



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS VIII  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLOGIA E SAÚDE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ANDRESA DE OLIVEIRA SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE LIGANTES  
ASFÁLTICOS: CAP 50-70, CAP 55-75 E CAP AB-8**

ARARUNA  
2017

**ANDRESA DE OLIVEIRA SILVA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE LIGANTES  
ASFÁLTICOS: CAP 50-70, CAP 55-75 E CAP AB-8**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Pavimentação.

**Orientador:** Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti

ARARUNA  
2017

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

S586e Silva, Andresa De Oliveira  
Estudo do comportamento reológico de Ligantes asfálticos:  
CAP 50-70, CAP 55-75 e CAP AB-8 [manuscrito] / Andresa De  
Oliveira Silva. - 2017.  
54 p. : il. color.

Digitado.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em  
ENGENHARIA CIVIL) - Universidade Estadual da Paraíba,  
Centro de Ciências Tecnologia e Saúde, 2017.  
"Orientação: Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti,  
Departamento de Engenharia Civil".

1. Asfalto. 2. Asfalto modificado. 3. Reologia. I. Título.  
21. ed. CDD 625

ANDRESA DE OLIVEIRA SILVA

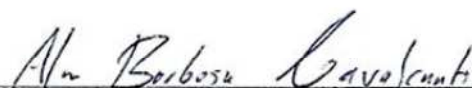
**ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE LIGANTES  
ASFÁLTICOS: CAP 50-70, CAP 55-75 E CAP AB-8**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

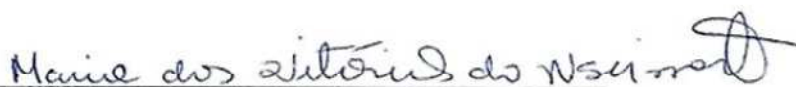
Área de concentração: Pavimentação.

Aprovada em: 21/05/2017.

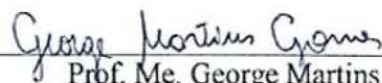
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Ma. Maria das Vitórias do Nascimento  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. George Martins Gomes  
Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN)



A minha família, pela dedicação,  
companheirismo e apoio, DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

Como disse uma vez Anitelli: “Sonho parece verdade quando a gente esquece de acordar”. Hoje, um sonho vira realidade, e eu não conseguiria alcançar nada disso sozinha. Por isso agradeço a todos que passaram pelo meu caminho e que de alguma forma contribuíram para que este sonho pudesse ser concretizado.

A Deus pela minha vida, pelo seu amor que transcende tudo. Agradeço aos meus pais, Josué e Iraní, meus maiores alicerces nessa construção. Obrigada por cada incentivo e orientação. A minha avó Dôra por todo amor e pelas orações ao meu favor.

A minha irmã, Aline, por todo amor e ajuda na construção deste trabalho. Aos tios e tias e aos meus primos que sempre estiveram presentes, ainda que à distância.

Ao professor Alan Barbosa Cavalcante que, com muita paciência e atenção, dedicou seu valioso tempo para me orientar em cada passo deste trabalho. Aos professores do curso de Engenharia Civil da UEPB, pela contribuição na minha vida acadêmica e por tanta influência na minha futura vida profissional.

Aos meus colegas de classe, em especial Augusto, Romel, Sávio, Bruno, Mayk, Yuri, Andreia, Allan e Manoel. A quem aprendi a amar e construir laços. Aos amigos que dividiram essa jornada comigo Rafael, Nilo, Mellynna, Caroline, Sabrinna, Thiago, Ingridy, Cinthia e Andrea. Obrigada por todos os momentos que fomos estudiosos, brincalhões, atletas, músicos e cúmplices. Porque em vocês encontrei verdadeiros irmãos. Obrigada pela paciência, pelos sorrisos, abraços e pelas mãos que sempre se estendiam quando eu precisava. Esta caminhada foi muito mais leve por ter vocês ao meu lado.

Obrigada a todos que mesmo não estando citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa.

“É preciso força pra sonhar e perceber que a estrada vai além do que se vê.” Los Hermanos

## RESUMO

O pavimento tem um papel fundamental na integração e no desenvolvimento do país. Durante a sua vida útil o asfalto apresenta uma determinada deterioração, tal processo também é chamado de envelhecimento e uma das suas principais causas é a variação da temperatura. A aplicação de materiais poliméricos no asfalto vem sendo utilizada como uma alternativa para o combate a estes problemas, trazendo uma maior durabilidade a via. O Brasil encontra-se em 111º lugar no ranking mundial da qualidade das rodovias, além de possuir a pior posição do ranking entre os países da América do Sul. Estes números revelam o alto nível de envelhecimento encontrado nas rodovias do país. A produção brasileira de pneus é de 40 milhões de pneus por ano e quase metade dessa produção, os pneus inservíveis, é descartada nesse período de forma inadequada, criando, assim, um problema ambiental. Nesse contexto, a utilização de borracha de pneu em ligantes asfálticos torna-se viável e relevante, pois se trata de um material que é descartado e que dessa forma passa a contribuir de maneira direta para a degradação do meio ambiente. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades reológicas do CAP 50/70, CAP 55-75 modificado com polímero SBS e do CAPAB-8 modificado com borracha de pneus. A reologia tem por objetivo principal encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura. Para isto foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, RTFOT e especificação do grau de desempenho. Ao se realizar os ensaios necessários constatou-se que as propriedades físicas dos ligantes foram satisfatórias para a utilização na pavimentação. O CAP modificado pelo polímero (SBS) e borracha contribui para o aumento da viscosidade, bem como no ponto de amolecimento, reduzindo a susceptibilidade térmica e também favorecendo a menor ocorrência de deformações. O ligante que apresentou melhor desempenho em relação aos ensaios realizados foi o CAP AB-8, apresentando maior viscosidade, menor susceptibilidade térmica e maior PG antes e após o envelhecimento por RTFOT, indicando que o CAP modificado pode resistir a maiores temperaturas durante sua vida de serviço.

**Palavras-Chave:** Asfalto; Asfalto modificado; Reologia.

## ABSTRACT

The pavement is of fundamental importance in the integration and development of the country. During its useful life the asphalt presents deterioration, this process is also called aging and one of its main causes is the temperature variation, the application of polymeric materials on the asphalt has been used as an alternative to combat this problem, bringing greater durability to the road. Brazil ranks 111th in the world ranking of road quality, in addition to having the worst position in the ranking among the countries of South America. These figures show the high level of aging found in the country's highways. The Brazilian tire production is 40 million tires per year, and almost half of that production, the waste tires, is discarded in that period in an inadequate way, creating an environmental problem. In this context, the use of tire rubber in asphalt binders becomes feasible and relevant, because it is a material that is discarded and that in this way contributes directly to the degradation of the environment. This work aimed to evaluate the rheological properties of CAP 50/70, CAP 55-75 modified with SBS polymer and tire-modified CAPAB-8. The rheology has as main objective to find the relation between deformation, tension, time of application of the load and temperature. For this purpose, penetration tests, softening point, rotational viscosity, RTFOT and performance grade were performed. In carrying out the necessary tests it was found that the physical properties of the binders were satisfactory for use in paving. The CAP modified by polymer (SBS) and rubber contributes to increased viscosity, as well as the softening point, reducing the thermal susceptibility and also favoring the fewer occurrences of deformations. The binder that presented the best performance in relation to the tests performed was CAP AB-8, presenting higher viscosity, lower thermal susceptibility and higher PG before and after aging by RTFOT, indicating that the modified CAP can withstand higher temperatures during its service life.

**Keywords:** Asphalt; Modified asphalt; Rheology.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Esquema simplificado de produção de destilados e asfalto	18
Figura 02 – Esquema de produção de asfalto em um estágio	19
Figura 03 – Esquema de produção de asfalto por dois estágios de destilação	19
Figura 04 – Etapas do processo de fragmentação de pneus	22
Figura 05 – Layout de um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico	31
Figura 06 – Cálculo do Módulo complexo de cisalhamento $G^*$ e do ângulo de fase ( $\delta$ )	32
Figura 07 – Exemplos de resultados de ângulos de fase de dois asfaltos diferentes	32
Figura 08 – Determinação do PG	33
Figura 09 – Grau de desempenho para asfaltos	34
Figura 10 – Caracterização dos Materiais	35
Figura 11 – Penetrômetro	37
Figura 12 – Ensaio de ponto de amolecimento	38
Figura 13 – Viscosímetro Rotacional	39
Figura 14 – Envelhecimento a curto prazo	40
Figura 15 – Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo	26
Tabela 2 – Especificação de asfalto-polímero (SBS) da comissão de asfalto IBP	27
Tabela 3 – Especificação de asfalto-Modificado por borracha (AMB)	28
Tabela 4 – Parte da especificação SHRP ou SUPERPAVE de ligantes asfálticos tipo CAP (ASTM 63+73/1999)	30
Tabela 5 – Temperatura de usinagem dos agregados para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8.	47

