopartículas de cal. Além de melhorar a adesividade agregado-ligante e enrijecer o ligante asfáltico, as nanopartículas retardam o trincamento e alteram favoravelmente a cinética da oxidação reduzindo efeitos deletérios.

### **2.3. Defeitos nos pavimentos**

As solicitações repetitivas de cargas sobre o pavimento provocam o aparecimento de patologias que comprometem a sua vida útil e eficiência. Os defeitos mais frequentes nas estradas brasileiras são o desenvolvimento de trincas no revestimento asfáltico e o aparecimento de deformações permanentes nas trilhas de rodas (DNIT, 2006).

O trincamento por fadiga (fissuras) é um dos defeitos mais comuns, aparecendo em pavimentos envelhecidos, o qual, após ser submetido às cargas cíclicas, já não oferece boa resposta às solicitações. As trincas por fadiga iniciam-se na parte inferior da camada asfáltica e propagam-se até a superfície do pavimento. Normalmente, elas surgem nas trilhas de roda de veículos pesados na direção longitudinal da via como mostrado na Figura 4, enquanto seu estágio final caracteriza-se por trincas do tipo pele de crocodilo (Figura 5) já que as trincas longitudinais isoladas evoluem pelas trincas ramificadas (FONTES, 2009). A resistência a fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida como a capacidade que esta mistura apresenta em resistir aos esforços repetitivos de flexão (esforço cíclico) sem se romper; entre os esforços encontram-se as características do tráfego, do pavimento e as condições climáticas (ILDEFONSO, 2007).

Figura 4: Trincas isoladas



Fonte: FONTES (2009)

Figura 5: Trincas intercaladas



Fonte: FONTES (2009)

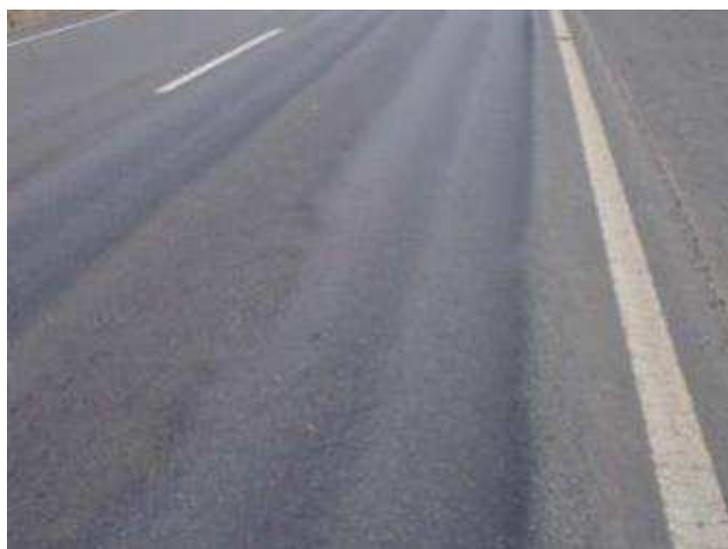
Outro defeito que influencia a vida útil do pavimento é a deformação permanente, que aparece após cessar a aplicação da carga no pavimento, isto é, possui caráter residual (Preussler & Pinto, 2001 apud. Fontes, 2009). Segundo Fontes (2009) este fenômeno é influenciado pelas propriedades e proporções de cada um dos componentes de uma mistura asfáltica (agregados, ligante e volume de vazios) e acontece com mais frequência no verão,

já que a altas temperaturas a viscosidade do ligante diminui e o carregamento do tráfego é suportado pelo agregado mineral.

Estas podem surgir, em alguns casos, como cordões laterais longitudinais de mistura asfáltica da camada de desgaste devido à fluência do material. À medida que as solicitações aumentam, depressões longitudinais aparecem gradualmente nas trilhas de roda (Figura 6) podendo ou não possuírem elevações laterais nas estradas (FONTES, 2009).

Este tipo de patologia preocupa, pois a irregularidade do pavimento devido às variações longitudinais causadas pelas deformações permanentes gera problemas como: diminuição de segurança, aumento do desconforto, aumento do custo operacional dos veículos, além de possibilidade de aquaplanagem.

Figura 6: Deformação Permanente nas Trilhas de Roda



Fonte: FONTES, 2009

Em meio a estas problemáticas surge a reologia, que direciona para uma melhor escolha do ligante, tendo em vista as condições nas quais os pavimentos estarão sujeitos, a partir de uma maior compreensão das propriedades físico-químicas do ligante asfáltico, possibilitando uma maior vida útil do pavimento.

## 2.4. Reologia dos ligantes asfálticos

A reologia estuda o comportamento tensão-deformação de um material considerando o tempo de aplicação do carregamento.

Dentre algumas das principais razões para estudar o comportamento reológico, destacam-se alguns pontos. A reologia contribui para o conhecimento de estruturas, pois existe uma relação entre o tamanho e a forma molecular das substâncias em solução e sua viscosidade. Contribui também para o controle de processos, realizado por medidas reológicas da matéria-prima e do produto, e para o projeto de máquinas, para que sejam utilizados equipamentos com a potência adequada ao processamento dos materiais. Similarmente, a reologia é útil na aceitação de produtos, servindo como controle de qualidade (CORREIA, 2006).

A reologia clássica considera dois materiais como ideais: o sólido elástico e o líquido ou fluido viscoso. Os sólidos ideais deformam-se elasticamente e a energia necessária para deformação é totalmente recuperada quando a força é removida. Os fluidos ideais, tais como líquidos e gases, tendem a se deformar de forma irreversível, dessa forma a energia requerida para a deformação é dissipada pelo fluido sob forma de calor e não é mais recuperada pela remoção da força exercida (MOTHÉ et al., 2009).

A maioria dos corpos reais, entretanto, não se comporta nem como sólidos nem como fluidos ideais (MACHADO, 2002). Estes são os chamados fluidos viscoelásticos, que apresentam um comportamento misto (viscoso e elástico), onde a tensão aplicada é parcialmente acumulada e parcialmente dissipada sob a forma de energia calorífica.

Segundo Lu (2002) o ligante asfáltico é um material considerado viscoelástico e depende de fatores como temperatura, nível de tensão e tempo de atuação do carregamento. Em temperaturas muito baixas, ou pequenos tempos de cargas, o ligante se comporta como sólido elástico. Com um aumento significativo da temperatura ou aumento do tempo de carga, o ligante comporta-se como líquido Newtoniano e pode ser descrito como uma taxa de cisalhamento independentemente do valor da viscosidade. Essa taxa de cisalhamento é também denominada grau de deformação ou gradiente de velocidade, sendo definida por meio da relação entre a diferença das velocidades entre duas partículas ou planos vizinhos entre eles, conforme a Equação 1:

$$\gamma_{xy} = \frac{dv_x}{dy} \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

- $dv_x$  é a diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes;
- $dy$  é a distância entre elas.

MOTHÉ (2009) destaca que é importante o entendimento da reologia dos ligantes pelos seguintes fatores:

- permite diferenciar ligantes asfálticos obtidos de diferentes petróleos e por diferentes processos de refino;
- orienta a seleção das temperaturas para as operações de usinagem e compactação das camadas asfálticas;
- permite determinar como as propriedades reológicas se relacionam com os defeitos de superfície.

A análise reológica dos ligantes asfálticos foi desenvolvida com o intuito de mensurar os parâmetros mecânicos a fim de evitar o caráter limitador dos ensaios empíricos, uma vez que não relacionam adequadamente o comportamento e desempenho de misturas asfálticas em campo e laboratório. A utilização de ensaios reológicos nos ligantes asfálticos permite a associação de seus resultados, como resistência à deformação permanente e a trincas por fadiga e térmicas, com ensaios mecânicos já existentes para misturas asfálticas, possibilitando a comparação do comportamento e influência do ligante na mistura asfáltica como um todo (MARINHO, 2017).

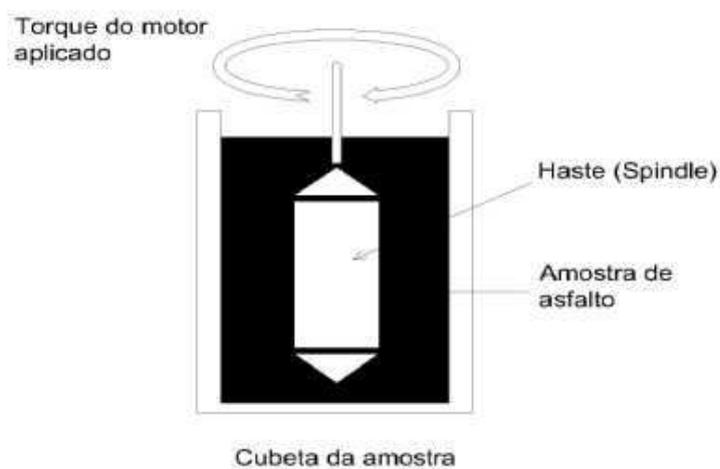
As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos dividem-se em propriedades reológicas fundamentais e propriedades reológicas empíricas. As fundamentais são fornecidas por ensaios que medem a viscosidade aparente (medida no viscosímetro rotacional), viscosidade cinemática (medida no viscosímetro capilar), módulo complexo, ângulo de fase, módulo de armazenamento, módulo de dissipação e viscosidade complexa (medidas no Dynamic Shear Reometer -DSR), rigidez sob baixas temperaturas e taxa de relaxação sob baixas temperaturas (medidas no Bending Beam Reometer - BBR). Já as propriedades empíricas são obtidas por medidas de penetração (medido no penetrômetro), ponto de amolecimento (medido pelo “conjunto anel e bola”), viscosidade Saybolt-Furol (medido em viscosímetro Saybolt-Furol), resiliência (medido em “conjunto cuba e esfera”), ductilidade (medido no ductilômetro) e retorno elástico (medido no ductilômetro).

Dos ensaios citados acima, os principais equipamentos que fazem parte da

metodologia SUPERPAVE para medição de propriedades reológicas de ligantes asfálticos são o viscosímetro rotacional, o BBR e o DSR.

O procedimento com viscosímetro rotacional, representado na Figura 7, é utilizado para medir a viscosidade sob temperatura de bombeamento, de mistura, de mistura com agregados em usina e de compactação, assegurando a trabalhabilidade da mistura (FAXINA, 2006).

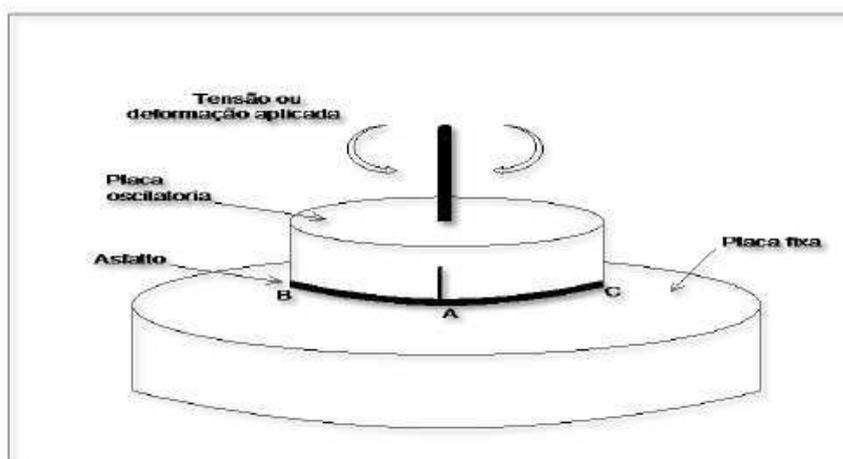
Figura 7: Layout do procedimento utilizado no viscosímetro rotacional



Fonte: NEGRÃO, adaptada de Gonzáles (2006)

O DSR tem como princípio de funcionamento submeter uma pequena quantidade do ligante a tensões oscilatórias, entre duas placas paralelas. No método SUPERPAVE, esse equipamento é utilizado para medir as propriedades do asfalto a temperaturas elevadas, intermediárias e simular taxas de carregamento típicas do tráfego. As temperaturas nas quais os ensaios são realizados são baseadas na temperatura real de serviço, onde o ligante será utilizado. Por meio do DSR em regime oscilatório, sob condições específicas de temperatura e frequência de carga, são obtidos o Módulo Complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), como principais parâmetros reológicos. Na Figura 8 é apresentado o layout de um DSR.

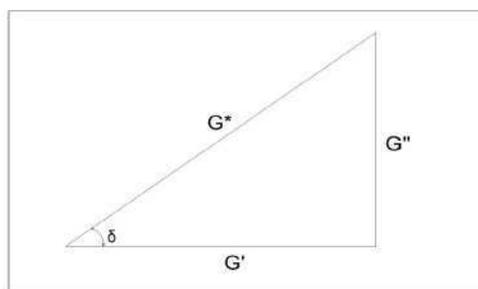
Figura 8: Layout de um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)



Fonte: NEGRÃO, adaptada de Gonzáles (2006)

O Módulo Complexo ( $G^*$ ) é definido como a razão entre o máximo de tensão de cisalhamento e o máximo de deformação, e está relacionado à resistência à deformação quando o asfalto é submetido a uma carga de cisalhamento, ou seja, quanto maior o seu valor, maior a rigidez do material e conseqüentemente maior sua resistência à deformação. O Módulo Complexo pode ser decomposto em uma componente elástica (módulo elástico -  $G'$ ) e outra viscosa (módulo viscoso -  $G''$ ) (NEGRÃO, 2006). Na Figura 9 pode-se obter a Equação 2 e a Equação 3 que apresentam as relações entre as componentes do módulo complexo e o ângulo de fase ( $\delta$ ).

Figura 9: Relações entre o Módulo Complexo ( $G^*$ ), seus componentes ( $G'$ ), ( $G''$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ )



$$G' = G^* \cos \delta \quad (\text{eq.2})$$

$$G'' = G^* \sin \delta \quad (\text{eq.3})$$

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

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

Rosa Júnior (2015) afirma que para selecionar um ligante a fim se de obter melhor desempenho, é imprescindível a análise de suas respostas em termos de resistência total a deformação ( $G^*$ ) e elasticidade ( $\delta$ ). Para esta seleção, torna-se também essencial medir as propriedades do ligante nas faixas de temperaturas ou de frequências que correspondem às condições climáticas e as cargas de tráfego que solicitam o pavimento. Na especificação SUPERPAVE os parâmetros  $G^*/\sin \delta$  e  $G^* \sin \delta$  são utilizados para determinação do Performance Grade (PG). Ou seja, para o controle da rigidez do asfalto. Especificamente o  $G^*/\sin \delta$  controla a rigidez a altas temperaturas, ou seja, determina a temperatura máxima para o asfalto assegurando que esse forneça resistência ao cisalhamento global da mistura, em termos de elasticidade a altas temperaturas.