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados da Penetração para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8, antes e após o RTFOT	42
Gráfico 2 – Ponto de amolecimento para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8, antes e após o RTFOT	43
Gráfico 3 – Viscosidade para o CAP 50-70, antes e após o RTFOT	44
Gráfico 4 – Viscosidade para o CAP 55-75, antes e após o RTFOT	44
Gráfico 5 – Viscosidade para o CAP AB-8, antes e após o RTFOT	45
Gráfico 6 – Temperatura de usinagem para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8	46
Gráfico 7 – Temperatura de compactação para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8	46
Gráfico 8 – Perda média de massa para o CAP 50-70, CAP 55/75 e CAP AB -8	47
Gráfico 9 – Grau de desempenho para o CAP 50-70, CAP 55/75 e CAP AB-8, antes e após o RTFOT	48



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMB	Asfalto modificado por borracha
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CNT	Confederação Nacional de transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DSR	Reômetro de Cisalhamento Direto
NBR	Norma Brasileira Registrada
PG	Grau de Desempenho
RTFOT	Rolling Thin-Film Over
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SHRP	Programa de Pesquisa de Rodovias
UV	Radiação ultravioleta

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G^*$	Módulo complexo de cisalhamento
$\tau_{máx}$	Tensão de cisalhamento aplicada
$\gamma_{máx}$	Deformação devido à tensão de cisalhamento
$\omega$	Frequência angular
$\delta$	Ângulo de fase
$\Delta t$	Tempo de defasagem
%	Porcentagem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1.	OBJETIVOS	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1.	BREVE HISTÓRICO	16
2.2.	CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO	17
2.3.	ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMERO	20
2.4.	BORRACHA	20
2.5.	ASFALTO MODIFICADO POR BORRACHA	22
2.6.	INCORPORAÇÃO DA BORRACHA	23
2.7.	REOLOGIA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS	24
2.8.	CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS	25
<b>2.8.1</b>	<b>Caracterização comum</b>	<b>25</b>
<b>2.8.2</b>	<b>Caracterização SUPERPAVE.</b>	<b>28</b>
2.9	REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO – DSR.	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
3.1.	MATERIAIS	35
3.2.	MÉTODOS	36
<b>3.2.1</b>	<b>Ensaio de Penetração</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Ponto de Amolecimento</b>	<b>37</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Viscosidade Brookfield</b>	<b>38</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Envelhecimento a curto prazo – RTFOT</b>	<b>39</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>42</b>
4.1.	PENETRAÇÃO	42
4.2.	PONTO DE AMOLECIMENTO	43
4.3.	VISCOSIDADE ROTACIONAL (BROOKFIELD)	44
<b>4.3.1</b>	<b>Temperaturas de Manuseio dos Asfaltos</b>	<b>45</b>
4.4.	ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO – RTFO	47
4.5.	ENSAIO REOLÓGICO DE PG (PERFORMANCE GRADED)	48
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O pavimento tem um papel muito importante na integração e no desenvolvimento do país intensificando a indústria e o comércio, dessa forma é de suma importância que seu bom desempenho durante sua vida útil seja garantido.

De acordo com a pesquisa da confederação Nacional do Transporte (CNT), realizada em 2016, as rodovias nacionais encontram-se em uma situação de elevado grau de deficiência com 6,3% de suas rodovias em estado péssimo, 17,3% ruim, 34,6% regular, 30,2% bom e 11,6% ótimo. O que coloca o Brasil em 111º lugar no ranking mundial da qualidade das rodovias, além de possuir a pior posição do ranking entre os países da América do Sul. Estes números revelam o alto nível de envelhecimento encontrado nas rodovias do país o que compromete o seu desenvolvimento.

O pavimento flexível consiste em uma superfície relativamente fina construída de base, sub-base, e eles repousam sobre o subleito compactado. (YODER, 1959). Ao se pavimentar uma via de circulação de veículos se espera, antes de tudo, a melhoria operacional do tráfego, criando-se uma superfície mais regular (o que garante maior conforto no deslocamento do veículo), uma superfície mais aderente (que garante mais segurança em condições de pista molhada), seja qual for a melhoria física. (BALDO, 2007)

Durante a sua vida útil o asfalto apresenta deterioração das suas propriedades, tal processo também é chamado de envelhecimento e surge devido à presença do oxigênio, radiação ultravioleta (UV), variações de temperatura e de maneira indireta pelo o esforço do tráfego de veículos. O processo de envelhecimento causa o aumento da rigidez da mistura betuminosa, e essa rigidez combinada com a ação do tráfego leva ao surgimento de fissuras e a degradação do pavimento. (SILVA, 2005)

O pneu possui papel fundamental e insubstituível em nossa vida diária, tanto no transporte de passageiros quanto para cargas. Os pneus inservíveis se tornaram um problema, devido à grande quantidade existente e o descarte inadequado, tornando-se assim um grande fator de degradação ambiental. A produção brasileira de pneus é de 40 milhões de pneus por ano e quase metade dessa produção é descartada nesse período de forma inadequada. (COELHO et al., 2014)

Nesse contexto, a utilização de borracha de pneu em ligantes asfálticos torna-se viável e relevante, pois se trata de um material que é descartado e que contribui de maneira

direta para a degradação do meio ambiente, além disso, se misturado ao asfalto, a borracha de pneu pode modificar as propriedades reológicas do mesmo.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades reológicas do ligante asfálticos CAP 50-70, CAP AB-8 e CAP 55-75.

Atribuem-se objetivos específicos:

- Avaliar as propriedades físicas dos ligantes;
- Avaliar as propriedades reológicas dos ligantes a partir do ensaio de cisalhamento direto (DSR) e do ensaio de estufa de película delgada e rotacional;
- Comparar com o comportamento dos ligantes analisados, frente aos ensaios realizados, observando qual apresenta melhor desempenho.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. BREVE HISTÓRICO

Em 1870, foi construído o primeiro pavimento com revestimento betuminoso em Newark, New Jersey (EUA), por intermédio do químico belga E. J. Desmedt; em 1876, em Washington (D.C) se executava pela primeira vez o revestimento betuminoso do tipo *sheet asphalt* com material asfáltico importado de lago. (Asphalt Institute, 1973)

A primeira rodovia pavimentada no Brasil da qual se tem registro histórico é a ligação São Paulo-Santos. O mérito da obra deve ser atribuído, do ponto de vista de engenharia, aos engenheiros da Escola de Fortificação de Lisboa, conhecedores das técnicas romanas de pavimentação. (BALDO, 2007)

Na década de 40 o asfalto modificado por polímeros começou a ser usado na indústria, com a introdução no mercado de um produto denominado Ramflex desenvolvido pela Companhia de Reciclagem de Borracha (U.S. Ruber Reclaiming Company). No entanto o título de pai do Asfalto-borracha nos Estados Unidos é atribuído a Charles H. Mac Donald que em 1963, formulou um composto de ligante asfáltico e 25% de borracha moída de pneu (de 0,6 a 1,2 mm), misturados à 190°C durante 20 minutos, este material era altamente elástico para ser utilizado na manutenção de pavimentos em remendos conhecidos como “band-aid”. (SANCHES et al., 2012; WICKBOLDT, 2005)

No Brasil desde 2001 o asfalto modificado por borracha moída de pneus inservíveis (ligante asfalto-borracha) está sendo utilizado, com suas primeiras rodovias experimentais concentradas nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. (ODA et AL.,2005). Tal alternativa surgiu com a constante ampliação das rodovias e o aumento da frota rodoviária o que causou o aumento na produção de pneus, dessa forma com o intuito de colaborar com o destino ecologicamente correto para os pneus inservíveis, o CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) obriga os fabricantes e importadores de pneus a reciclarem parte dos pneus usados já vendidos para poderem colocar pneus novos no mercado, pela da Resolução N°258 de 26 de agosto de 1999. Esta legislação, que vem obrigando os produtores a dar destino aos mais de 46 milhões produzidos todo ano no Brasil, encontrou no meio rodoviário um excelente parceiro para a reciclagem e minimização deste problema ecológico responsável pela proliferação de mosquitos transmissores de doenças. (PANTAROTTO, 2007)

## 2.2 CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO

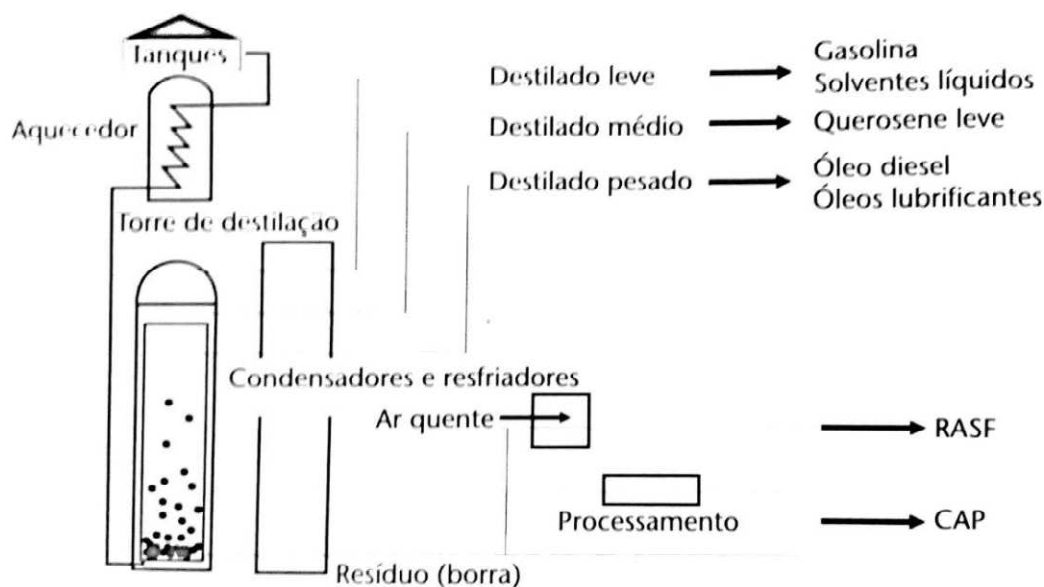
O asfalto utilizado na pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser pouco reativo, um adesivo termoviscoplastico, e impermeável à água. No Brasil é utilizada a denominação CAP para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquida a altas temperaturas. (BERNUCCI et. al., 2008)

O CAP, como material ligante possui um comportamento reológico complexo e dependente da temperatura, que com o intemperismo, se altera, perdendo suas propriedades iniciais, tornando-se mais viscoso e mais frágil, é um material que, além de termossuscetível, sofre transformações químicas quando exposto a radiação solar, as águas acidas ou sulfatadas, as ações de óleos, graxas, lubrificantes e combustíveis dos veículos que trafegam pelas vias pavimentadas. Tais ações provocam o processo de oxidação do ligante asfáltico. (BALDO, 2007)

Os cimentos asfálticos de petróleo brasileiros são classificados pelo seu grau de dureza obtido por meio do ensaio de penetração a 25°C. São especificados 4 tipos de CAP de acordo com o Instituto Brasileiro de Petróleo e o Departamento Nacional de Infraestrutura Transporte (DNIT), que são o CAP 30-40, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200.

A matéria prima mais importante para a obtenção é o petróleo, levando-se em conta a existência de asfaltos naturais em lagos (onde o asfalto natural é resultante de um processo de lento de evaporação das frações mais leves de petróleo), bem como as rochas asfálticas (Gilsonita), de importância econômica mais limitada. (BALDO, 2007). A Figura 1 apresenta um esquema simplificado de produção de destilados e asfalto em refinaria.

Figura 1 - Esquema simplificado de produção de destilados e asfalto em refinaria



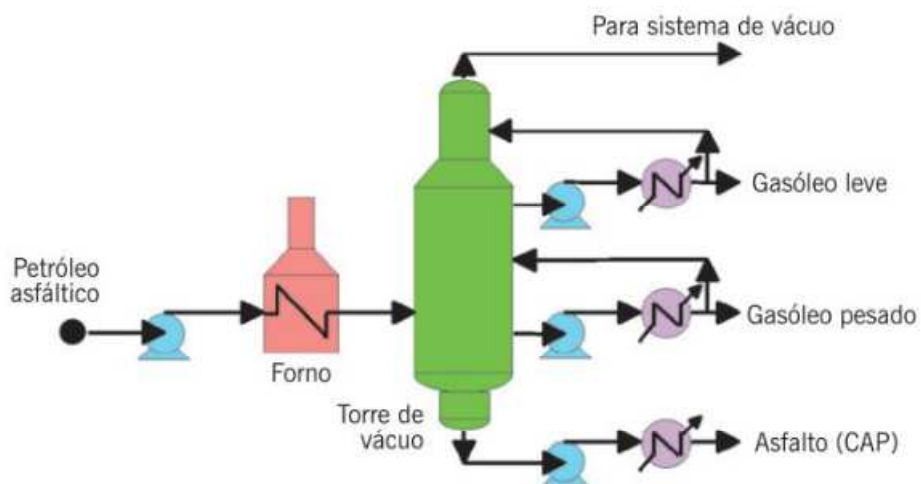
Fonte: Baldo, 2007

A usinagem do petróleo é o conjunto de processos de separação e/ou transformação dos constituintes do mesmo. Existem diferentes processos de refino de petróleo que são comumente utilizados para a obtenção dos ligantes asfálticos. Quando o petróleo é de base asfáltica, ou seja, quando o mesmo possui muito asfalto, proporcionalmente a outras frações ou petróleos, é feita apenas um estágio de destilação a vácuo. Já se o petróleo não é de base asfáltica, são necessários dois estágios de destilação: atmosférica e a vácuo. Além destes, petróleos considerados intermediários são processados em dois estágios, resultando no chamado resíduo de vácuo, cujas condições de pressão e temperatura irão definir se os mesmos atendem às especificações para uso em pavimentação. (BERNUCCI et al., 2008)

As Figuras 2 e 3, mostram os possíveis processos utilizados para a produção de asfaltos, pelos métodos citados anteriormente. As refinarias possuem torres de destilação que são divididas em intervalos por faixa de temperatura de obtenção dos vários cortes do petróleo (nafta, querosene, gasóleos) antes de se obter o asfalto. Daí, muitas vezes o asfalto ser denominado “resíduo” do petróleo.

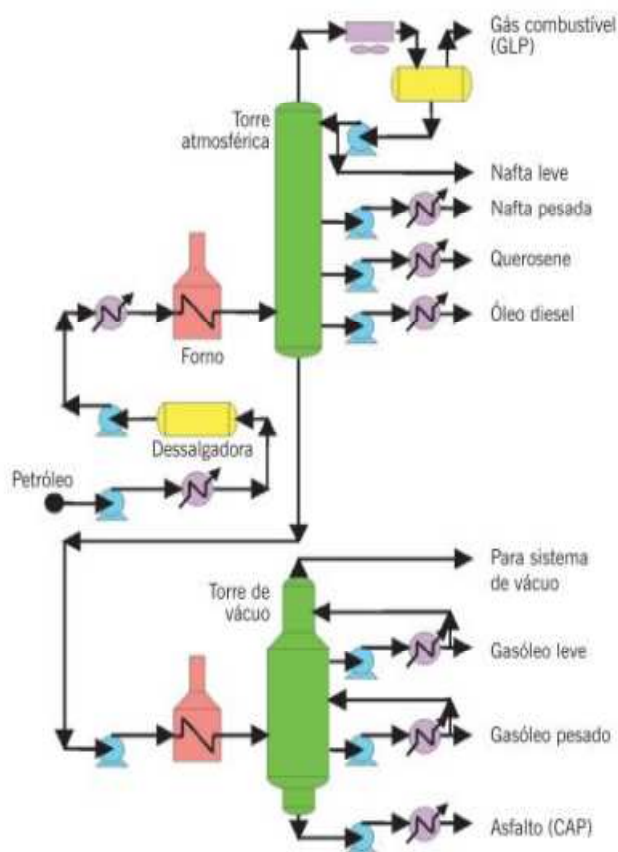


**Figura 2 - Esquema de produção de asfalto em um estágio.**



Fonte: Tonial e Bastos, 1995.

**Figura 3 - Esquema de produção de asfalto por dois estágios de destilação.**



Fonte: Tonial e Bastos, 1995.

### 2.3 ASFALTOS MODIFICADOS POR POLIMERO

Com o aumento do volume de tráfego e aumento da carga por eixo em veículos pesados, os asfaltos requerem cada vez uma maior resistência e um melhor desempenho. Dessa forma os CAPs vêm passando por uma transformação nas suas características químicas e/ou físicas, bem como nas propriedades mecânicas através da adição de um agente modificador, seja ele extensor (enxofre, lignina), oxidante (compostos de Manganês), antioxidante (sais de cálcio, carbonatos, fenóis, cálcio) ou polimérico (elastômeros, plastômeros e fibras). (AZEVEDO, 2017; BRINGEL, 2007)

Em busca de novas alternativas, vários pesquisadores têm estudado a incorporação de polímeros ao asfalto, e vem se observando que a mistura dá uma qualidade superior ao asfalto, melhorando seu comportamento elástico e contribuindo para uma maior resistência a deformação permanente e as trincas por fadiga, além de contribuir para uma melhor adesão entre agregado e asfalto e melhorar sua resistência ao envelhecimento. Entre os principais polímeros estudados encontram-se o SBR (borracha estireno-butadieno), SBS (copolímero de estireno e butadieno), EVA (copolímero de estireno e acetato de vinila), além da borracha de pneu moído.

### 2.4. BORRACHA

Em 1839 o americano Charles Goodyear, constatou acidentalmente que, ao aquecer a borracha e adicionar enxofre em altas temperaturas, as propriedades da borracha eram melhoradas. Esse processo foi denominado vulcanização, o que conferiu a borracha propriedades como, força, elasticidade, impermeabilidade para gases, resistência ao desgaste, química, ao aquecimento e à eletricidade. (SOUZA et. al., 2016)

Desde a sua criação, o pneu se faz presente na história da humanidade, devido aos benefícios proporcionados no deslocamento de veículos que possuem rodas, veículos estes que em sua maioria realizam o transporte de produtos que irão ser consumidos em todo o mundo.