Performance Grade é um método de classificação dos ligantes asfálticos para utilização em misturas asfálticas, substituindo as classificações efetuadas pelo teste de penetração, em que a seleção do ligante apropriado é realizada a partir do clima e da temperatura no pavimento onde o ligante será aplicado. A partir de uma classificação, os ligantes são agrupados de acordo com seu PG numa faixa de temperatura na qual o ligante atenda a critérios de desempenho como resistência às deformações permanentes a altas temperaturas e a trincamentos térmicos.

O grau de desempenho de um ligante asfáltico é composto por dois números, sendo que o primeiro número indica a temperatura máxima em que o ligante asfáltico pode ser trabalhado mantendo suas propriedades durante a vida de serviço em um pavimento, e o

segundo número, acompanhados por um sinal negativo, significa a mais baixa temperatura que o ligante pode ser submetido sem comprometer seu desempenho.

O ensaio para determinação do Grau de desempenho é realizado pelo DSR. Outros ensaios importantes para a análise reológica de um ligante asfáltico e também realizados pelo DSR são *Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)*, *Linear Amplitude Sweep (LAS)* e Curva Mestra.

O ensaio de MSCR, que em tradução livre significa Deformação e Recuperação em Múltiplas Tensões, possibilita obter o nível de tráfego suportado pelo ligante. A ASTM D7405-15 define o ensaio de MSCR como um método utilizado na identificação da presença de resposta elástica do ligante asfáltico e a mudança desta resposta sob dois níveis de tensão distintos a temperatura específica. O parâmetro obtido é a Compliância Não-Recuperável ( $J_{nr}$ ). Quanto maior o valor de  $J_{nr}$ , menor é a capacidade do ligante de recuperar as deformações sofridas pela ação cisalhante do tráfego.

Os valores de deformações para o cálculo da Compliância Não-Recuperável  $J_{nr}$  ( $\sigma$ , N) e a porcentagem de recuperação %Rec ( $\sigma$ , N), são obtidos pelas Equações 4 e 5:

$$J_{nr} (\sigma, N) = \frac{\text{Deformação não - recuperada}}{\text{Tensão aplicada}} \quad (\text{eq.4})$$

$$\%Rec (\sigma, N) = \frac{\text{Pico de tensão} \times \text{Deformação não - recuperada} \times 100}{\text{Pico de tensão}} \quad (\text{eq.5})$$

O ensaio é composto por 20 ciclos. Os 10 primeiros ciclos utilizam uma tensão de 0,1 kPa e os 10 seguintes, uma tensão de 3,2 kPa. A tensão menor corresponde a um tráfego leve, e a tensão maior, a um tráfego pesado. As compliâncias não-recuperáveis de 3,2 kPa e 0,1 kPa são calculadas pela Equação 6.

$$J_{nr} \text{ diff} = \left( \frac{J_{nr} 3200 - J_{nr} 100}{J_{nr} 100} \right) \times 100 \quad (\text{eq.6})$$

Conjuntamente à resistência a aplicação de cargas relacionada à temperatura, a resistência ao dano provocado por fadiga tem um efeito significativo no tempo de serviço dos pavimentos asfálticos. A especificação SUPERPAVE, portanto, adotou o parâmetro

$G^* \cdot \sin \delta$  como critério de fadiga. No entanto, posteriormente constatou-se que este parâmetro seria inadequado para avaliar os ligantes asfálticos, pois há fraca correlação entre  $G^* \cdot \sin \delta$  e a resistência à fadiga do ligante. A ineficácia seria devida ao fato de o ensaio ser realizado na região de viscoelasticidade linear, para níveis baixos de deformação, enquanto o fenômeno real se daria na região de viscoelasticidade não linear, sob grandes deformações.

Como proposta alternativa para tentar contornar as deficiências da especificação vigente, relativas ao controle do trincamento por fadiga do ligante asfáltico, uma varredura de tempo (*time sweep*) foi proposta pelo projeto NCHRP 9-10 (*National Cooperative Highway Research Program*). Este ensaio é baseado na definição de dano por fadiga como a degradação da integridade do material pela ação de cargas repetidas e, por ser excessivamente demorado por conta do tempo necessário para levar o material à falha, torna inviável sua inclusão na especificação SUPERPAVE.

Diante dessa problemática, o LAS foi proposto por Johnson (2010) como um ensaio de fadiga acelerado para ligantes asfálticos. O LAS é conduzido no DSR e pode ser realizado nas amostras envelhecidas a curto e/ou a longo prazo. A amostra é testada utilizando a geometria de placas paralelas de 8mm de diâmetro com distância de 2 mm entre placas.

Este ensaio consiste em duas fases. Na primeira fase é realizada uma varredura de frequência (entre 0,2 e 30 Hz com amplitude de deformação de 0,1%) aplicada ao ligante asfáltico, no regime de viscoelasticidade linear, para obtenção das características reológicas do material e do parâmetro  $\alpha$ , que representa as condições do material sem danos.

O valor de  $\alpha$  é calculado a partir da teoria do dano viscoelástico contínuo, em que cada informação para módulo dinâmico [ $G^*(\omega)$ ] e ângulo de fase [ $\delta(\omega)$ ] para cada frequência deve ser convertido para módulo de armazenamento [ $G'(\omega)$ ] mostrado na Equação 7.

$$G'(\omega) = |G^*(\omega)| \cdot \cos \delta(\omega) \quad (\text{eq.6})$$

Após conversão, traça-se um novo gráfico, em escala logarítmica, de  $\omega$  em função de  $G'(\omega)$  gerando uma curva de tendência apresentada na Equação 8.

$$\log G'(\omega) = m (\log \omega) + b \quad (\text{eq.7})$$

Onde,  $m$  é o coeficiente angular (inclinação da reta) e  $b$  o coeficiente linear.

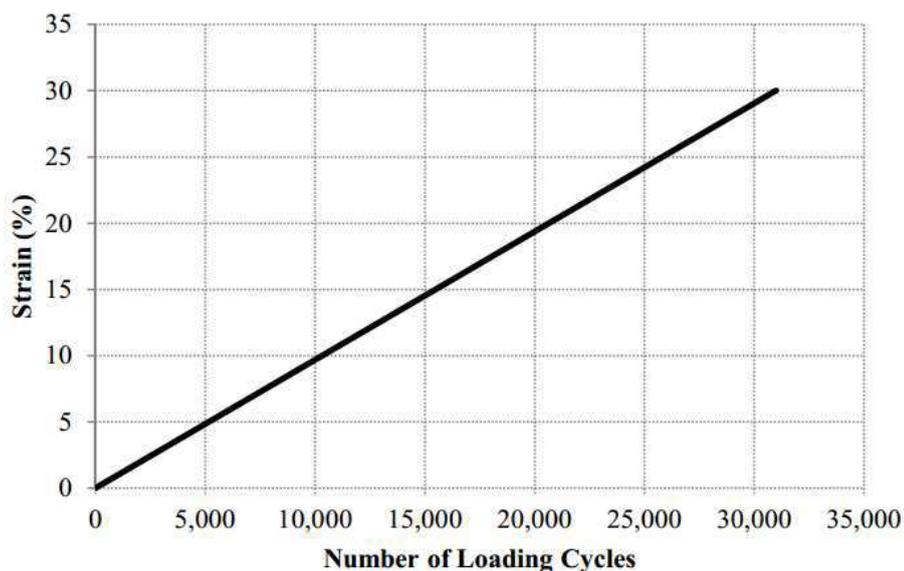
Finalmente, com o valor de  $m$  obtido, encontra-se o valor de  $\alpha$  pela Equação 9.

$$\alpha=1/m \quad (\text{eq.8})$$

A segunda parte do teste compreende uma varredura de amplitude de deformação, partindo de deformações de 0,1% até 30% com aplicação de carga na frequência de 10 Hz.

A sequência de carregamento consiste em intervalos de 10 segundos a uma amplitude de deformação constante, sendo cada intervalo seguido por outro intervalo com uma amplitude de deformação maior, conforme apresentado na Figura 10.

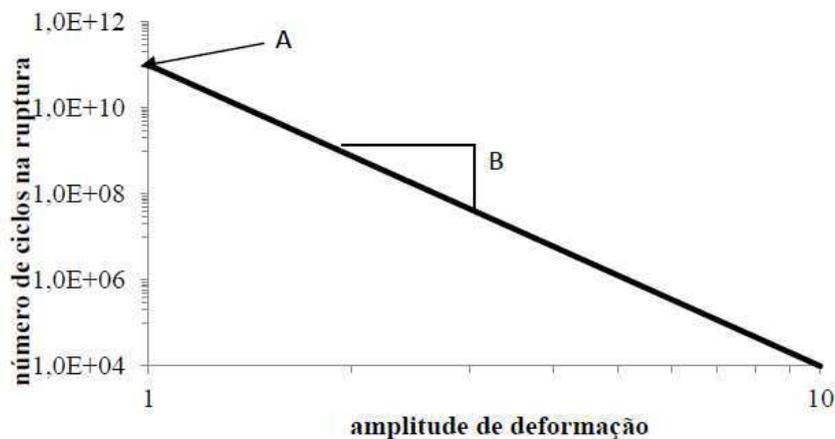
Figura 10: Varredura de amplitude de amostra de ligante asfáltico



Fonte: HINTZ (2012)

Os resultados obtidos a partir da varredura de amplitude de deformação e da caracterização reológica na região de viscoelasticidade linear são utilizados para determinar um modelo de fadiga (Figura 11) do ligante asfáltico utilizando o princípio de dano contínuo viscoelástico. Para caracterização da fadiga em ligantes asfálticos, o modelo é derivado da relação entre a carga aplicada e a vida de fadiga do material. O número de ciclos até a falha indica o volume de tráfego suportado pela mistura asfáltica em função da deformação e da estrutura do pavimento (GAMA, 2016).

Figura 11: Modelo de fadiga



Fonte: JOHNSON (2010)

A relação entre a carga aplicada e a vida de fadiga ( $N_f$ ) de um ligante asfáltico é mostrada na Equação 10:

$$N_f = A \times (\gamma_{m\acute{a}x})^B \quad (\text{eq.9})$$

onde os parâmetros A e B são característicos do material e  $\gamma_{m\acute{a}x}$  é a deformação máxima esperada para uma dada estrutura do pavimento.

O parâmetro B representa a sensibilidade do material ao nível de deformação e é calculado de acordo com a Equação 11:

$$B = 2 \times \alpha \quad (\text{eq.10})$$

Onde  $\alpha$  é o valor encontrado na primeira fase do ensaio.

O parâmetro A representa a integridade do material em função do dano acumulado, calculado a partir da Equação 12:

$$A = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi I_D C_1 C_2)^\alpha} \quad (\text{eq.11})$$

Onde:

$f$ : frequência (10 Hz)

$D_f$ : valor de  $D(t)$  na ruptura

$k$ :  $k = 1 + (1 - C_2) \propto$

$I_D$ : valor inicial de  $|G^*|$ , em Mpa, do intervalo de amplitude de deformação de 1,0%

A norma AASHTO TP101-14 descreve os resultados da varredura de amplitude. O acúmulo de dano ou intensidade de dano  $[D(t)]$  pode ser calculado utilizando a Equação 13:

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^n [\pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}}] \quad (\text{eq.12})$$

Onde:  $C(t) = \frac{|G^*(t)|}{|G^*|_{inicial}}$

$|G^*|$  = módulo dinâmico de cisalhamento (Mpa)

$t$  = tempo de teste

O somatório de dano acumulado deve ser iniciado a partir do primeiro ponto. Os dados incrementais de  $D(t)$  para cada ponto subsequente devem ser somados ao valor de  $D(t)$  anterior. Este somatório deve ser realizado até o último ponto do teste, onde a deformação aplicada é de 30%.

Para cada ponto de um dado tempo  $t$ , os valores de  $C(t)$  e  $D(t)$  são calculados, assumindo que  $C$  em  $D(0)$  é 1, e  $D(0) = 0$ . A relação entre  $C(t)$  e  $D(t)$  podem ser definidos pela Equação 14:

$$C_t = C_0 C_1 (D)^{C_2} \quad (\text{eq.13})$$

Onde:

$C_0=1$ , o valor inicial de  $C_1$ ,  $C_2$  são coeficientes de ajuste da curva por meio da linearização da equação adaptado de Hintz et al. (2011), mostrado na Equação 15.

$$\log(C_0 - C_t) = \log(C_1) + C_2 \times \log(D_t) \quad (\text{eq.14})$$

Utilizando a equação acima,  $C_1$  é determinado pelo anti-log do intercepto e  $C_2$  é calculado como a declividade da linha formada pelo  $\log(C_0 - C_t)$  versus  $\log(D(t))$ . Para o

cálculo de ambos,  $C_1$  e  $C_2$ , dados correspondentes a danos menores que 10 devem ser ignorados.

O valor de  $D(t)$  na falha é  $D_f$ , dado pela Equação 16, sendo definido como a redução do módulo inicial  $|G^*|$  sob o pico de carga.

$$D_f = \left( \frac{C_0 - C_{\text{pico de carga}}}{C_1} \right)^{1/C_2} \quad (\text{eq.15})$$

Em síntese, a reologia estuda propriedades que permitem o conhecimento do comportamento do material, com o intuito de usá-lo de forma eficiente. Os principais parâmetros estudados são viscosidade, módulo complexo e ângulo de fase. As propriedades reológicas podem ser representadas tanto pela variação do módulo complexo ( $G^*$ ), do ângulo de fase ( $\delta$ ) em função da frequência, sob temperaturas constante, denominadas como curva mestre, ou pela variação de  $G^*$  e  $\delta$  em função da temperatura.

Em vista disso, o objetivo principal do estudo do comportamento reológico do ligante é encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e da temperatura. Essas propriedades certificam um maior conhecimento da interação do ligante com os agregados, quando submetidos a condições de serviço.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Ligante asfáltico

Neste estudo foi utilizado o ligante classificado como CAP 50/70. A Tabela 2 resume as características físicas do ligante.