Os pneus inservíveis se tornaram um problema, devido à grande quantidade existente e o descarte inadequado, tornando-se assim um grande fator de degradação ambiental. A produção brasileira de pneus é de 40 milhões de pneus por ano e quase metade dessa produção é descartada nesse período de forma inadequada. Quando abandonados, os pneus podem servir como local propício ao acúmulo de água e

procriação de mosquitos e outros vetores de doenças, além de representarem um risco constante de incêndio, que contamina o ar com fumaça altamente tóxica e deixa um óleo que pode contaminar o lençol freático, sua disposição em aterros no Brasil é proibida desde 1999, por diminuir a vida útil dos aterros e dificultar sua compactação. (COELHO et al., 2015)

Segundo a ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos), cerca de 56 milhões de pneus foram vendidos no Brasil em 2005, deste montante apenas 27 milhões foram destruídos ou reaproveitados de acordo com a legislação vigente. Estima-se que anualmente no mundo o descarte de pneus velhos chega a atingir 800 milhões de unidades. “Nos países da Comunidade Europeia são descartados 180 milhões de pneus, anualmente, e outros 150 milhões somente nos Estados Unidos da América”, estima-se que 3 bilhões de pneus estejam acumulados em áreas desérticas, com uma ameaça sempre iminente de incêndios devastadores.

A borracha natural é obtida principalmente através das seringueiras (na forma de látex), extraídas através de um corte na casca mais externa, ela fornece as propriedades elásticas, enquanto a borracha sintética proporciona maior estabilidade térmica. A borracha de pneu é composta por uma mistura de borracha natural, borracha sintética, argilo-minerais e negro-de-fumo (carvão) que é obtido principalmente através da queima de petróleo em fornos especiais, e tem como objetivo proporcionar ao material uma maior resistência mecânica. (ODA, 2005; LAGO, 2002)

O processo de reciclagem de pneus consiste na separação das substâncias que o compõem e posterior tratamento dessas substâncias para uso específico. Os pneus maiores, como por exemplo, de caminhões precisam ser inicialmente triturados separadamente. Após essa primeira fase, os pneus de automóveis e veículos menores podem ser adicionados aos pneus de caminhões triturados para passar pelo processo de granulação. Depois os metais são extraídos com o uso de um equipamento conhecido como separador magnético. Retirados os metais, as empresas possuem formas diferentes para retirar os tecidos da mistura, restando finalmente somente o composto da borracha. A figura 4 apresenta um esquema completo da reciclagem.

Figura 4 - Etapas do processo de fragmentação de pneus.



Fonte: <http://www.portalresiduossolidos.com>. Acesso em 20 de março de 2017.

## 2.5 ASFALTO MODIFICADO POR BORRACHA

Uma pista com asfalto-borracha proporciona maior conforto, segurança aos usuários, economia além do desempenho e da durabilidade serem superiores aos de um pavimento construído com asfalto comum.

O asfalto modificado com borracha (AMB) difere dos Asfaltos modificados com polímeros que são à base de elastômeros, ou de material sintético como isopor ou borracha sintética e levam água, por isso são denominados à baixa temperatura, praticamente à temperatura ambiente. O teor de borracha varia de 15% a 20% em relação ao peso total da mistura, e se houver necessidade, diluentes e alguns aditivos especiais, podem ser aplicados. (BILLITER, 1997)

De acordo com a patente americana são usados no asfalto borracha: 3% a 5% de vazios no pavimento fechado, e 18% a 25% de vazios no pavimento aberto o que leva a redução do desgaste de pneus. Os Equipamentos de aplicação do material são os mesmos utilizados para o asfalto convencional, fazendo-se necessárias poucas modificações nas usinas. A equivalência é de 1 pneu usado para cada metro de pista de pavimento produzido. Em cada quilômetro de asfalto-borracha, considerando-se uma pista com 7 metros de largura e 4 cm de espessura, são utilizados 1000 pneus inservíveis. (OLIVEIRA et al., 2009; GRECA ASFALTOS, 2009)

Os principais benefícios comprovados do asfalto-borracha na pavimentação são:

- Aumento da vida útil do pavimento;
- Maior resistência à formação de trilhas de roda, à reflexão de trincas e ao envelhecimento;
- Proporciona pavimentos mais seguros, confortáveis e silenciosos.

Os ligantes modificados com borracha de pneu têm viscosidade bem mais elevada que a de ligantes convencionais, tal qualidade aliada a sua excelente coesão e flexibilidade, permite a utilização desse tipo de asfalto em misturas asfálticas especiais, como camadas porosas de atrito (CPA), Stone Mastic Asphalt (SMA) e Gap-Graded. As quais proporcionam superfícies de pavimento com excelente macro-textura, o que traz ganhos no quesito de atrito pneu-pavimento e na drenabilidade superficial da via, melhorando a visibilidade (anti-spray) e reduzindo os riscos de aquaplanagem em dias de chuvosos. (ODA, 2005)

Outro ganho muito importante é a redução do ruído gerado pelo tráfego de veículos quando são utilizadas essas misturas especiais com matéria prima de asfalto-borracha. Um estudo realizado pelo Centro de Pesquisas da Petrobras, na rodovia Anhanguera (SP 330), em Araras – SP, verificou que com o uso de um revestimento de asfalto-borracha Gap-Graded em substituição a um revestimento convencional, conseguiu-se reduzir o nível de ruído de 78 dB (A) para 75 dB (A). Essa queda significa uma redução equivalente de 25% do tráfego de veículos na rodovia, ou seja, o nível de ruído cai à metade. (ODA, 2005)

O Asfalto borracha pode ser empregado como revestimento, reforço estrutural de pavimento, camada de ligação (binder), regularização, manutenção, em locais onde já exista o pavimento convencional, ou seja, sua aplicação independe da camada existente, havendo apenas o cuidado de uma preparação adequada para aplicação do mesmo, como nos asfaltos convencionais. O controle de compactação, temperatura de aplicação, controle de juntas e controle tecnológico em geral deve ser o mesmo usado para o asfalto convencional. A faixa granulométrica a ser empregada deve ser selecionada em função da utilização prevista para o concreto asfáltico com asfalto-borracha. (OLIVEIRA et al., 2009; DER/PR ES-P 28/05)

## 2.6 INCORPORAÇÃO DA BORRACHA

A borracha moída de pneus, após ser submetida aos processos de trituração, pode ser incorporada à mistura asfáltica de duas formas, via seca que ocorre quando a borracha é introduzida diretamente no misturador da usina de asfalto, sendo misturada aos agregados e via úmida que ocorre quando a borracha é misturada ao ligante antes da usinagem da mistura asfáltica, modificando-o permanentemente.

O processo por via seca, apesar absorver pneus inutilizáveis, não melhora significativamente o revestimento asfáltico, devido ao fato de que a borracha moída participa da massa como carga e dessa forma não transfere suas propriedades ao ligante asfáltico.

No processo via úmida, o ligante asfalto-borracha é obtido a partir da adição da borracha moída ao próprio ligante, em um tanque de reação, sob temperaturas que variam de 175 a 200°C. Após o período de reação, o produto obtido fica armazenado em outro tanque, onde se deve conter um sistema mecânico de agitação constante, a fim de manter a mistura dispersa, de forma a evitar a deposição das partículas que não reagiram parcial ou completamente com o ligante. O processo via seca emprega de 3 a 5% de borracha moída, em relação à massa total de agregados minerais. A quantidade de borracha incorporada ao cimento asfáltico, pelo processo via úmida, varia de 5 a 25% sobre a porcentagem de ligante asfáltico. (ODA, 2005)

## 2.7 REOLOGIA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

A palavra reologia tem origem grega: “*Rheo*” que significa fluir e “*Logos*” que significa estudo ou ciência. Reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais, relacionando a interação entre tensão de cisalhamento e deformação com o tempo. (MELO, 2014; BANFILL, 1994)

De acordo com a variação da temperatura, as propriedades reológicas dos cimentos asfálticos podem variar enormemente. Há temperaturas altas bem como quando a taxa de carregamento (frequência) é reduzida, a propriedade viscosidade do asfalto se torna mais evidente, já em temperaturas baixas ou em altas taxas de carregamento, o asfalto reage como um sólido elástico. Em temperaturas suficientemente altas e/ou em longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto é essencialmente um líquido Newtoniano e pode ser descrito por um valor de viscosidade independente da taxa de aplicação de carga. (AZEVEDO, 2017; LU et al., 1999)

Com os efeitos de carregamento devido ao tráfego de veículos e da variação de temperatura aos quais os ligantes são submetidos durante sua vida de serviço, o efeito de envelhecimento se torna um complicador adicional, pois provoca o surgimento de várias modificações químicas no material, o que se reflete em mudanças do seu comportamento reológico. No âmbito laboratorial, o estudo destas mudanças tem sido avaliado por meio

de processos de envelhecimento acelerado dos ligantes asfálticos, sendo feitas comparações das propriedades reológicas do material virgem e do resíduo envelhecido.

## 2.8 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Existem dois tipos de caracterização dos ligantes. O primeiro, dito convencional consiste, basicamente, nos ensaios de penetração, índice de suscetibilidade térmica, viscosidade e ponto de amolecimento. Já o segundo, dito SUPERPAVE, baseia-se em ensaios que melhor se relacionam com o desempenho do material.

A caracterização da consistência de ligantes asfálticos através dos ensaios de penetração e viscosidade apresenta limitações no que se diz respeito à estimativa do desempenho do asfalto ao longo do tempo de serviço. Apesar de a viscosidade ser uma propriedade fundamental na caracterização do ligante, ela apenas fornece informações sobre o comportamento viscoso a altas temperaturas, sem nenhuma outra informação sobre o desempenho a média e baixa temperatura. O ensaio de penetração, por sua vez, apenas descreve a consistência a uma temperatura intermediária. (MELO, 2014; ASPHALT INSTITUTE, 2011)

### 2.8.1 Caracterização comum

- Ensaio de viscosidade serve para avaliar a capacidade do fluido em resistir ao escoamento, devido ao atrito entre suas camadas. Tal ensaio se tem muita importância, pois serve para determinar a consistência adequada do ligante para realização da mistura asfáltica. De acordo com a norma NBR 9277/14.

- Ensaio de ponto de amolecimento ou “Anel e Bola” é determinado por meio de ensaio padronizado pela ABNT (2008). Neste ensaio uma amostra de cimento asfáltico é colocada em um recipiente que é constituído por um anel metálico. A partir disso, é realizado o ensaio mantendo-o suspenso em banho num béquer com água. A temperatura lida no momento em que o conjunto toca o fundo do béquer é considerada o ponto de amolecimento do material. De acordo com a norma NBR 6560/2000.

- Ensaio de Penetração: consiste em verificar a consistência do CAP, através da penetração, em décimos de milímetro, de uma agulha padronizada numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25° C. De

acordo com a norma NBR 6576/07. Quanto maior a consistência do CAP menor é a penetração da agulha.

A Tabela 1 abaixo apresenta as especificações brasileiras para CAP convencional.

**Tabela 1 - Especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo**

Características	Unidades	Limites				Métodos	
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM
<b>Penetração (100g, 5s, 25°C)</b>	0,1 mm	30-45	50-75	85-100	150-200	NBR 6576	D 5
<b>Ponto de amolecimento, mín.</b>	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
<b>Viscosidade Saybolt Furol</b>	s					NBR 14950	E 102
<b>a 135 °C, mín.</b>		192	141	110	80		
<b>a 150 °C, mín.</b>		90	50	43	36		
<b>a 177 °C</b>		40-150	30-150	15-60	15-60		
<b>OU</b>							
<b>Viscosidade Brookfield</b>	cP					NBR 15184	D 4402
<b>a 135 °C, SP 21, 20 rpm, mín.</b>		374	274	214	155		
<b>a 150 °C, SP 21, mín.</b>		203	112	97	81		
<b>a 177 °C, SP 21</b>		76-285	57-285	28-114	28-114		
<b>Índice de suscetibilidade térmica</b>		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)		
<b>Ponto de Fulgor, mín.</b>	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
<b>Solubilidade em tricloro etileno</b>	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
<b>Ductilidade a 25 °C, mín.</b>	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
<b>Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min</b>							D 2872
<b>Variação em massa, máx. (2)</b>	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		
<b>Ductilidade a 25 °C, min</b>	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
<b>Aumento do ponto de amolecimento, máx.</b>	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
<b>Penetração retida, mín. (3)</b>	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: Bernucci et al., 2008

A seguir, a Tabela 2 e 3 mostram os parâmetros para análise dos asfaltos modificados por SBS e por borracha.



Tabela 2 - Especificação de asfalto-polímero (SBS) da comissão de asfalto IBP

Grau (Ponto de amolecimento mín./ Recuperação elástica a 25°C mín.) (°C/%)	Método ABNT	Tipo			
		50/65	55/75	60/85	65/90
<b>Ensaio na amostra virgem</b>					
Penetração 25°C, 5s 100g,0,1mm	NBR 6576	45-70	45-70	40-70	40-70
Ponto de amolecimento, mín. °C	NBR 6560	50	55	60	65
Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 RPM, máx., cP	NBR 15184	1500	3000	3000	3000
Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 RPM, máx., cP	NBR 15184	1000	2000	2000	2000
Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 RPM, máx., cP	NBR 15184	500	1000	1000	1000
Ponto de fulgor, mín., °C	NBR 11341	235	235	235	235
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15166	5	5	5	5
Recuperação elástica a 25°C, 20cm.mín., %	NBR 15086	65	75	85	90
Recuperação elástica a 4°C, 10cm, %	NBR 15086	anotar	anotar	anotar	anotar
<b>Ensaio no resíduo após RTFOT</b>					
Varição de massa, máx., %	NBR 15235	1	1	1	1
Aumento do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	6	7	7	7
Redução do ponto de amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	3	5	5	5
Porcentagem de penetração original, mín.	NBR 6576	60	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín.	15086	80	80	80	80

Fonte: Bernucci et al., 2008

Tabela 3 - Especificação de asfalto-Modificado por borracha (AMB)

ENSAIO	NORMA	ASFALTO BORRACHA	
		TIPO AB8	TIPO AB22
Penetração (25°C,100g,5 segundos), 0,1 mm	NBR 6576	30 - 70	30 - 70
Ponto de Amolecimento, mín., °C	NBR 6560	55	57
Viscosidade Brookfield (175 °C,10 cm), mín., %	Projeto #037	800 - 200	2200 - 4000
Ponto de Fulgor, mín., °C	NBR 11341	235	235
Recuperação Elastica Ductilômetro (25°C, 10 cm), mín., %	NBR 15086	50	55
Estabilidade á Estocagem,máx., °C	NBR 15166	9	9
<b>ENSAIOS NO RESÍDUO DO RTFOT</b>			
Varição de Massa do RTFOT, max., %	NBR 15235	1,0	1
Varição do ponto de Amolecimento, máx., °C	NBR 6560	10	10
Porcentagem da Penetração Original,mín. %	NBR 6576	55	55
Porcentagem da Recuperação Elástica Original, (25°C, 10 cm mín. %)	NBR 15086	100	100

Fonte: ANP,2008

## 2.8.2 Caracterização SUPERPAVE

Nos Estados Unidos em 1987, o SHRP (Strategic Highway Research Program) foi lançado com o objetivo de estabelecer novos procedimentos e equipamentos para o estudo de Cimentos asfálticos e suas misturas. Neste programa foi definido um novo conjunto de ensaios e uma nova classificação de CAPs, baseado em ensaios reológicos, denominada como especificação Superior Performing Pavement (SUPERPAVE), que contribuiu muito para o desenvolvimento da malha rodoviária americana. (AZEVEDO, 2017; FERNANDES et al., 2009)

Novos métodos e parâmetros foram então introduzidos para medir propriedades fundamentais que podem ser mais facilmente relacionadas ao desempenho dos pavimentos, com base em conceitos sólidos de engenharia, dessa forma, o sistema de especificação se ligante asfáltico Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*),

baseia-se em requisitos relacionados ao desempenho em serviço. As propriedades reológicas foram definidas considerando os diversos mecanismos de ruptura do pavimento, a partir da compreensão destes mecanismos e da contribuição do ligante asfáltico para resistência a eles. (MELO, 2014; ANDERSON et al., 1995)

A base da proposta do SHRP é que os ligantes passem a ser avaliados em uma faixa de temperaturas, que cubra todas as etapas do processo de usinagem e compactação, e também as temperaturas as quais o pavimento fica exposto durante a sua vida útil. São utilizados para esse fim os seguintes equipamentos:

- Reômetro de cisalhamento dinâmico, em inglês, “*Dynamic Shear Rheometer–DSR*”: para medir propriedades dos ligantes asfálticos sob temperaturas altas e intermediárias;
- Viscosímetro rotacional, em inglês, “*Rotacional Viscosimeter–RV*”: para medir a viscosidade rotacional nas temperaturas de bombeamento, de mistura com agregado em usina e de compactação da mistura. Este ensaio é especificado para assegurar a trabalhabilidade da mistura.
- Reômetro de fluência em viga, em inglês, “*Bending Beam Rheometer – BBR*”: para medir propriedades dos ligantes asfálticos sob temperaturas baixas e simular condições de carregamento resultantes de esfriamento;
- Prensa de tração direta, em inglês, “*Direct Tension Test–DDT*”: a fim de medir as propriedades dos ligantes asfálticos sob temperaturas baixas e simular condições de carregamento resultantes de resfriamento;
- Estufa de película delgada e rotacional, conhecido em inglês como “*Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT*”: Equipamento destinado a representar o envelhecimento do ligante asfáltico que ocorre durante o processo de usinagem da mistura asfáltica (curto prazo); e,
- Vaso de pressão de envelhecimento, em inglês “*Pressure Aging Vessel – PAV*”: equipamento utilizado para simular o envelhecimento do ligante asfáltico durante a vida em serviço do pavimento (longo prazo).

Assim, com base em tais mecanismos, nas especificações SUPERPAVE, o CAP é classificado em função da temperatura, estimando faixas de temperaturas em que o mesmo pode ser utilizado. Tais faixas são denominadas Grau de Desempenho (PG), e

podem ser definidas por duas temperaturas limites, sendo uma máxima, que garante à resistência de deformação permanente e uma mínima, que indica à resistência a formação de trincas térmicas (AZEVEDO, 2017; LUCENA et al., 2004).