Tabela 2: Propriedades físicas do ligante puro utilizado nesta pesquisa

Ensaio	Métodos	Unidade	Especificação	Resultado
Penetração	ABNT 6576	0,1 mm	50-70	53
Ponto de Amolecimento	NBR 6560	°C	>46	53
Viscosidade Rotacional				
a 135 °C, SP 21, 20 rpm	NBR 15184	cP	>274	487
a 150 °C, SP 21, 50 rpm			>112	248
a 177 °C, SP 21, 100 rpm			57 a 285	93
Efeito do calor e do ar (RTFO) a 163 °C, 85 min				
Aumento do ponto de amolecimento, máx	NBR 6560	°C	8	7
Penetração retida, mín	NBR 6576	%	55	68
Viscosidade Rotacional				
a 135 °C, SP 21, 20 rpm	NBR 15184	CP	>274	810
a 150 °C, SP 21, 50 rpm			>112	384
a 177 °C, SP 21, 100 rpm			57 a 285	110

### 3.1.2. Cal

A cal utilizada foi do tipo hidratada fabricada pela empresa Cal Norte Nordeste S.A. As especificações do produto foram fornecidas pela fabricante e encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Características físico-químicas e granulometria da cal utilizada na pesquisa

<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS</b>	
<b>Peso molecular</b>	<b>79,09</b>
<b>Percentual</b>	<b>&gt; 90%</b>
<b>Ponto de fusão</b>	<b>510 °C</b>
<b>Densidade relativa</b>	<b>2,24 g/cm<sup>3</sup> a 20° C</b>
<b>Solubilidade em água</b>	<b>0,13 g/100ml de água a 17,8°C</b>
<b>Retenção na # 325</b>	<b>≤ 1,5%</b>
<b>GRANULOMETRIA</b>	
<b><i>D</i><sub>10</sub></b>	<b>0,47 μm</b>
<b><i>D</i><sub>50</sub></b>	<b>4,28 μm</b>
<b><i>D</i><sub>90</sub></b>	<b>30,84 μm</b>
<b>Diâmetro médio</b>	<b>9,87 μm</b>

Fonte: Cal Norte Nordeste S.A.

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Procedimento de moagem

Para adquirir dimensões de nanopartículas, a cal têm a necessidade de passar por um processo de moagem. Com o objetivo de ser adquirida partículas em escala nanométrica, foi realizada a moagem das partículas da cal com base na metodologia utilizada por Kavussi & Barghabany (2015), onde foi utilizado mesmo equipamento e a proporção bolas para pó (BPR).

Para este fim foi utilizado o moinho periquito localizado no Laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). No processo foi realizada a moagem na proporção 5:1 de BPR, em que 200g de cal e 1 kg de bolas

(grandes e pequenas) foram colocadas no moinho por um tempo de 50 min. Por indicação do laboratorista, não foi utilizado agente controlador de moagem.

A partir da Figura 12 é possível verificar o moinho de bolas de alta energia, denominado Moinho Periquito, realizado para obtenção de nanopartículas da cal, com velocidade, rotação e tempo controlados.

Figura 12: Moinho de bolas de alta energia



### 3.2.2. Procedimento de mistura

Os teores da cal misturados para o desenvolvimento deste trabalho foram determinados e incorporados ao ligante puro (CAP 50/70). Estes teores tiveram como base o estudo de Saha & Nilufar (2010). Segundo os autores, a adição de materiais particulados, com a porcentagem entre 1% e 5% por peso, pode melhorar as propriedades físicas, mecânicas e reológicas dos ligantes asfálticos. Portanto, optou-se por incorporar as partículas fracionadas da cal nos teores de 3%, 5% e 7%, além do ligante de referência que não terá incorporação das partículas. O teor de 7% foi escolhido como estudo adicional para verificar se a adição causa efeito positivo nas propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico.

O ligante, sem adição da cal, foi colocado em um misturador mecânico e aquecido até a temperatura de 150° C. Após estabilização da temperatura, a cal foi adicionada ao ligante e a mistura foi agitada pelas hélices do aparelho a 2000 rpm durante 90 minutos a fim de garantir a homogeneidade da mistura sendo incorporado lentamente a porcentagem de cada teor pré-estabelecido no ligante.

### 3.2.3. Caracterização dos Ligantes Asfálticos

Para realização desta pesquisa foi utilizado o ligante asfáltico CAP 50/70 fornecidos pela usina de asfalto da empresa Rocha Asfalto localizada no município de Campina Grande. A escolha deste tipo de ligante leva em conta a proximidade da usina, além do fato deles

serem os mais comumente utilizados na composição das misturas no Nordeste.

Para a avaliação da incorporação da cal hidratada no CAP 50/70, após a adição desta no ligante, foram realizados ensaios físicos e reológicos dos ligantes asfálticos, comparando-os antes e após utilização do  $Ca(OH)_2$ .

Para caracterização dos ligantes asfálticos foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, realizados novamente após procedimento de RTFO.

### 3.2.3.1. Penetração

A consistência de um cimento asfáltico no estado semissólido é medida pelo ensaio de penetração, como ilustrado na Figura 13. O ensaio consiste em determinar a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padronizada penetra verticalmente, durante 5 segundos em uma amostra de cimento asfáltico numa temperatura de 25°C.

Figura 13: Penetrômetro



O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 6576/2007 e suas especificações. A penetração da amostra foi a média aritmética dos valores obtidos a qual deve ser aproximada até a unidade, de no mínimo três penetrações.

### 3.2.3.2. Ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento é a mais baixa temperatura na qual uma esfera metálica padronizada, atravessando um anel também padronizado e cheio com o material betuminoso (Figura 14) percorre uma determinada distância, sob condições especificadas.

O ensaio de ponto de amolecimento foi realizado conforme estabelecido na NBR 6560/2008.

Figura 14: Realização do ensaio de ponto de amolecimento



A partir dos dados do ponto de amolecimento e penetração, foi-se possível calcular o índice de suscetibilidade térmica. Este parâmetro indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura e é calculado pela Equação 17:

$$ISC = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C) - 1951}{120 - (50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad (\text{eq.17})$$

Onde:

$(T^{\circ}C)$  = Ponto de amolecimento

PEN = Penetração a  $25^{\circ}C$ , 100g, 5 seg.

### 3.2.3.3. Viscosidade Rotacional

A Viscosidade é expressão da resistência de líquidos ao escoamento, ou seja, ao deslocamento de parte de suas moléculas sobre moléculas vizinhas.

A viscosidade rotacional é determinada pela medida da resistência ao movimento de rotação dos eixos metálicos, quando imersos no ligante asfáltico, ou seja, representa a medida da resistência da amostra em relação à haste utilizada efetuada no viscosímetro ou reômetro Brookfield (Figura 15). Após a realização deste ensaio é possível obter o gráfico temperatura-viscosidade retirando deste as faixas de temperaturas (normatizadas pela ASTM D2493) que serão usadas para usinagem e compactação, por meio das viscosidades encontradas. A medida da viscosidade é dada em centipoise (cP). O ensaio é normatizado pela NBR 15184, a qual foi seguida para realização do mesmo.

Figura 15: Viscosímetro Brookfield



### 3.2.4. RTFO (Envelhecimento a curto prazo)

Este procedimento foi realizado em uma estufa de envelhecimento (Figura 16) objetivando medir o efeito do calor e ar sobre uma película em movimento de materiais asfálticos semissólidos, ou seja, mede a perda de massa causada pela oxidação e evaporação. Os efeitos deste tratamento foram determinados a partir de medições das propriedades

selecionadas do asfalto antes e depois do teste. O procedimento seguiu as recomendações da norma ASTM D2872-04.

Figura 16: RTFO (Rolling Thin Film Oven)



### 3.3. Ensaio reológico

A verificação de parâmetros reológicos dos ligantes asfálticos puro e modificados foi realizada por meio da utilização do DSR do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG apresentado na Figura 17. Tais parâmetros são módulo complexo ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ), indicadores da rigidez e da elasticidade, respectivamente. Além destes, DSR fornece a máxima temperatura de PG, importante no controle da rigidez do asfalto a altas temperaturas. Os ensaios reológicos realizados foram PG, MSCR e LAS.

Figura 17: Reômetro de cisalhamento direto (DSR) do Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/UFCG



### 3.3.1. Performance Grade

O ensaio consistiu na variação de temperatura partindo de 46°C com acréscimo em degraus de 6°C, verificando para cada degrau o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  que não deve possuir valores menores que 1,00 kPa para ligantes que não passaram pelo processo de simulação do envelhecimento e não devem possuir valores menores que 2,20 kPa para ligantes envelhecidos em estufa RTFO. Ao atingir valores menores que os limites impostos pela norma ASTM D6373/16 para o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , o ensaio era finalizado e a temperatura verificada.

### 3.3.2. MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)

Este ensaio, preconizado e seguido pela norma ASTM D7405-15, foi realizado na temperatura de PG do ligante asfáltico após o procedimento de envelhecimento a curto prazo RTFO. Neste foram aplicados 20 ciclos compostos por cisalhamento de 1 segundo, seguido por relaxamento de 9 segundos. Os 10 primeiros ciclos utilizam uma tensão de 0,1 kPa e os 10 seguintes, uma tensão de 3,2 kPa. Mediu-se a deformação não recuperada para cada tensão aplicada.

### **3.3.3. LAS (Linear Amplitude Sweep)**

O ensaio, foi realizado segundo a norma AASHTO TP 101-14, com amostras possuindo 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, envelhecidas em RTFO. Na primeira fase do teste, foi realizada uma varredura de frequência, na temperatura de 25 °C (temperatura de teste), com as frequências de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 20,0; e 30 Hz com amplitude de deformação de 0,1%. Na segunda fase, a mesma amostra recebeu pequenos torques sob frequência de 10 Hz, partindo de deformações de 0,1% até 30% com o número de ciclos de 31.000, em que a cada 10 ciclos de carga os valores de ângulo de fase e módulo complexo são gravados, assim como cada valor de tensão de cisalhamento aplicada.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico foram apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados em laboratório. Inicialmente serão apresentados os resultados da granulometria após a moagem da cal, posteriormente, os resultados dos ensaios de caracterização física do ligante em estudo desta pesquisa. Em seguida serão abordados os resultados dos ensaios reológicos.

### 4.1. Moagem da cal

Após a etapa de moagem da cal foi feita a análise granulométrica por difração a laser em meio líquido, a fim de se analisar se as partículas atingiram diâmetros em escala nanométrica. A Tabela 4 apresenta o resultado desta análise, como também a análise granulométrica da cal hidratada antes do procedimento de moagem. A Figura 18 apresenta o histograma obtido pela análise de difração a laser.

Tabela 4: Análise granulométrica das porcentagens cumulativas

	CAL HIDRATADA	CAL HIDRATADA MOÍDA
<b>Diâmetro a 10%</b>	0,47 $\mu\text{m}$	0,45 $\mu\text{m}$
<b>Diâmetro a 50%</b>	4,28 $\mu\text{m}$	2,29 $\mu\text{m}$
<b>Diâmetro a 90%</b>	30,84 $\mu\text{m}$	14,53 $\mu\text{m}$
<b>Diâmetro médio</b>	9,87 $\mu\text{m}$	5,08 $\mu\text{m}$

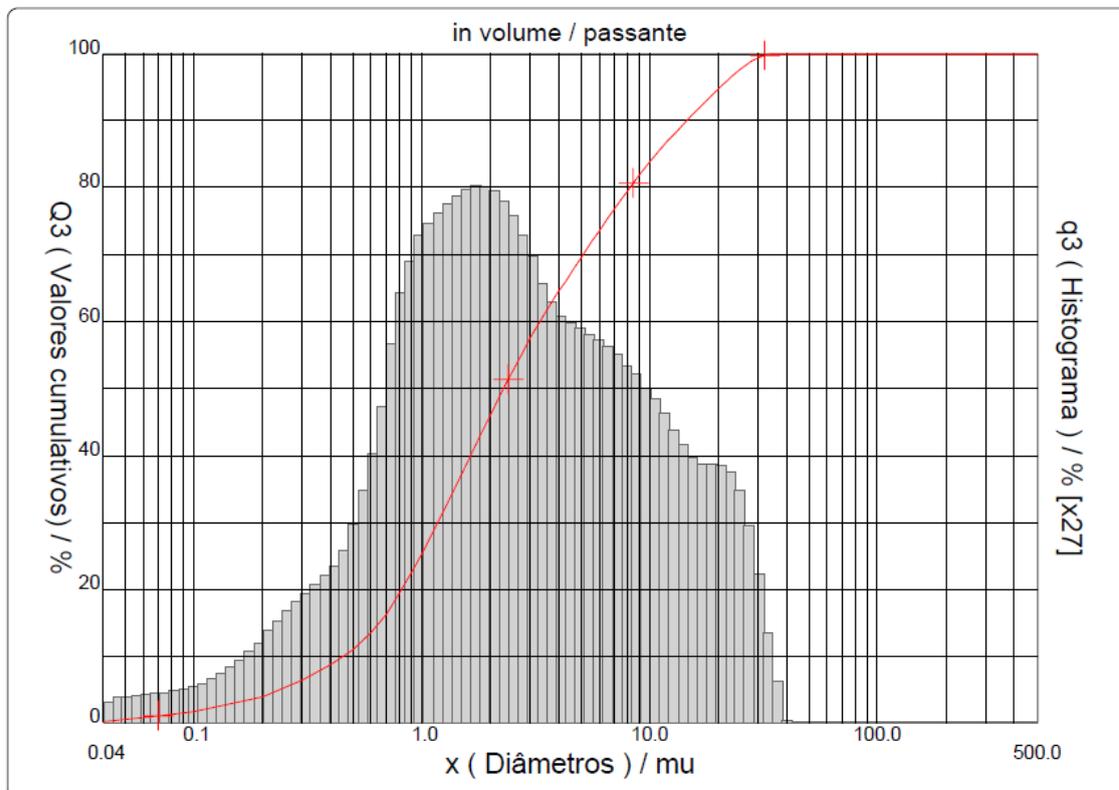
A partir da Tabela 4 pode-se inferir que após a moagem houve uma diminuição do diâmetro médio de 48,53% das partículas de cal hidratada. Entretanto, um material é inserido na escala nanométrica quando as partículas deste apresentam granulometria entre 1 e 100 nm (nanômetros) ou menos. Desta forma, o procedimento da moagem pelo moinho de bolas não resultou na produção de nanopartículas.

Alguns fatores podem ter contribuído para este resultado. A não utilização de agente controlador de moagem pode ter ocasionado a aglomeração das partículas, impedindo a fragmentação em diâmetros menores. Outra fonte de erro a ser considerada é o tempo de moagem. Possivelmente, o tempo estabelecido para o procedimento não foi apto a atingir os objetivos esperados.

Apesar disso, as partículas fracionadas obtidas foram utilizadas na pesquisa como

aditivo ao ligante asfáltico para análise do comportamento reológico.

Figura 18: Análise granulométrica da cal hidratada fracionada

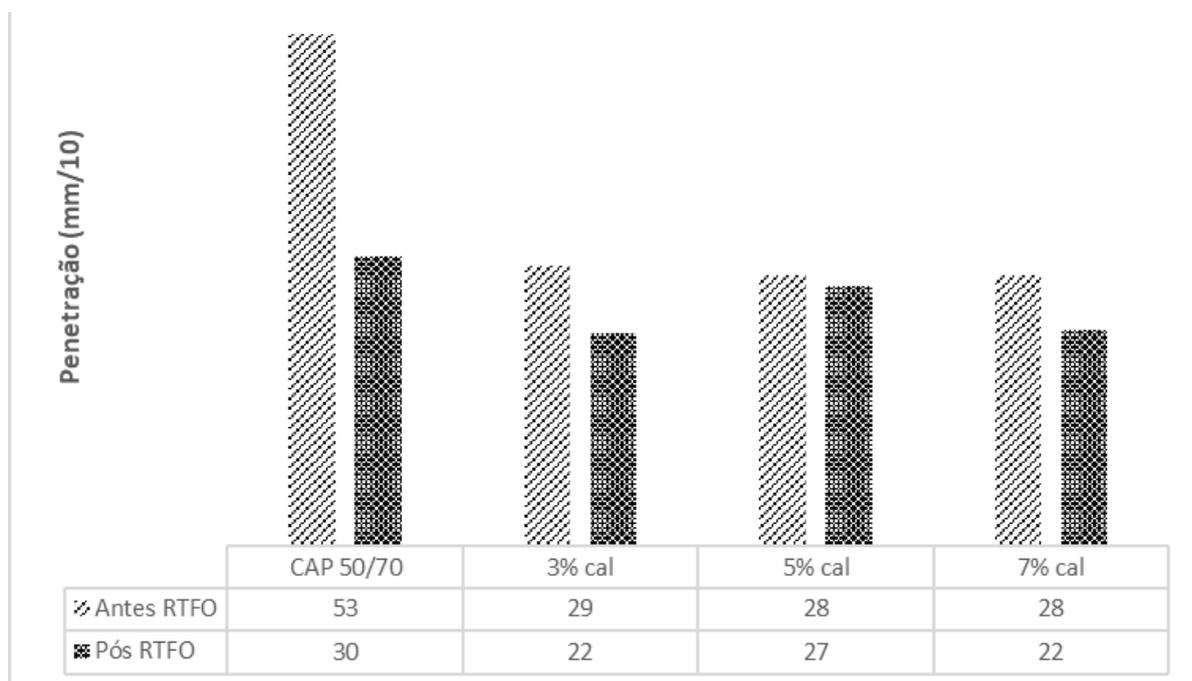


## 4.2. Propriedades físicas do ligante modificado

### 4.2.1. Ensaio de Penetração

A Figura 19 apresenta os resultados do ensaio de Penetração para o ligante modificado com partículas fracionadas de cal hidratada, como também antes e após o RTFO.

Figura 19: Resultados Ensaio de Penetração



Analisando a Figura 19 verifica-se que houve uma diminuição significativa nos valores da penetração, em relação ao ligante puro, mostrando um aumento na rigidez do material com a adição da cal hidratada modificada.

Alguns autores (Jahromi, 2009, Ali et al. 2016, Sun et al., 2016, Shafabakhsh & Ani, 2015) demonstram que é comum a diminuição da penetração na medida em que são adicionadas partículas fracionadas aos ligantes asfálticos, sendo aceitáveis os valores obtidos para o ensaio. Marinho Filho (2017) mostra em seu estudo resultado semelhante, ao adicionar partículas fracionadas de dióxido de titânio.

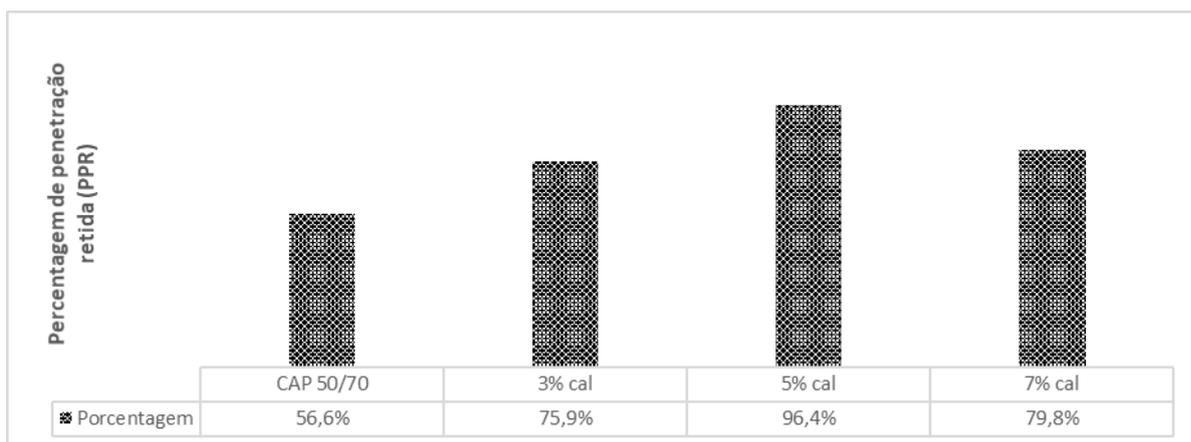
Após o RTFO, ocorreu uma redução nos valores da penetração o que é uma característica recorrente do envelhecimento do ligante. Entretanto, pode-se notar que a adição no teor de 5% apresentou maior penetração, mostrando-se menos rígido em relação aos demais teores.

A Figura 20 apresenta os valores, em porcentagem, da penetração retida (razão da penetração antes e após o envelhecimento). Esse dado é importante para verificar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento e para isso a Resolução ANP nº 19/2005 define o mínimo de 55% para esse parâmetro. Quanto mais próximo de 100%, menor é a alteração do valor de penetração ao envelhecimento, ou seja, menor sensibilidade à oxidação. Desta forma, o ligante modificado no teor de 5% apresentou melhor resultado com uma penetração

retida de 96,4%.

Todos os valores da penetração retida dos ligantes modificados apresentaram-se maiores que o do ligante puro. Portanto, a adição das partículas fracionadas da cal contribui positivamente para a sensibilidade do ligante, tornando-o menos susceptível à oxidação.

Figura 20: Relação da penetração retida

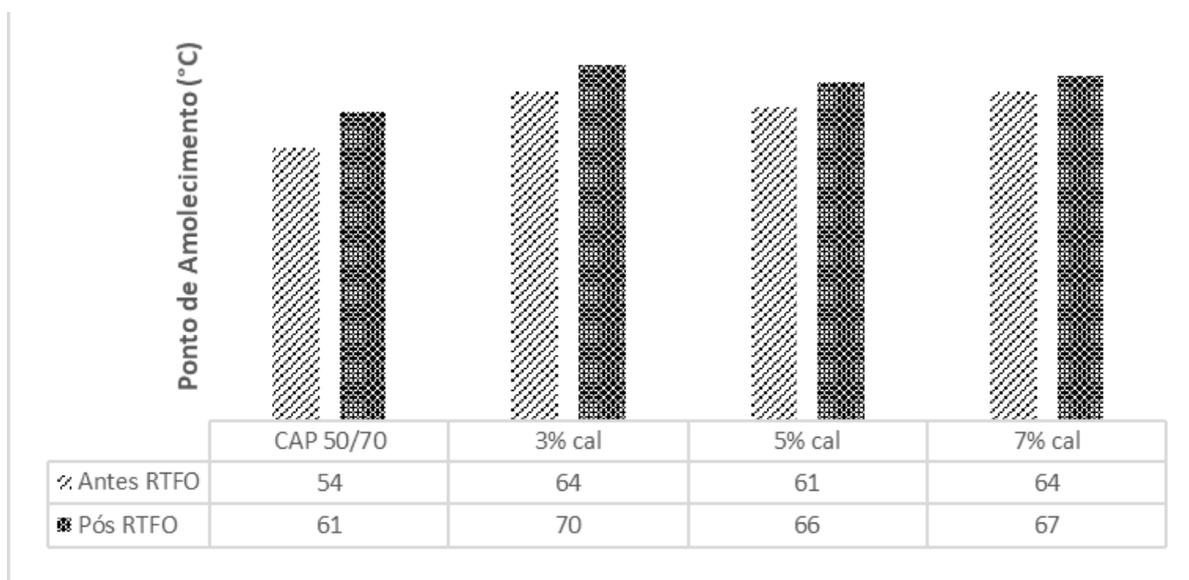


De acordo com os resultados mostrados, verifica-se que as partículas de cal hidratada fracionadas interfere no comportamento do ligante, diminuindo a penetração e como consequência, aumentando a rigidez, atribuindo ao pavimento melhor desempenho quando submetido a cargas de tráfego (melhor resistência à deformação) e ações da temperatura.

#### 4.2.2. Ensaio de Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento relaciona-se à manutenção das propriedades do ligante a elevadas temperaturas e ao aumento da resistência à deformação permanente. Este parâmetro foi obtido a partir da média das duas temperaturas de ensaio. A Figura 21 apresenta os resultados dos ensaios do ponto de amolecimento, quando empregado o ligante puro e as amostras modificadas com as partículas fracionadas de cal hidratada, assim como antes e após o RTFO.

Figura 21: Resultados Ensaio Ponto de Amolecimento



A Resolução ANP n° 19/2005 estabelece a temperatura mínima de 46°C para o ponto de amolecimento na condição normal, e dessa forma, verifica-se que todos os ligantes atenderam a este limite.

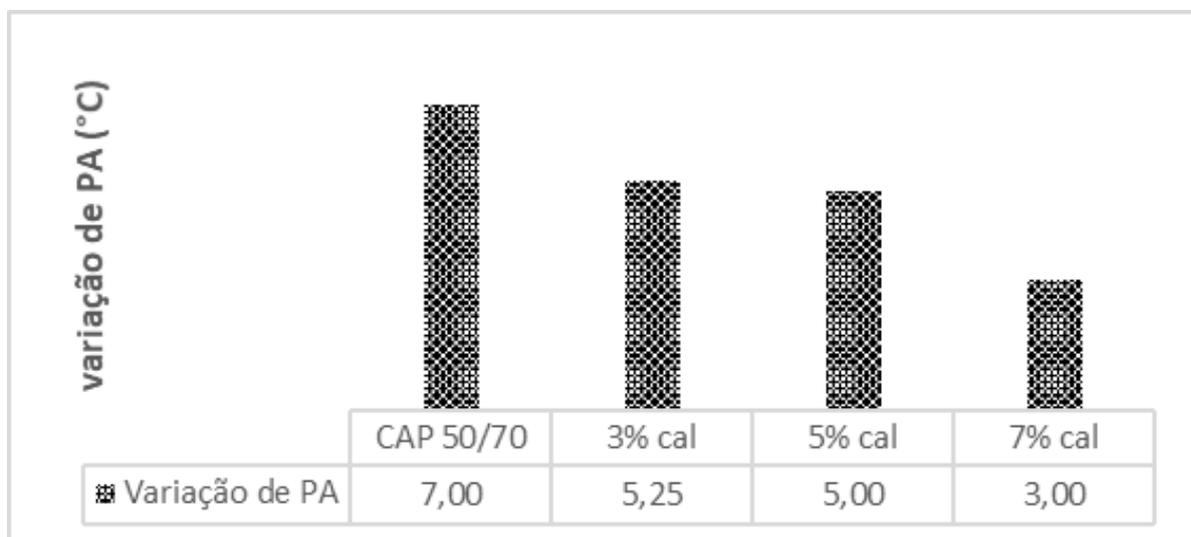
Observa-se aumento no ponto de amolecimento em relação ao ligante puro, em que o aumento máximo de temperatura chega a, aproximadamente, 11°C. Dentre os teores utilizados para a modificação, a adição de 5% mostrou menor valor.

Os estudos de Shafabakhsh & Ani (2015), Sun et al. (2016) e Zhang et al. (2015) demonstraram que na medida em que as partículas são adicionadas a ligantes asfálticos o ponto de amolecimento tende a aumentar. Este fato é notado ao adicionar o primeiro teor (3%). No entanto, ao fazer o acréscimo de 5% de cal hidratada, os resultados se contrapõem à literatura e a temperatura diminui. Fato verificado também após o envelhecimento, mas justificado com os dados do ensaio de penetração, em que o ligante com teor de 5% após envelhecimento apresentou maior índice. Segundo os autores citados neste parágrafo, quanto maior a temperatura de ponto de amolecimento, o ligante torna-se mais resistente a variações térmicas, desta forma há maior resistência a deformações permanentes. Mediante esta informação, verifica-se que as amostras com adição de 3% e 7% possuem os resultados com maiores temperaturas.

A Figura 22 apresenta a variação dos pontos de amolecimento para o ligante estudado (comparado antes e após o procedimento RTFO). A Norma DNIT 95 (2006) – EM determina

que para o CAP 50/70 o aumento máximo do ponto de amolecimento seja de 8°C. Dentre os resultados apresentados, verifica-se que as variações foram de 5,25°C para o teor de 3%, 5°C para o teor de 5% e de 3°C para o teor de 7% de modificação, sendo estes inferiores ao obtido para o ligante puro (7°C), provavelmente ocasionados pela adição das partículas de cal hidratada. Essas reduções podem ser indicativo de menor envelhecimento dos ligantes asfálticos, pois o ponto de amolecimento tem relação com a rigidez do material. Os ligantes após o procedimento de envelhecimento possuem maior rigidez, e, portanto, possuem acréscimos nos valores de ponto de amolecimento.

Figura 22: Variação dos pontos de amolecimento



Suscetibilidade térmica é a variação da consistência do CAP com a variação da temperatura, devendo-se evitar, durante o inverno, o surgimento de trincas devidas à alta consistência em temperaturas baixas e durante o verão a deformação permanente, em razão da baixa consistência em temperatura alta (ZEGARRA, 2007).

O índice de suscetibilidade térmica (IST) é outro parâmetro que pode ser analisado a partir dos resultados obtidos de penetração e ponto de amolecimento. A resolução da ANP (2005) estabelece uma faixa para os valores de IST, variando de -1,5 a +0,7 para ligantes sem adições. Segundo Bernucci et al. (2006) a maioria dos ligantes asfálticos possuem o IST entre -1,5 e 0. Valores maiores que +1 representam ligantes oxidados, pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços em temperaturas mais baixas enquanto que valores menores que -2 indicam ligantes muito suscetíveis a variações de temperatura.