**Tabela 4 - Parte da especificação SHRP ou SUPERPAVE de ligantes asfálticos tipo CAP (ASTM 63+73/1999)**

<b>Grau de desempenho</b>	<b>PG 64</b>	<b>PG 70</b>	<b>PG 64</b>	<b>PG 64</b>
	<b>-10 -16 -22</b>	<b>-10 -16 -22</b>	<b>-10 -16 -22</b>	<b>-10 -16 -22</b>
<b>Ensaio</b>				
<b>Viscosidade Brookfield (máx 3.000 cP), °C</b>			135	
<b>Ponto de Fulgor, °C</b>			230	
<b>cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín 1,0 Kpa), °C</b>	64	70	76	82
<b>Após o RTFOT</b>				
<b>Varição de massa, %</b>	< 1	< 1	< 1	< 1
<b>cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín 2,2 Kpa), °C</b>	64	70	76	82
<b>Após o RTFOT/PAV</b>				
<b>cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín 5,0 Kpa), °C</b>	31 28 25	34 31 28	37 34 31	40 37 34
<b>Fluência (BBR)@ 60 s, °C</b>	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12
<b>coef. Angular, (mín. 0,3)</b>				
<b>módulo rigidez, S (máx. 300 Mpa)</b>				
<b>Alongamento na ruptura, °C</b>	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12	0 -6 -12
<b>mín. 1,0% @ 1,0mm/min.</b>				

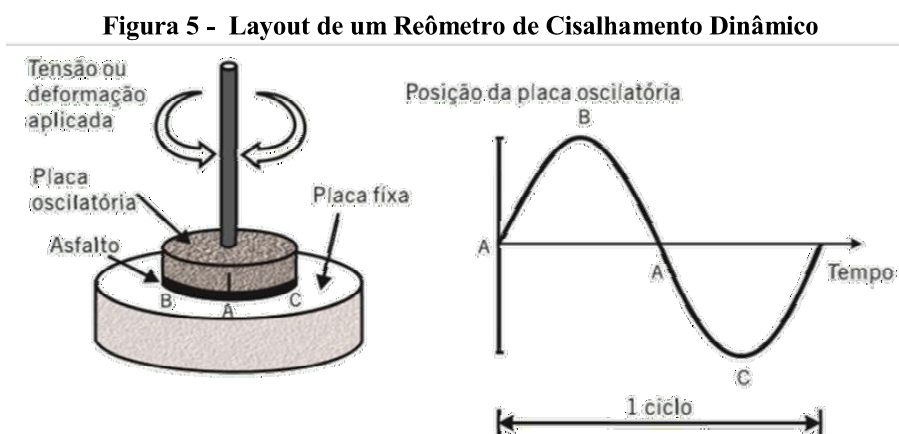
Fonte: BERNUCCI et. al., 2008.

No presente trabalho, dentro os ensaios reológicos da especificação SUPERPAVE, serão apresentados apenas resultados do ensaio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico – DSR e o envelhecimento através da estufa de película delgada e rotacional – RTFOT.

## 2.9 REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO – DSR

O Reômetro de cisalhamento dinâmico (dynamical shear rheometer – DSR) é usado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante. Por meio desse ensaio, mede-se o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), submetendo uma pequena quantidade de ligante a tensões de cisalhamento oscilatórias, entre duas placas paralelas. (BERNUCCI et. al., 2008)

O ângulo  $\delta$  avalia a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o processo de cisalhamento, o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  (magnitude do módulo complexo  $G^*$  dividida pelo seno do ângulo de fase  $\delta$ ) foi sugerido como o critério oficial para quantificação da suscetibilidade do CAP ao acúmulo de deformação. A figura 5 a seguir mostra um Reômetro das especificações SHRP.



Fonte: BERNUCCI et. al., 2008.

O módulo complexo e o ângulo de fase podem ser definidos conforme a equação 1 e 2 a seguir:

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

$$\delta = \omega \cdot (\Delta t) \quad (2)$$

Onde:

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

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

$\gamma_{m\acute{a}x}$  é a máxima deformação devido à tensão de cisalhamento aplicada;

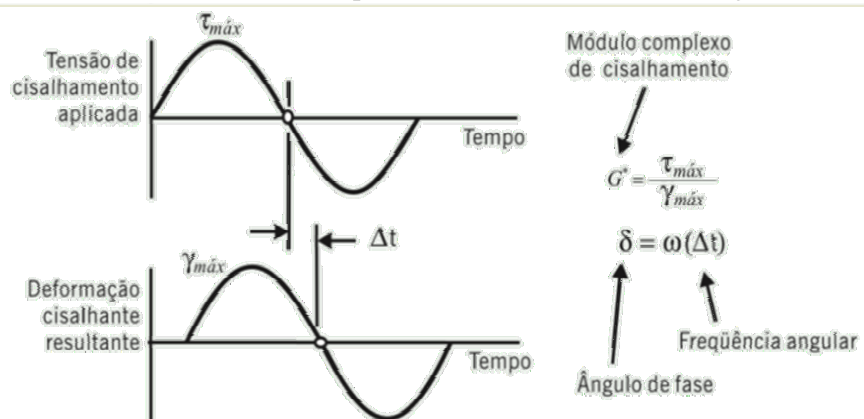
$\delta$  é o ângulo de fase;

$\omega$  é a frequência angular, 1/s;

$\Delta t$  é o tempo de defasagem, s.

A figura 6 apresenta de forma esquemática os valores de  $G^*$  e  $\delta$  medidos pelos DSR. Mostrando a resposta à deformação cisalhante de uma amostra de ligante em relação à tensão aplicada por um certo intervalo de tempo  $\Delta t$ .

**Figura 6 - Cálculo do Módulo complexo de cisalhamento  $G^*$  e do ângulo de fase ( $\delta$ ).**

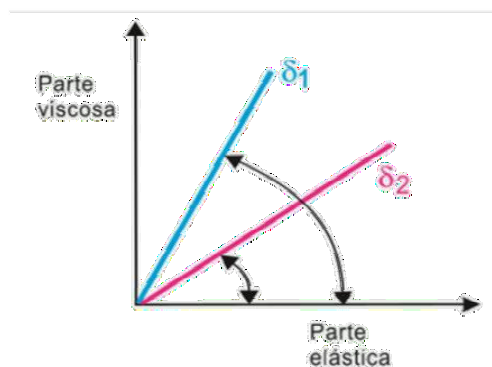


Fonte: BERNUCCI et. al., 2008.

Para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente defasada e  $\delta$  vale  $90^\circ$ . Materiais viscoelásticos, tais como ligantes asfálticos, possuem ângulo de fase variando entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , dependendo da temperatura. A altas temperaturas  $\delta$  tende a  $90^\circ$  e a baixas temperaturas tende a  $0^\circ$ . A especificação de ligante usa o parâmetro  $G^*/\sin(\delta)$  para temperaturas altas ( $>46^\circ\text{C}$ ),  $G^*\sin(\delta)$  para temperaturas intermediárias (entre  $7^\circ\text{C}$  e  $34^\circ\text{C}$ ) como forma de controlar a rigidez do asfalto. (BERNUCCI et. al., 2008)

A figura 7 demonstra dois tipos distintos de materiais com ângulos de fase diferentes. A mesma também poderia representar os ângulos de fase de um mesmo ligante testado no DSR a duas diferentes temperaturas.

**Figura 7 - Exemplos de resultados de ângulos de fase de dois asfaltos diferentes**



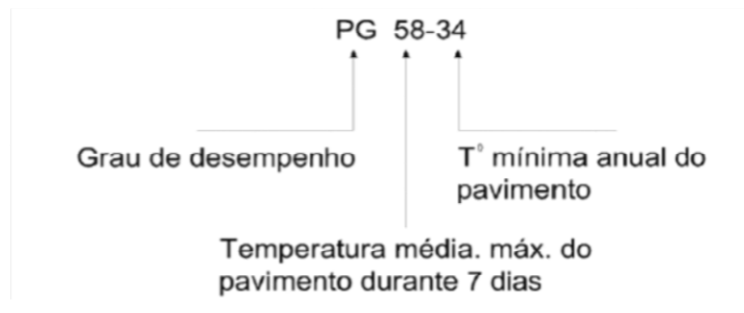
Fonte: BERNUCCI et. al., 2008.

Para verificar a sua suscetibilidade à deformação permanente. Juntamente com a publicação da especificação Superpave em meados dos anos 90, o parâmetro  $G^*/\sin\delta$  (magnitude do módulo complexo  $G^*$  dividida pelo seno do ângulo de fase  $\delta$ ) foi sugerido como o critério oficial para quantificação da suscetibilidade do CAP ao acúmulo de deformação. A equação deste parâmetro, que é matematicamente igual ao inverso da compliância de dissipação “J” (loss compliance) conforme Equação (3) é baseada no conceito de energia dissipada em um ciclo oscilatório de cisalhamento e estabelece que um material é tanto mais resistente à deformação permanente quanto maior for o valor numérico de  $G^*/\sin\delta$ . (DOMINGOS; 2016 ; ROBERTS et al., 1996)

$$\frac{1}{J} = \frac{G^*}{\sin \delta} \quad (3)$$

A classificação Superpave com base no PG é composta por dois números: o primeiro número como mostra a figura 8 corresponde à temperatura mais elevada do pavimento, ou seja, aquela em que os ensaios que avaliam a resistência ao acúmulo de deformação permanente devem ser realizados. O segundo número corresponde à temperatura mínima do pavimento, aquela em que os ensaios que analisam a resistência às trincas por contração de origem térmica devem ser realizados (CARNEIRO,2015; ASPHALT INSTITUTE, 2010).

**Figura 8: Determinação do PG**



Fonte: JÚNIOR, 2015.