Analisando a Tabela 5, que apresenta os índices de suscetibilidade térmica, tem-se

que os ligantes modificados obtiveram valores dentro das faixas estabelecidas pela ANP. Os dados obtidos demonstram que o ligante puro possui suscetibilidade maior que os modificados, demonstrando que a adição do material particulado diminuiu a suscetibilidade da mistura. Os ligantes com teores de 3% e 7% apresentaram valores próximos ao limite superior, caracterizando-os como ligantes com maior possibilidade de se tornarem quebradiços. Tem-se que a adição de 5% de partículas fracionadas de cal hidratada, para esta análise, apresentou melhor resultado, pois manteve o ligante numa faixa mais próxima de zero, o que indica que este tornou-se menos susceptível ao efeito da variação de temperatura, fato indispensável para garantir o bom desempenho do pavimento em campo.

Tabela 5: Índices de suscetibilidade térmica do ligante

TEOR DE ADIÇÃO	IST
0% (puro)	-0,36
3%	0,59
5%	-0,02
7%	0,54

#### 4.2.3. Ensaio de Viscosidade Rotacional

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados das viscosidades e as Figuras 23 e 24 apresentam os gráficos da viscosidade versus temperatura para as amostras produzidas com o ligante modificado com partículas de cal hidratada, juntamente com os limites das temperaturas de usinagem e compactação.

Tabela 6: Resultados Ensaio Viscosidade Rotacional

ENSAIO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (cP)				
Leituras	CAP 50/70	3%	5%	7%
135°C	487,50	1207,50	1031,25	1195,00
150°C	248,20	530,50	466,00	525,50
177°C	92,75	163,00	148,00	165,75

Tabela 7: Resultados Ensaio Viscosidade Rotacional pós RTFO

ENSAIO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (cP) - RTFO				
Leituras	CAP 50/70	3%	5%	7%
135°C	810,00	1775,00	1556,25	1692,50
150°C	384,00	724,00	672,50	721,00
177°C	129,75	208,50	199,50	221,25

Figura 23: Gráfico Viscosidade x Temperatura

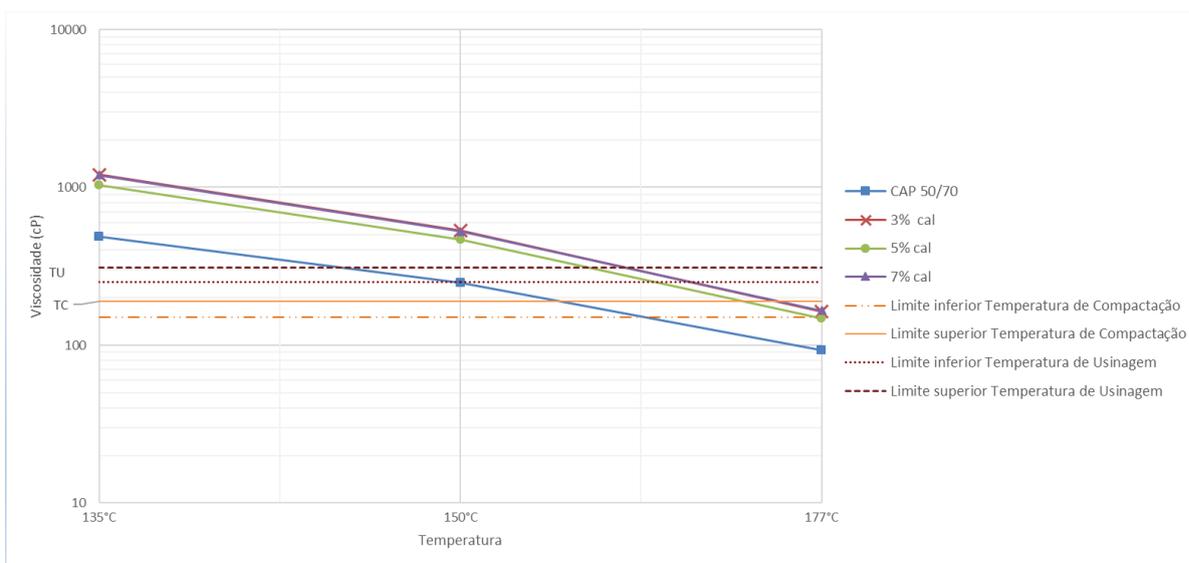
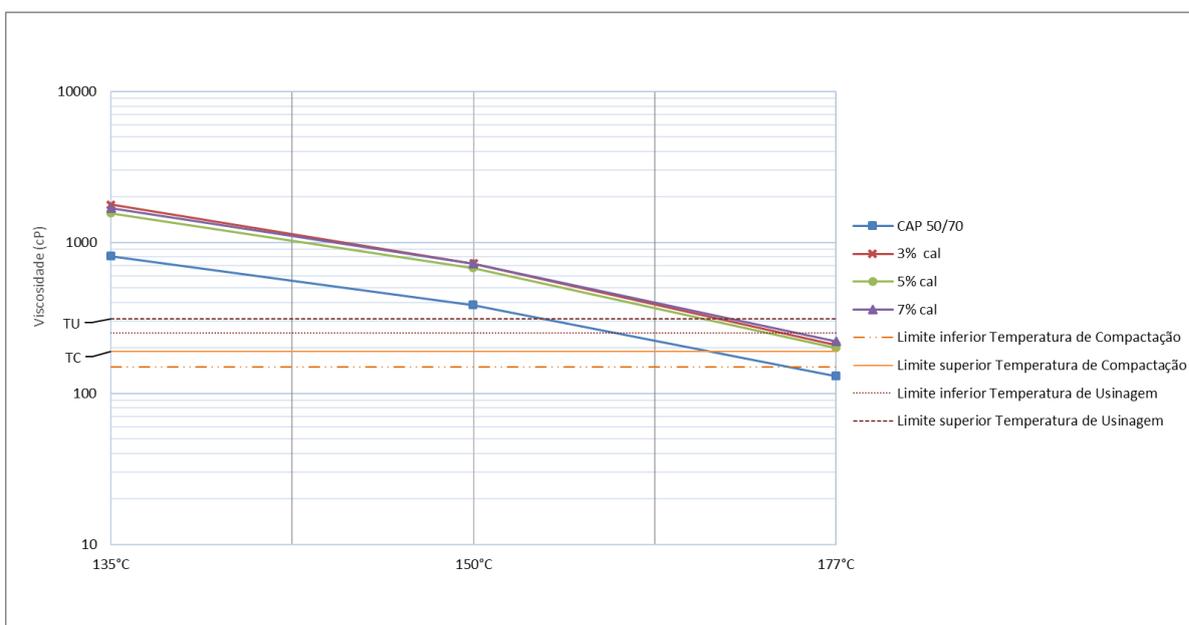


Figura 24: Gráfico Viscosidade x Temperatura (pós RTFO)



Quanto à Resolução ANP nº 19/2005, os valores das viscosidades do ligante puro, e consequentemente dos modificados por adição de partículas fracionadas de cal atenderam

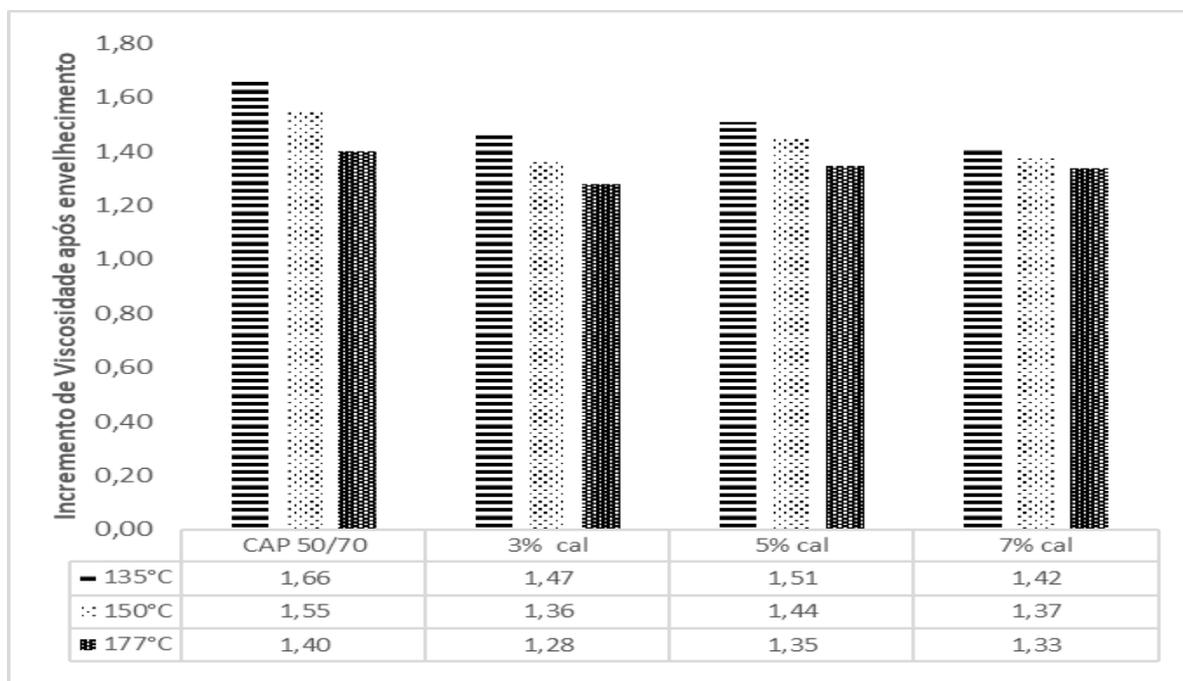
aos valores mínimos (274 cP – 135°C e 112 cP – 150°C) e intervalo (28-114 cP – 177°C) da especificação com suas respectivas temperaturas.

Nota-se que à medida que há um aumento de temperatura a viscosidade diminui, o que era esperado pois o ligante é um material termoviscoso.

Em todos os teores houve aumento da viscosidade, portanto todas as curvas apresentam-se acima da curva do ligante puro. Analisando os resultados, observa-se uma oscilação decrescente entre 3% e 5% e crescente entre 5% e 7%, apresentando, portanto, a mistura de 5% com menor viscosidade.

As amostras estudadas nesta pesquisa aumentaram a viscosidade após o envelhecimento, conforme esperado. A Figura 25 mostra graficamente os incrementos de viscosidade para cada mistura. Nota-se que todos os valores do incremento de viscosidade do ligante modificado apresentam-se menores que os valores do ligante puro. Tem-se, portanto, que a modificação com cal diminui o envelhecimento do ligante impedindo que ocorram maiores incrementos dos valores de viscosidade.

Figura 25: Incremento de viscosidade após envelhecimento



A Tabela 8 apresenta as temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes estudados. Em relação à temperatura de usinagem, determinada a partir do intervalo de viscosidade compreendido entre  $(170 \pm 20)$  cP, obteve-se para o ligante puro valores numa

faixa de  $145 \pm 8^\circ\text{C}$ , enquanto para os ligantes modificados por adição de partículas fracionadas de cal, para os teores de 3% e 7% os valores ficaram em torno de  $175 \pm 4^\circ\text{C}$  e para o teor de 5% os valores estão numa faixa de  $171 \pm 4^\circ\text{C}$ .

Tabela 8: Temperaturas de Usinagem e Compactação dos ligantes

AMOSTRA	T. Usinagem ( $^\circ\text{C}$ )		T. Compactação ( $^\circ\text{C}$ )	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média
<b>CAP 50/70</b>	152,8 - 136,3	144,5	150,5 - 115,0	132,8
<b>3%</b>	178,2 - 170,5	174,3	160,0 - 150,5	155,2
<b>5%</b>	175,8 - 167,0	171,4	155,2 - 144,0	150
<b>7%</b>	178,2 - 170,5	174,3	160,0 - 150,5	155,5

Analisando os valores médios, nota-se que o ligante modificado que apresenta menor temperatura de usinagem e compactação é o teor de 5%. Os teores de 3% e 7% apresentaram os mesmos resultados, o que era esperado pois suas curvas de viscosidade, praticamente, se sobrepõem. O aumento na viscosidade do ligante devido à adição da cal hidratada causou evidentemente um aumento na temperatura de usinagem, em quase  $27^\circ\text{C}$ , se considerado o ponto médio das faixas de temperaturas determinadas para o ligante puro e modificados.

Apesar do aumento significativo na temperatura de usinagem, o ligante modificado com 5% de cal (melhor alternativa energética dentre os teores estudados) ainda atende à especificação da norma DNIT 031/2006 – ES que define o intervalo conveniente para a temperatura do ligante ser trabalhado na mistura entre  $107^\circ\text{C}$  a  $177^\circ\text{C}$ . Considerando-se a faixa de temperatura normalmente utilizada na prática ( $145$  a  $165^\circ\text{C}$ ), a mistura com teor de 5% é a que melhor se aplica.