Então para que se possa selecionar o ligante asfáltico mais adequado é importante que sejam consideradas as características climáticas do local onde será executada a pavimentação, não apenas a caracterização do material asfáltico, uma vez que o desempenho do pavimento varia de acordo com os materiais selecionados, ou seja, é importante determinar o PG, Performance Grade, de cada via para evitar erros e problemas precocemente.

A figura 9 abaixo apresenta o Grau de desempenho para asfaltos necessário para cada região do Brasil.

**Figura 9 - Grau de desempenho para asfaltos**





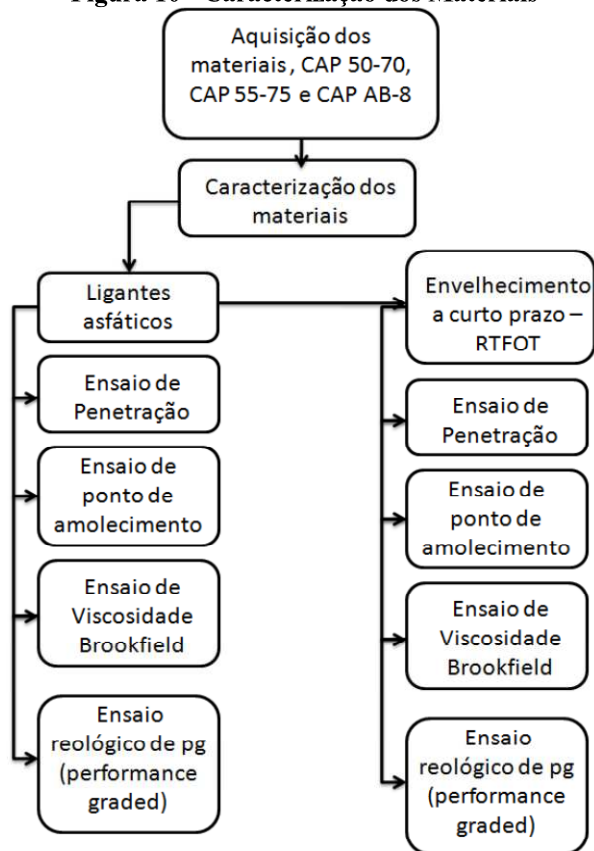
Fonte: LEITE e TONIAL, 1994.

Tais parâmetros de temperatura devem ser levado em conta na escolha do tipo de ligante, para que este mantenha suas propriedades conservadas durante sua vida útil. Observa-se a partir da figura que a região nordeste exige a maior PG de todo o país, exigindo que os materiais utilizados na pavimentação dessa região resistam a temperaturas de no mínimo 72 °C.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho buscou comparar três tipos de asfalto: asfalto convencional (CAP 50-70), asfalto modificado por polímero (SBS 55-75) e asfalto modificado com borracha (CAP AB-8). A metodologia foi seguida conforme mostrado no fluxograma da Figura 10.

**Figura 10 - Caracterização dos Materiais**



Fonte: Próprio autor.

### 3.1 MATERIAIS

No presente trabalho foram utilizados três tipos de CAP fornecidos pelo LEP/UFCG (Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande). As características dos ligantes deverão estar em conformidade com os parâmetros contidos nas especificações de material do DNIT.

- CAP 50/70;
- CAP 55/75 - modificado com polímero elastomérico SBS;
- CAP AB-8- modificado com borracha de pneu.

### 3.2 MÉTODOS

Para determinar as propriedades reológicas dos ligantes foram realizados ensaios normatizados pela ABNT, DNIT e ASTM. E foram utilizados os equipamentos pertencentes ao LEP/UFCG. Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização física e química do CAP 50/70, do CAP AB-8e do CAP 55/75-E.

### **3.2.1 Ensaio de Penetração**

A consistência de um CAP no estado semi-sólido é medida por meio do ensaio de penetração, que é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha. O ensaio é regido pela norma NBR 6576:2007 da ABNT que classifica o CAP quanto a sua dureza. Ele consiste em determinar a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha padronizada penetra verticalmente, durante 5 segundos em uma amostra de CAP a uma temperatura de 25°C. A massa total da agulha é de 100g.

O equipamento utilizado foi um penetrômetro (Figura 11), com divisões em 1/10mm. A realização deste ensaio consiste em separar a quantidade aproximada de 50g de amostra de CAP, deixá-la esfriar na atmosfera por um período de 60 minutos, e posteriormente serem transferidas para o banho d'água a uma temperatura de 25°C, por mais 60 minutos. Com a utilização do penetrômetro faz-se a determinação da penetração. Este ensaio foi feito para cada amostra de CAP 50/70, CAP 55/75 e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.

**Figura 11 - Penetrômetro(LEP/UFCG)**



Fonte: Próprio autor.

### 3.2.2 Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento (Figura 12) é uma medida que faz referência ao ponto de fusão do CAP, que não é bem definido, pois os CAPs amolecem gradualmente. É medido empiricamente através de uma correlação entre a temperatura no qual o CAP amolece sob certas condições e atinge uma determinada condição de escoamento (BERNUCCI et al., 2008).

O ensaio é regido pela NBR 6560:2000 da ABNT. O ponto de amolecimento é a mais baixa temperatura na qual uma esfera metálica padronizada pesando em média 3,50g, atravessa um anel também padronizado e cheio com o material betuminoso, percorrendo uma distância de 25,4mm, sob condições especificadas. O ponto de amolecimento refere-se à média das temperaturas em que as duas esferas envolvidas pelo CAP deslocam-se para baixo e tocam a placa de fundo. Este ensaio foi feito para cada amostra de CAP 50/70, CAP 55/75 e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.

**Figura 12 - Ensaio de ponto de amolecimento(LEP/UFCG).**



Fonte: Próprio autor.

### 3.2.3 Viscosidade Brookfield

Medidas de viscosidade são importantes na caracterização dos CAPs puros e modificados, pois fornecem informações sobre as propriedades de processamento, mistura e lançamento do CAP, até sua aplicação em serviços de pavimentação. O ensaio para determinar a viscosidade dos ligantes asfálticos foi realizado em um viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, modelo DVII+ acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL como mostrado na Figura 13. O equipamento tem como finalidade determinar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos convencionais e modificados durante o manuseio e a usinagem da mistura asfáltica a altas temperaturas.

**Figura 13 - Viscosímetro Rotacional (LEP/UFCG)**

Fonte: Próprio autor.

A viscosidade é medida através do torque necessário para rotacionar uma haste de prova (spindle) imersa na amostra de asfalto, considerando as temperaturas de 135, 150 e 177°C e velocidades de 20, 50 e 10rpm, respectivamente. É normatizado pela norma ASTM D 4402. A viscosidade foi medida para cada amostra de CAP 50/70, CAP 55/75 e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.

Após a realização dos ensaios de caracterização, foram realizados os ensaios para a determinação das propriedades reológicas.

### **3.2.4 Envelhecimento a curto prazo – RTFOT**

O procedimento adotado para a avaliação do envelhecimento a curto prazo utiliza a estufa de filme fino rotativa, RTFOT (Figura 14). Este envelhecimento correlaciona-se com o envelhecimento que ocorre com o CAP durante o processo de usinagem e transporte até aplicação. O RTFOT provoca o envelhecimento do CAP por oxidação e evaporação, permitindo avaliar a presença de frações de óleos mais leves e a oxidação que ocorre durante o aquecimento a 163 °C. As normas que regem os procedimentos e especificações deste ensaio são a ABNT NBR 15235/2009 e ASTM D2872-12/2013.

**Figura 14 - Envelhecimento a curto prazo (RTFOT) (LEP/UFCG).**



Fonte: Próprio autor.

### **3.2.5 Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)**

Os ensaios reológicos foram realizados utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) (Figura 15). Os corpos de prova de aproximadamente 1 mm de espessura e 25 mm de diâmetro foram preparados em moldes específicos de silicone. As amostras foram postas entre spindles de placas paralelas, com mesmos diâmetros. Nesta análise foi verificado o PG.

**Figura 15 - Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) (LEP/UFCG)**



Fonte: Próprio autor.

Esse ensaio é definido por duas temperaturas que indicam a faixa de uso dos ligantes asfálticos. Os mesmos serão ensaiados em temperaturas relacionadas ao seu período de emprego, determinando seu grau de desempenho (Performance Graded – PG). Assim determinou-se uma temperatura máxima, de maneira a conservar uma atuação satisfatória.

O grau de desempenho dos ligantes asfálticos foram obtidos com base nos valores do parâmetro  $G^*/\sin\delta$ , isto é, a temperatura máxima do PG foi definida como a temperatura na qual os valores do  $G^*/\sin\delta$  são superiores a 1,0 kPa e a 2,2 kPa, respectivamente para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo.