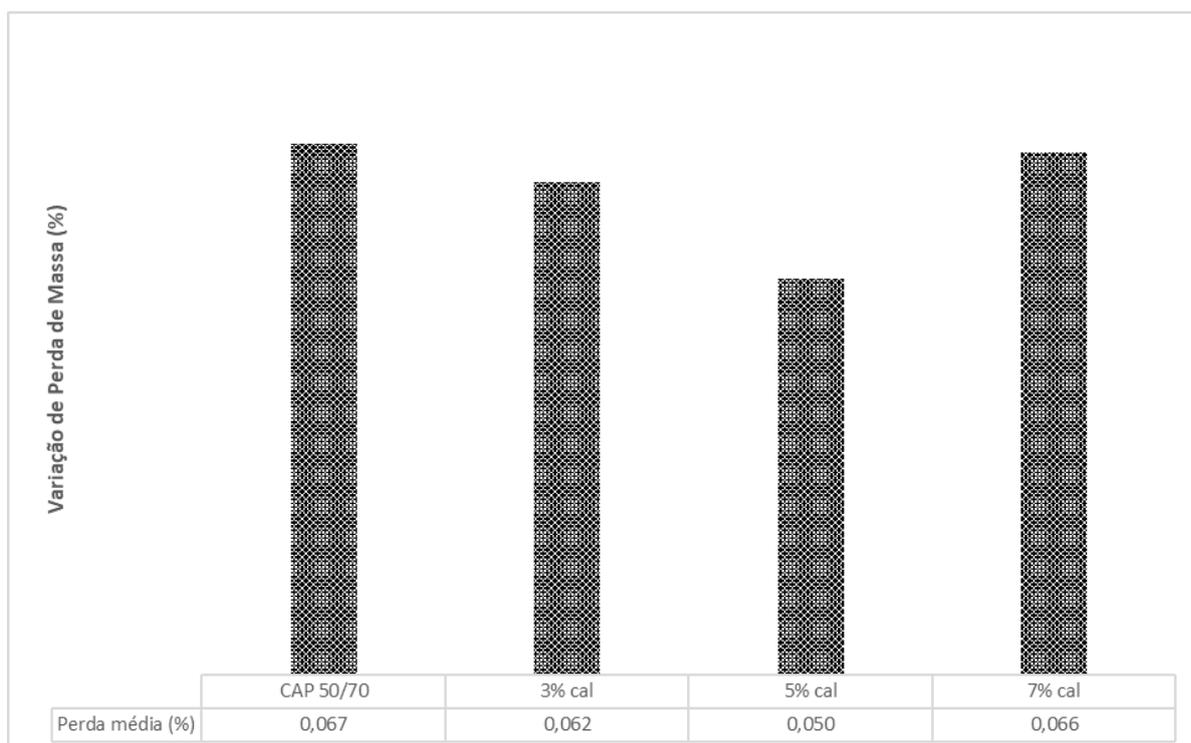
#### 4.2.4. Resultados do procedimento de envelhecimento no RTFO

A Tabela 9 apresenta os resultados das variações de massa dos ligantes modificados com partículas fracionadas de cal hidratada após a realização do procedimento em RTFO. A Figura 26 representa graficamente estes resultados. Os ligantes confeccionados com CAP 50/70 estão em conformidade com a Norma DNIT-095/2006-EM, que preconiza variações de massa inferiores a 0,5%.

Tabela 9: Resultados Procedimento RTFO

Teor	Perda média (%)
<b>Máx ANP</b>	0,500
<b>CAP 50/70</b>	0,067
<b>3%</b>	0,062
<b>5%</b>	0,050
<b>7%</b>	0,066

Figura 26: Resultados da variação de perda de massa por procedimento RTFO



Quando o ligante é submetido ao processo de envelhecimento, este perde massa pois há a volatilização dos componentes que lhe conferem propriedades viscoelásticas. Desta forma, quanto menor a perda de massa, maior a resistência à deformações permanentes e à fadiga do pavimento. Analisando os resultados, verifica-se que o teor que apresentou menor perda de massa foi o ligante modificado com teor de 5%, que apresentou perda média de 0,05%.

### 4.3. Propriedades reológicas dos ligantes modificados

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

O Grau de desempenho é o valor máximo de temperatura na qual os ligantes apresentam bom desempenho no pavimento. O ensaio realizado no Reômetro de Cisalhamento Direto fornece esta temperatura, na qual os valores de  $G^*/\sin\delta$  são superiores a 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para amostras virgens e envelhecidas no RTFO.

Nas Figuras 27 e 28, respectivamente, são ilustradas as curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura na faixa de 46 a 82°C para as amostras de ligantes puro e modificado, antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo.

Assim, observando as curvas apresentadas nas Figuras 27 e 28, verifica-se que a adição dos modificadores proporcionou o aumento do  $G^*/\sin\delta$  e, portanto, um incremento da temperatura máxima do PG, por classificação, para 76°C (PG 76-XX). Este incremento é interpretado pelo aumento no Módulo Complexo ( $G^*$ ), maior que o acréscimo no  $\sin\delta$ . Como  $G^*$  é parâmetro de rigidez houve aumento de viscosidade nas amostras modificadas permitindo a obtenção de um bom Grau de Performance (PG).

Figura 27: Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura

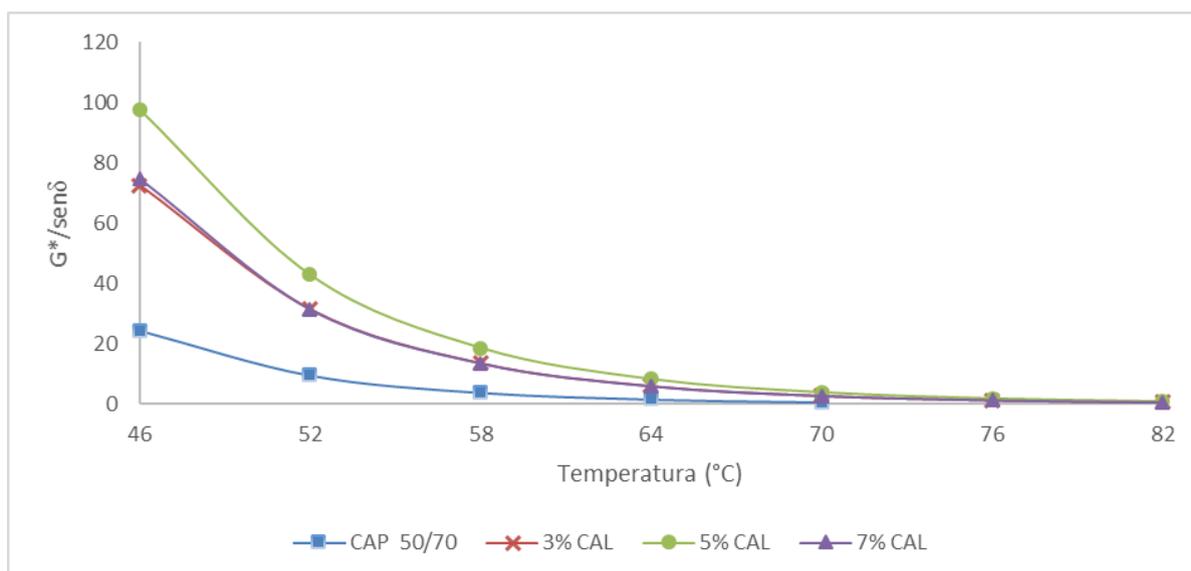
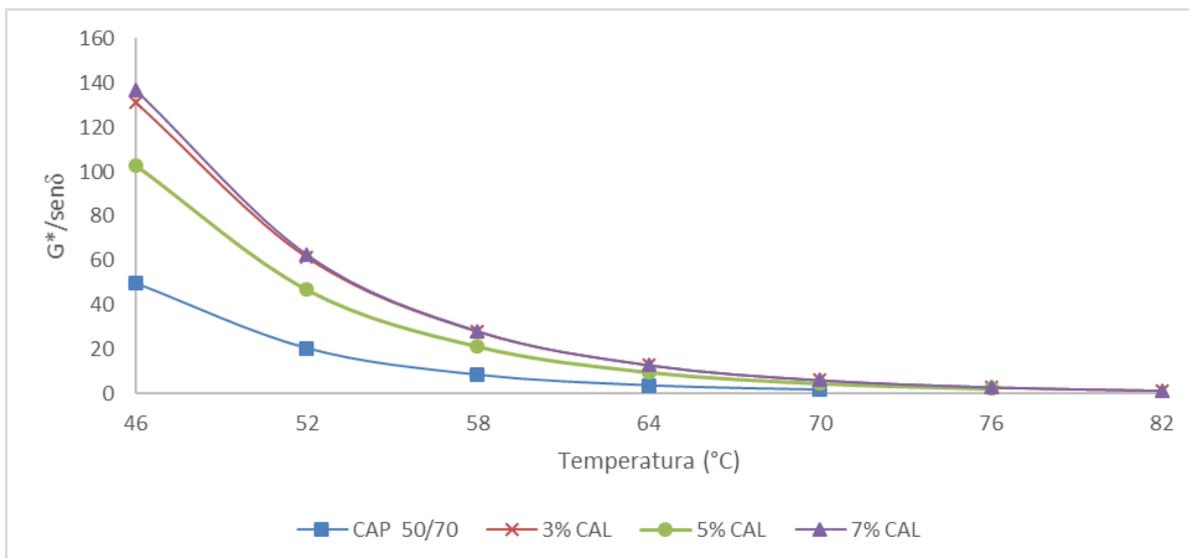


Figura 28: Curvas do  $G^*/\sin\delta$  versus temperatura após envelhecimento à curto prazo



Quando ocorre uma modificação dos ligantes pela adição de aditivos resultando na melhora de suas propriedades, estes podem ser utilizados em serviço com temperaturas maiores ou a temperatura máxima indicada para sua aplicação ou uso, quando comparados a ligantes em estado puro (ROSA JÚNIOR, 2015).

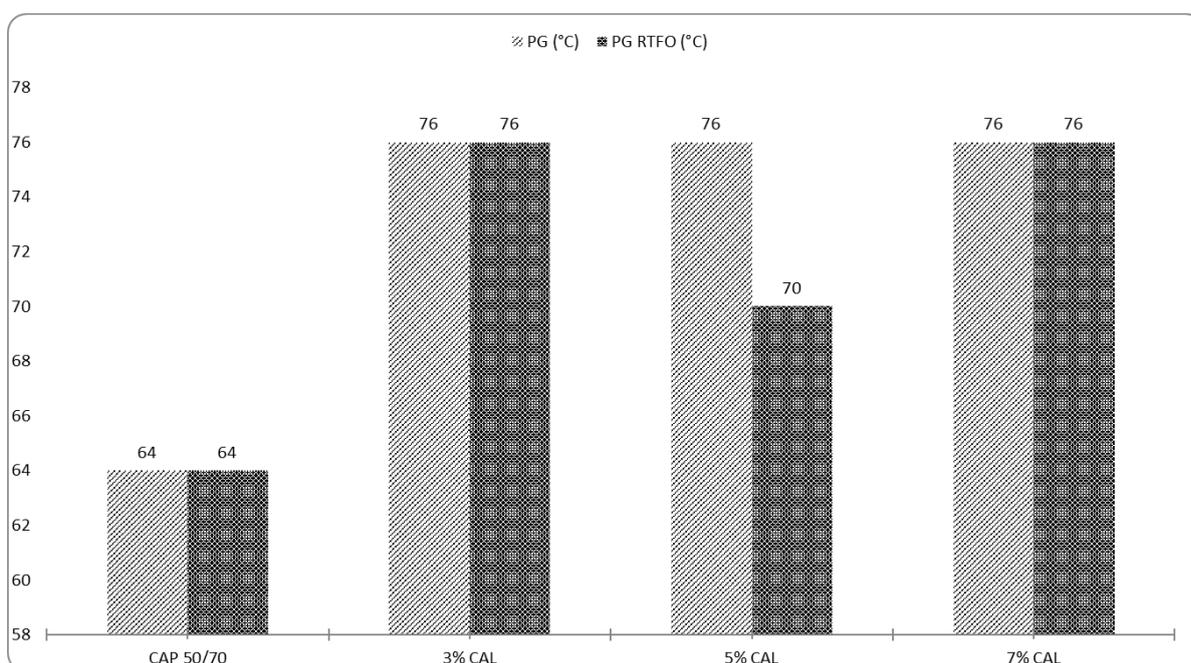
Com os resultados da Figura 29 verifica-se, também, que após o envelhecimento a curto prazo, a amostra do ligante modificado com teor de 5% de partículas fracionadas apresentou uma redução nos valores do parâmetro  $G^*/\sin\delta$  e conseqüentemente redução da temperatura máxima do PG para 70°C (PG 70-XX). Este resultado pode ser relacionado à temperatura do ensaio de Ponto de Amolecimento, onde a amostra com teor de 5% apresentou menor temperatura. Nas demais amostras modificadas, a temperatura máxima obtida para o PG manteve-se constante apresentando o valor de 76°C, o mesmo obtido nas amostras modificadas antes do envelhecimento a curto prazo.

É interessante salientar que o resultado deste ensaio é indicado em degraus de 6 em 6 °C para que haja a classificação do ligante a uma temperatura de segurança. No entanto, a temperatura real de falha é mostrada na Tabela 10, possibilitando uma melhor visualização da temperatura máxima a qual o ligante resiste à aplicações de tensões.

Tabela 10: Temperaturas de falha para ligantes puro e modificados

Amostra	Virgem	Envelhecida
<b>CAP 50/70</b>	67,9 °C	67,9 °C
<b>CAP 50/70 + 3% CAL</b>	72,2 °C	78,4 °C
<b>CAP 50/70 + 5% CAL</b>	80,8 °C	75,7 °C
<b>CAP 50/70 + 7% CAL</b>	78,4 °C	78,4 °C

Figura 29: Grau de desempenho do CAP 50/70 e teores das partículas fracionadas



Finalmente, pode-se inferir, a partir desses resultados, que todas as amostras com adição de partículas fracionadas de cal podem apresentar em serviço uma maior resistência à deformação permanente, quando comparadas as possíveis misturas asfálticas com a utilização de ligante puro.

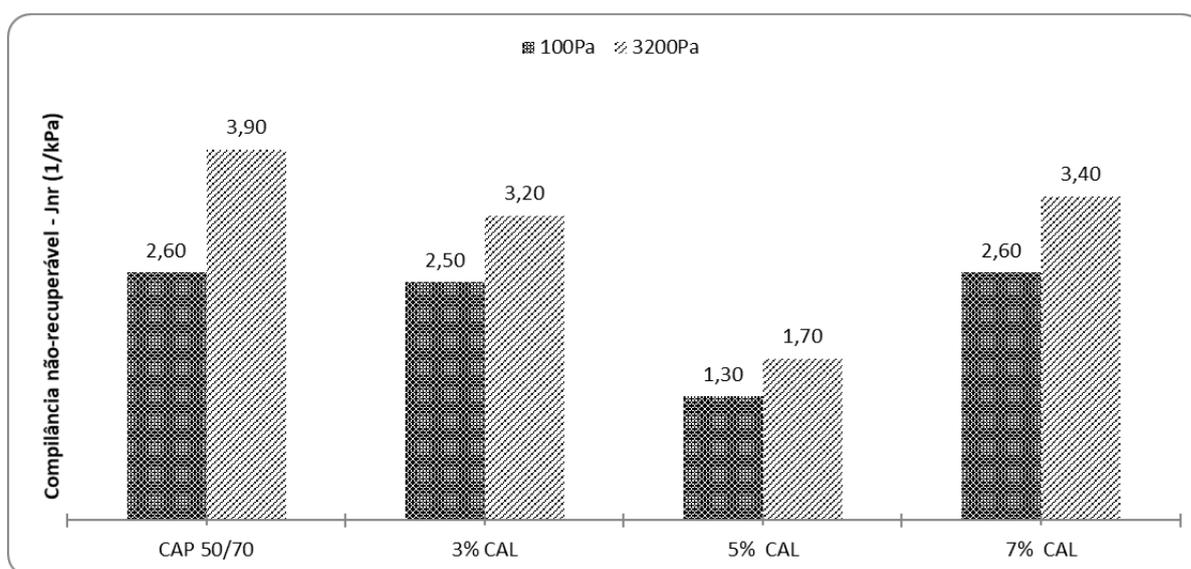
#### 4.3.2. Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

A partir deste ensaio é possível obter o nível de tráfego suportado pelo ligante. Quanto maior o valor de Jnr, o material se torna mais susceptível à deformação permanente. Por outro lado, menores valores de Jnr indicam resistência do ligante a este efeito. Outro parâmetro que se obtém com o ensaio de MSCR é a porcentagem de recuperação do ligante

quando submetido à variações de tensões.

A partir da análise dos valores de Jnr, mostrados na Figura 30, pode-se notar que, com a aplicação da tensão de 100Pa e 3200Pa, o ligante modificado com teor de 5% apresenta valores menores para compliância não-recuperável quando comparado ao ligante puro e aos outros teores. As amostras com 3 e 7% de cal apresentam alterações irrelevantes para tensão de 100Pa. Pode-se inferir desta informação que, para tráfegos baixos, estas misturas não trazem resultados significativos quanto à susceptibilidade à deformação permanente.

Figura 30: Valores da compliância não-recuperável (Jnr)



Segundo a AASHTO M320 (2016) pode-se fazer a relação entre os valores obtidos para o Jnr a 3200Pa e a classe de tráfego a qual o ligante se encontra. A Tabela 11 apresenta esta classificação. O ligante puro classifica-se a suportar tráfego padrão (S), assim como os ligantes modificados com teores de 3 e 7%, pois possuem Jnr entre  $2,0 \text{ kPa}^{-1}$  e  $4 \text{ kPa}^{-1}$ . Destaca-se que o ligante com teor de 5% possui menor valor de Jnr comparado ao ligante puro, apresentando valor entre os limites de  $1,0 \text{ kPa}^{-1}$  e  $2 \text{ kPa}^{-1}$ , este é classificado, portanto, a suportar tráfego pesado (H), sendo menos susceptível à deformação permanente dentre as amostras modificadas analisadas.

Tabela 11: Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de Jnr

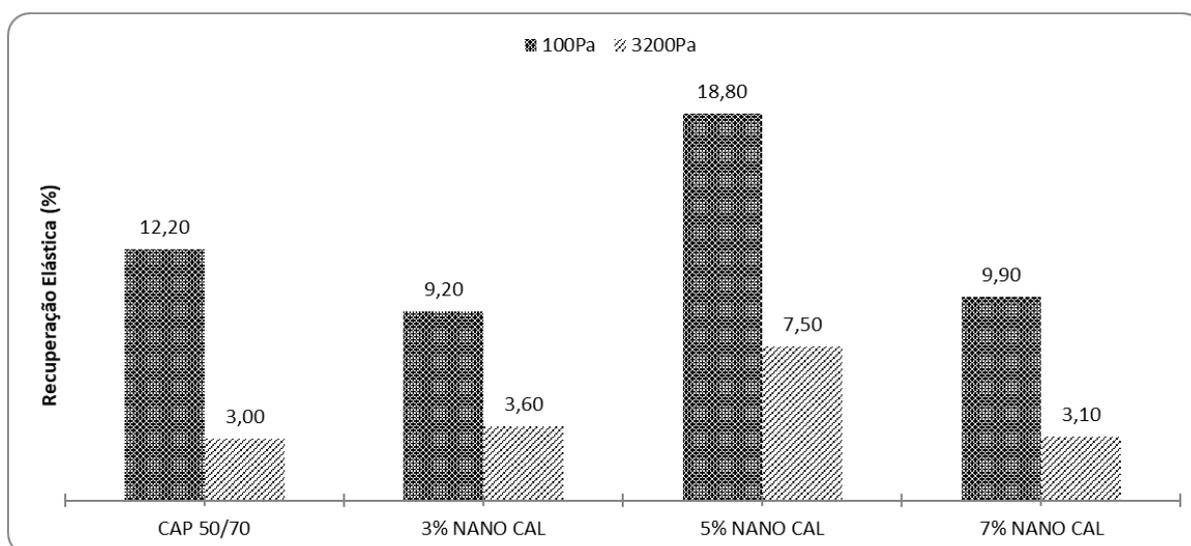
Propriedade	Jnr ( $kPa^{-1}$ )	Tipo de tráfego	Número de passadas em um eixo padrão
<b>Jnr a 3,2 kPa na temperatura máxima de PG</b>	2,0 – 4,0	Padrão (S)	<10 milhões
	1,0 – 2,0	Pesado (H)	>10 milhões
	0,5 – 1,0	Muito pesado (V)	>30 milhões
	0 – 0,5	Extremamente pesado (E)	>100 milhões

Fonte: AASHTO M320 (2016)

A porcentagem de recuperação MSCR (%Rec) pode identificar e quantificar o efeito do aditivo no ligante. Aumento nos valores percentuais deste parâmetro resulta na melhoria de uma modificação do ligante para manter características elásticas em altos níveis de tráfego.

A Figura 31 apresenta os resultados da recuperação elástica para os ligantes estudados. A adição dos modificadores promoveu o incremento do percentual de recuperação do material no nível de tensão de 3200Pa para todas as amostras, onde a amostra com 5% de cal apresentou maior valor. O aumento da recuperação elástica da amostra de mistura com 7% de modificador, neste nível de tensão, é insignificante por apresentar resultado similar ao ligante puro.

Figura 31: Porcentagem da recuperação a 100Pa e a 3200Pa para o ligante puro e amostras modificadas

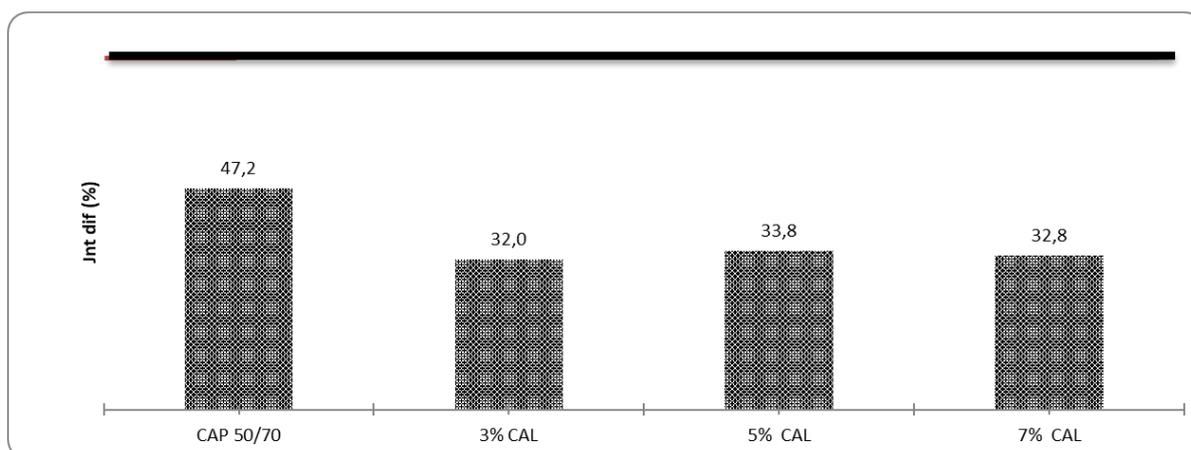


Diante das análises dos parâmetros de compliância não recuperável e porcentagem de recuperação elástica, o ligante que apresentou melhores resultados em relação à susceptibilidade à deformação e à recuperação elástica foi a mistura com adição de 5% de partículas de cal hidratada, apresentando capacidade de manter suas características elásticas em altos níveis de tráfego.

Para minimizar as preocupações de que alguns ligantes asfálticos podem ser excessivamente sensíveis às mudanças na tensão de cisalhamento, a AASHTO MP 19 (2012) estabeleceu a determinação da diferença percentual entre as compliâncias não recuperáveis de 100 Pa e 3200 Pa (Jnr diff), sendo um parâmetro adicional com o intuito de analisar a sensibilidade à diferença de tensões do material sob elevada temperatura. A norma indica que os valores de Jnr diff não devem ser superiores a 75%, significando que os ligantes que obedecerem este limite são considerados pouco sensíveis à variação de tensões bruscas a que podem ser submetidos.

Em relação aos resultados do Jnr diff observa-se que após a adição dos modificadores todas as amostras modificadas apresentam diferenças de percentuais inferiores a 75% com paridade entre os valores e distantes deste valor. Pode-se então definir que quando comparadas ao CAP 50/70 todas amostras modificadas são menos sensíveis a variação de tensões. A Figura 32 mostra os valores obtidos de Jnr diff das amostras estudadas. O limite especificado por norma está representado pela linha contínua.

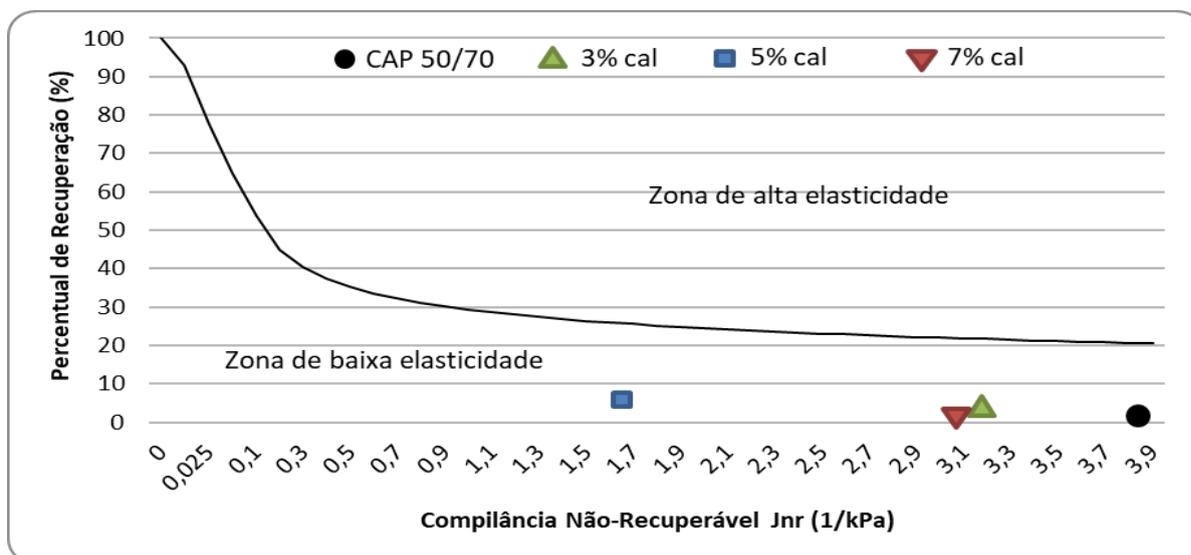
Figura 32: Valores de Jnr diff (%) dos ligantes estudados



Com o objetivo de analisar o nível elasticidade das amostras estudadas é apresentado na Figura 33 os valores percentual de recuperação (R%) em versus a compliância não-

recuperável (Jnr). Percebe-se que todas as amostras estão localizadas na zona de baixa elasticidade.

Figura 33: Valores do percentual de recuperação versus a compliância não recuperável



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

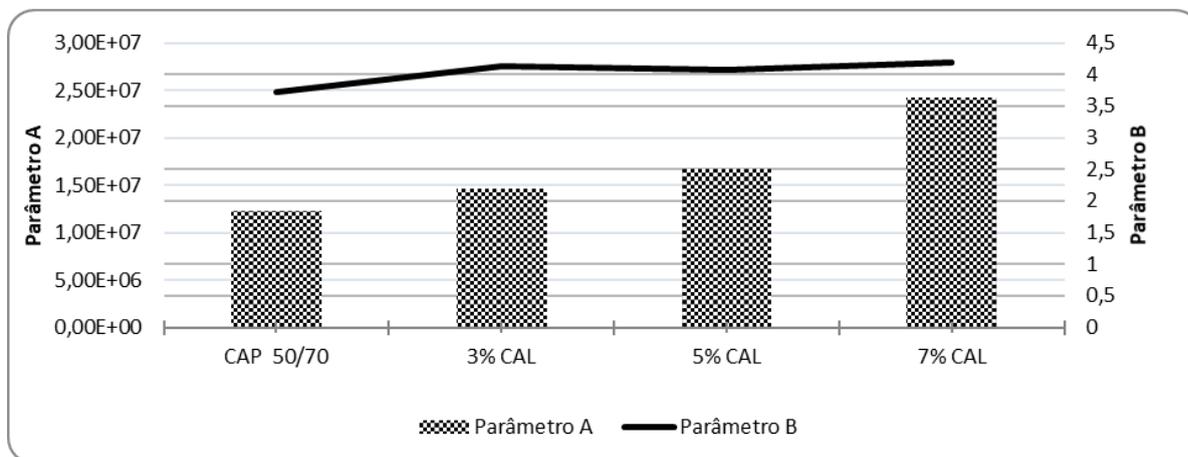
O ensaio de varredura linear de amplitude é determinístico na averiguação da vida de fadiga dos ligantes asfálticos. Como resultado, apresenta dois parâmetros: A e B. O parâmetro A, obtido pela varredura de amplitude, está relacionado à variação da integridade do material devido ao dano acumulado. Valores maiores de A significam dizer que a amostra manteve sua integridade inicial. Já o parâmetro B, dado pela varredura de frequência, está relacionado à sensibilidade a deformações. Este último é a inclinação da reta da frequência versus o módulo de armazenamento ( $G'$ ), em que quanto maior o valor de B, mais susceptível é o ligante a deformações sob variações de temperaturas.

A Figura 34 apresenta a variabilidade dos parâmetros A e B na resistência ao dano obtidos por meio do ensaio de varredura linear de amplitude para as amostras com o CAP 50/70, modificados com partículas fracionadas de cal hidratada.

Pode-se observar da Figura 34 que houve incremento nos valores do parâmetro A com a adição das partículas fracionadas em relação ao ligante puro. Desta maneira, o material que manteve maior integridade da amostra foi o ligante modificado com 7% de cal. Em comparação ao ligante puro, obteve-se um aumento de 97,72% deste parâmetro. Os demais teores obtiveram aumentos de 19% para o teor de 3% e 36% para o teor de 5% de cal. O parâmetro B, analisado por meio da inclinação da reta apresentada, demonstra que dentre os ligantes modificados, a amostra de CAP 50/70 + 3% de cal se mostrou mais sensível a níveis

de deformação, o que não é desejado para os ligantes asfálticos. Já a amostra com 5% demonstrou melhor resultado, com uma menor inclinação da reta.

Figura 34: Parâmetros A e B para CAP 50/70 e ligantes modificados



A Figura 35 e a Tabela 12 representam os resultados obtidos para estimativa da vida de fadiga do ligante puro e modificado com cal em diferentes níveis de deformação: 2,5%, 5% e 10%.

Figura 35: Estimativa da vida de fadiga do CAP 50/70 nos teores de 0%, 3%, 5% e 7% de cal

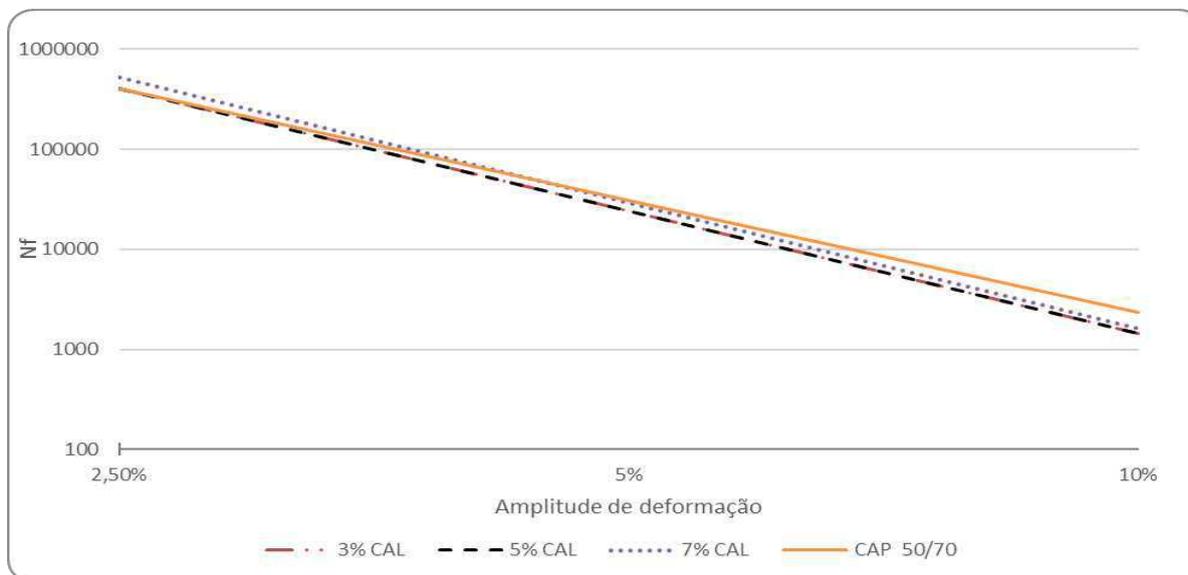


Tabela 12: Valores estimados para vida de fadiga do ligante puro e teores de cal

<b>Amplitude de deformação</b>	<b>2,50%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>
<b>CAP 50/70</b>	406371	30875	2346
<b>3% CAL</b>	332161	19010	1088
<b>5% CAL</b>	401286	23946	1429
<b>7% CAL</b>	525945	29003	1500

A partir da Tabela 12 pode-se notar que a mistura com 7% de cal hidratada apresenta os maiores valores de estimativa de vida de fadiga dentre os teores estudados.

## 5. CONCLUSÃO

Os efeitos de partículas fracionadas de cal hidratada adicionadas no ligante asfáltico foram investigados por meio de experimentos de laboratório chegando às seguintes conclusões:

- a moagem da cal hidratada pelo moinho de bolas nas condições realizadas (duração de 50 minutos e sem uso de surfactante) não resultou em partículas em escala nanométrica. O material obtido foi utilizado como aditivo do ligante para análise reológica;
- em todos os resultados obtidos pelos ensaios empíricos, os ligantes puro e modificado estiveram dentro dos limites preconizados pela ANP e DNIT, não comprometendo o desempenho desse material;
- os resultados dos ensaios físicos demonstraram aumento de rigidez dos ligantes modificados em relação ao ligante puro, indicando suportar maiores temperaturas em campo. Os ensaios reológicos confirmaram esta hipótese, onde o grau de desempenho dos ligantes modificados atingiu maiores temperaturas de falha;
- o resultado das perdas de massa obtido por meio do procedimento de envelhecimento a curto prazo mostrou que a modificação com a cal moída atribuiu propriedades antioxidantes ao ligante;
- destaca-se que o ligante modificado com teor de 5% de partículas fracionadas de cal hidratada apresentou melhores resultados quanto à resistência a deformação e a fadiga, apresentando também menor sensibilidade à variação de temperatura e, conseqüentemente, à oxidação;
- baseado nas análises físicas e reológicas realizadas foi possível validar o uso do aditivo, atestando a hipótese deste estudo. De forma geral, a incorporação de partículas fracionadas de cal hidratada caracteriza-se como uma alternativa viável a fim de se obter melhorias no desempenho do ligante asfáltico.

### 5.1. Sugestões para pesquisas futuras

Com o objetivo de melhorar e dar continuidade e aprofundamento ao objeto desta pesquisa é sugerido os seguintes estudos:

- estudo da moagem da cal fazendo uso de isopropanol como controlador de moagem, aumentando o tempo de procedimento, a fim de se obter partículas

em escala nanométrica;

- estudos de propriedades reológicas de ligantes modificados com o aditivo pesquisado, nas proporções encontradas, a partir de amostras submetidas ao envelhecimento a longo prazo;
- estudo de propriedades reológicas de ligantes modificados com o aditivo pesquisado, em proporções entre 5 e 7%;
- análise das propriedades químicas segundo o procedimento SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos).
- estudos de Dosagens Marshall e Superpave a partir de parâmetros como: Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico e Vida de Fadiga;

## REFERÊNCIAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation. AASHTO M 320: *Standard specification for performance-graded asphalt binder*. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2016.

\_\_\_\_. AASHTO TP 101-14: *Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep*. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2012.

\_\_\_\_. AASHTO MP 19-10: *Standard specification for performance- graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR) test*. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2012

\_\_\_\_. NBR 15184: *Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional*. Rio de Janeiro-RJ, 2004.

\_\_\_\_. NBR 6560: *Materiais Betuminosos – Determinação do Ponto de Amolecimento – Método do anel e bola*. Rio de Janeiro – RJ, 2008.

\_\_\_\_. NBR 6576: *Materiais Betuminosos – Determinação da Penetração*. Rio de Janeiro – RJ, 2007.

ALI, S. I. A.; ISMAIL, A.; KARIM, M. R.; YUSSOF, N. I.; AL-MANSOB, R. A.; ABURKABA, E. *Performance Evaluation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticle-Modified Asphalt Binder*. Road Materials and Pavement Design, 2016.

ALVARADO, M. J. J., *Análisis del efecto de nano partículas de cal hidratada en el desempeño del ligante asfáltico*. Projeto de graduação (Tese). Costa Rica, 2015.

ANP Nº 19. *Regulamento Técnico para Realização dos Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento e Elaboração do Relatório Demonstrativo*. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2005.

ASPHALT INSTITUTE. *SUPERPAVE mix design*. SUPERPAVE Series No. 2 (SP-2), 3. ed., 2001.

ASTM D2493 / D2493M-16, *Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

\_\_\_\_\_. D2872-04, *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

\_\_\_\_\_. D6373-16, *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

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

BARROS, A. D., LUCENA, L. C. F. L., COSTA, D. B. *Rheological properties of hydroxide and calcium oxide nanoparticles in asphalt binder*. *Petroleum Science and Technology*, vol 35, no. 7, 738-745, 2017.

BELL, C. A., WIEDER, A.J. & FELLIN, M.J. *Laboratory Aging of Asphalt-aggregate Mixtures: Field Validation*. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington-DC, 1994.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J. B. “*Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros*”. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2010.

BIANCHETO, H. MIRÓ, R.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MARTÍNEZ, A. H. *Effect of Calcareous Fillers on Bituminous Mix Aging*. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, nº 1998, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 2007.

BOCK, A. L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. *Avaliação de diferentes métodos de adição de cal em misturas de concreto asfáltico*. *Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço*, 2009.

BRINGEL, R. M. *Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos*. Dissertação (Mestrado em Química Orgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

CHENG, J., SENH, J., ANDXIAO, F. *Moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing nanosized hydrated lime*. J. Mater. Civ. Eng. 23:1552–1559, 2011.

CORREIA, D.Z. *Estudo de Misturas Poliméricas para Recuperação de Petróleo*. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CRUCHO, J. M. L., NEVES, J. M. C., CAPITÃO, S. D., PICADO-SANTOS, L. G., GARCIA, R. F. M., *Estudo experimental sobre os efeitos da modificação com nanopartículas nas propriedades do betume*, Lisboa, Portugal, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 131/2010. “*Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola*.” Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. ES 031/2006. “*Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*”. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. ME 095/2006. “*Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de material*.” Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. TER. “*Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia*”. Rio de Janeiro, 2006.

DIAB, A., WANG, H., & YOU, Z. *Reological Evaluation of Foamed WMA Modified with Nano*. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals, 2013.

FANG, C.; RUIEN YU, S. L.; LI, Y. “*Nanomaterials Applied in Asphalt Modification: A Review*.” Journal of Materials Science & Technology, 2013.

FAXINA, A. L. *Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, São Paulo, SP. 286 p., 2006.

FERNANDES, M. R. S. *Efeito de aditivo tipo óleo de enxofre na reologia de CAPs modificados com SBS*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FONSECA, O.A. *Development of a time-dependent model for the dynamic modulus of asphalt mixes*. Tese (Doutorado) – University of Maryland, Maryland, 1995.

FONTES, L. P. T. L. *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

GAJOVIC, A; FURIC, K; MUSIC, S. *Ball-milling of TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>*, 2002.

GAMA, D. A. *Efeito da Adição de Polímeros Reativo, Não-Reativo e Ácido Polifosfórico e Suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

GOUVEIA, L. T. *Influência de Propriedades dos Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

GRANDE, W. R. *Efeitos da Cal Hidratada e do Ácido Polifosfórico nas Propriedades Mecânicas e Suscetibilidade à Umidade de Misturas Asfálticas Densas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

HAMEDI, G. H; NEJAD, F. M; OVEISI, K. *Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide*. *Materials and Structures*, 2016.

HINTZ, C., VELASQUEZ, R., JOHNSON, C., AND BAHIA, H. *Modification And Validation Of The Linear Amplitude Sweep Test For Binder Fatigue Specification*. Transportation Research Board, 99–106, 2011.

ILDEFONSO, J. S. *Análise da viabilidade técnica da utilização do copolímero etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas (processo seco)*. 2007. 335 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

JAHROMI, S. G., & KHODAII, A. *Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder*. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2894–2904, 2009.

JOHNSON, C. M. *Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using An Accelerated Test Method*. Tese (Doutorado), University of Wisconsin, Madison, WI, 2010.

KANDHAL, P. S.; CHAKRABORTY, S. *Evaluation of Voids in the Mineral Aggregate for HMA Paving Mixtures*. National Center for Asphalt Technology. NCAT Report No. 96-4. Mar, 1996.

KAVUSSI A. & BARGHABANY P. *Investigating Fatigue Behavior of Nanoclay and Nano Hydrated Lime Modified Bitumen Using LAS Test*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015.

KIM Y., LUTIF J. S., BHANSIN A., LITTLE D. N. *Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008.

LU, X. *Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology*. Construction and Building Materials, no. 16, p. 15- 22, 2002.

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

MACHADO, J. C. V. *Reologia e Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria do Petróleo*. 1º ed., Interciência, Rio de Janeiro, 2002.

MARINHO FILHO, P. G. T. *Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2017.

MIRZA, M.W., & WITCZAK, M.W. *Development of a global aging system for short and long term aging of asphalt cements*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1995.

MOTHÉ, M. G. *Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica*. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

NASCIMENTO, T. C. B. *Efeito Dos Envelhecimentos Termo-Oxidativo E Foto-Oxidativo Sobre Propriedades Reológicas De Ligantes Asfálticos Modificados*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NCHRP – NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. *Incorporation of reclaimed asphalt pavement in the SUPERPAVE System*, 2001.

NEGRÃO, D. P.; *Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do Ripo RET para Aplicação em Pavimentos*; Dissertação de Mestrado; USP; São Paulo – SP, 2006.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; PERAÇA, V.; TSUKUDA, R. S. *Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 2007.

PREUSSLER, E.S. & PINTO, S. *Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*. Editora Copiarte. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

READ, J., e C. D. WHITEOAK. *The shell bitumen handbook. Fifth edition*. London: Thomas Telford Publishing, 2003.

ROSA JÚNIOR, M. *Estudo das Propriedades Reológicas do Cimento Asfáltico de Petr[oleo (CAP50/70) Modificado com Polímeros Funcionalizados*. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SAHA, M. C., NILUFAR, S. *Nanoclay reinforced syntactic foams: flexure and thermal behavior*. 31:1309–1494, 2010.

SHAFABKSH, G. H.; ANI, O. J. *Experimental Investigation Of Effect Of Nano Tio2/Sio2 Modified Bitumen On The Rutting And Fatigue Performance Of Asphalt Mixtures Containing Steel Slag Aggregates*. Construction and Buildings Materials. V. 98. 692-702, 2015.

SHELL. *The Shell bitumen handbook*. 5. ed. London: Thomas Telford, 2003.

SHEN, J. A. *Pavement performance of asphalt and asphalt concrete*. Beijing, China: China Communication Press, 2011.

SHRP – STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. *Stiffness of asphalt-aggregate mixes*. A-388. Washington, 1994.

SUN, Z.; YI, J.; HUANG, Y.; FENG, D.; GUO, C. *Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil*. Construction and Building Materials. China. n. 102, p. 496-504, 2016.

TONIAL, I.A. *Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2001.

WHITEOAK, D. *Bitumen Handbook*. SHELL, Inglaterra, 1991.

YOU, ZHANPING, JULIAN MILLS-BEALE, JUSTIN M. FOLEY, SAMIT ROY, E GREGORY M. ODEGARD. “*Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization*.” Construction and Building Materials, 2011.

ZEGARRA, J. R. E. *Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS Tipo I 60/60 e PG 76-22*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ZHANG, H; ZHU, C; YU, J; SHI, C; ZHANG, D. *Influence of surface modification on physical and ultraviolet aging resistance of bitumen containing inorganic nanoparticles*. Construction and Building Materials, 2015.