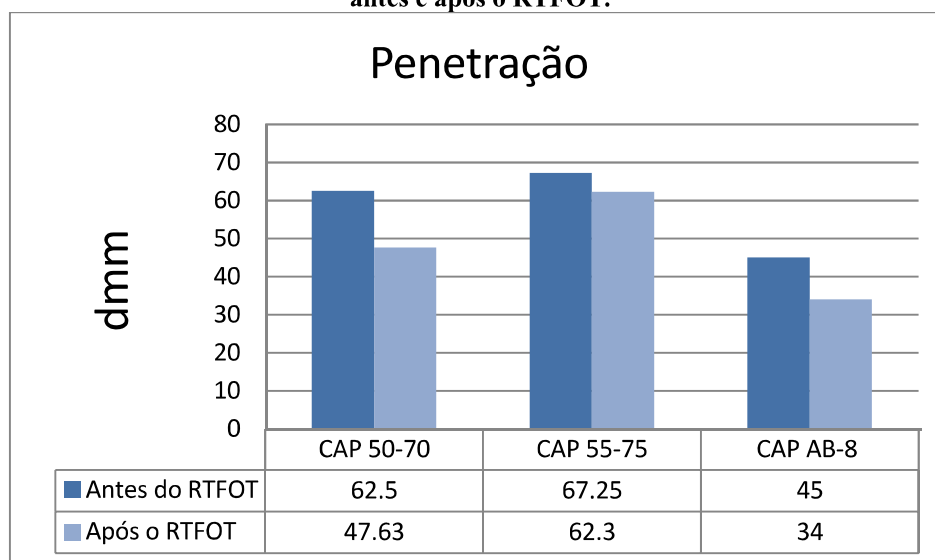


## 4 RESULTADOS

### 4.1. PENETRAÇÃO

O ensaio de penetração serve para determinar a consistência dos materiais asfálticos. O comportamento previsto é que os ligantes modificados apresentem maior consistência devido a adição do SBS (copolímero de estireno e butadieno) e da borracha de pneu moída, resultando em valores mais baixos de penetração. Os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 1.

**Gráfico1 - Resultados da Penetração para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.**



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o Gráfico 1, observa-se a redução de penetração antes e após o envelhecimento em curto prazo para todas as amostras. Segundo Bernucciel et al. (2008), a consistência do cimento asfáltico de petróleo é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha padrão. Então se conclui que há um aumento da rigidez das amostras.

Observa-se ainda, que, o grau de penetração do CAP AB-8, é bem menor se comparado ao CAP 55-75 e ao CAP 50-70. Portanto, pode-se dizer que o resíduo de pneus aumenta a consistência do CAP mais significativamente do que o polímero puro.

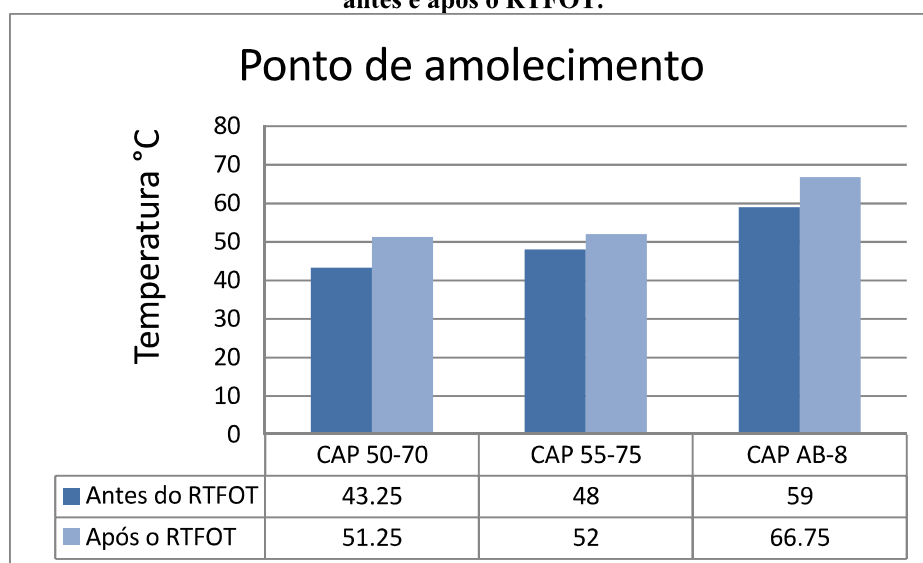
De acordo com as Tabelas 1 2 e 3, os resultados obtidos após o RTFOT para o CAP 50-70 esta inadequados às especificações brasileiras, uma vez que a faixa aceitável

é de 50 a 70 dmm, já o CAP 55-75 e o CAP AB-8 encontram-se dentro dos limites estabelecidos que são respectivamente de 45 a 70 dmm e de 30-70 dmm.

#### 4.2. PONTO DE AMOLECIMENTO

O ponto de amolecimento consiste no valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido. O Gráfico 2 apresenta os resultados de ponto de amolecimento antes e após o RTFOT.

**Gráfico 2 - Ponto de amolecimento para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.**



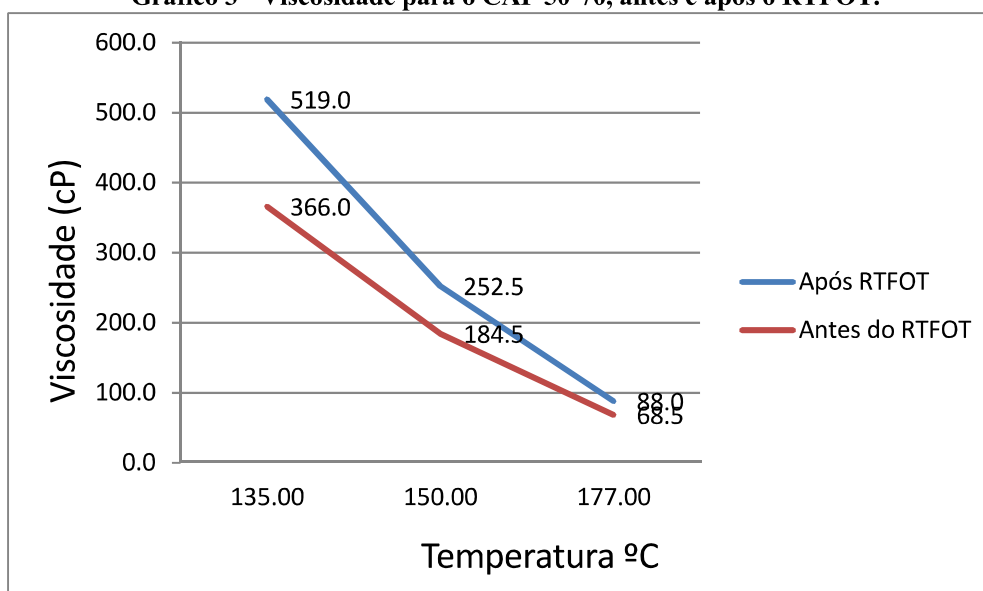
Fonte: Próprio autor.

Conforme mostrado no Gráfico 2, pode-se notar um aumento na temperatura de ponto de amolecimento do CAP AB-8 quando comparado ao CAP 50-70 e ao CAP 55-75, antes e após o envelhecimento a curto prazo. Uma vez que, quanto maior o ponto de amolecimento acontecerá um aumento da resistência ao acúmulo da deformação permanente das misturas modificadas, ou seja, a ocorrência de deformações será menor e o ligante torna-se menos sensível a temperatura, permanecendo com suas propriedades inalteradas até temperaturas mais altas, pode-se considerar esse ponto como positivo.

### 4.3. VISCOSIDADE ROTACIONAL (BROOKFIELD)

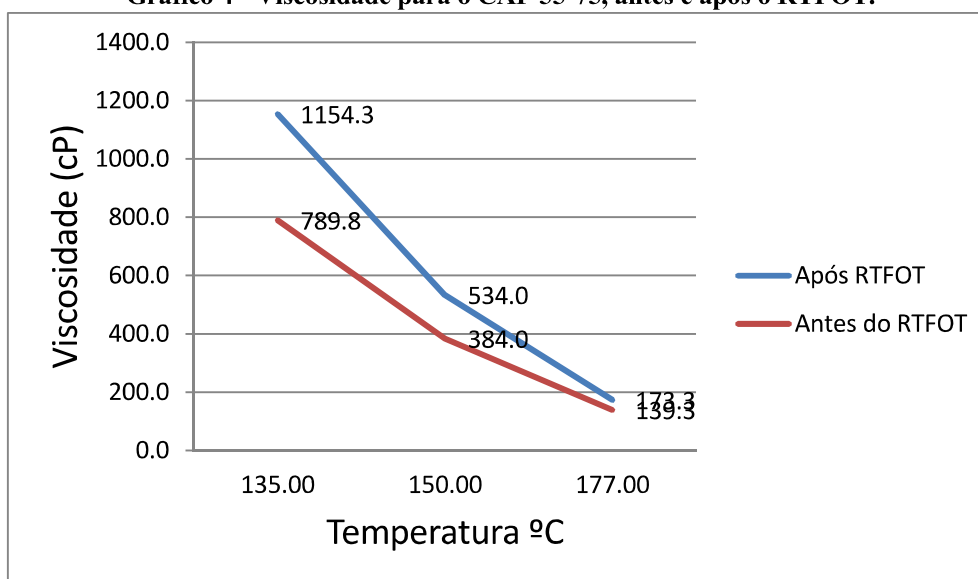
Os Gráficos 3, 4 e 5 apresentam os valores de viscosidade para o CAP 50/70, CAP 55/75 e CAP AB-8 com borracha antes e depois do RTFOT.

**Gráfico 3 - Viscosidade para o CAP 50-70, antes e após o RTFOT.**



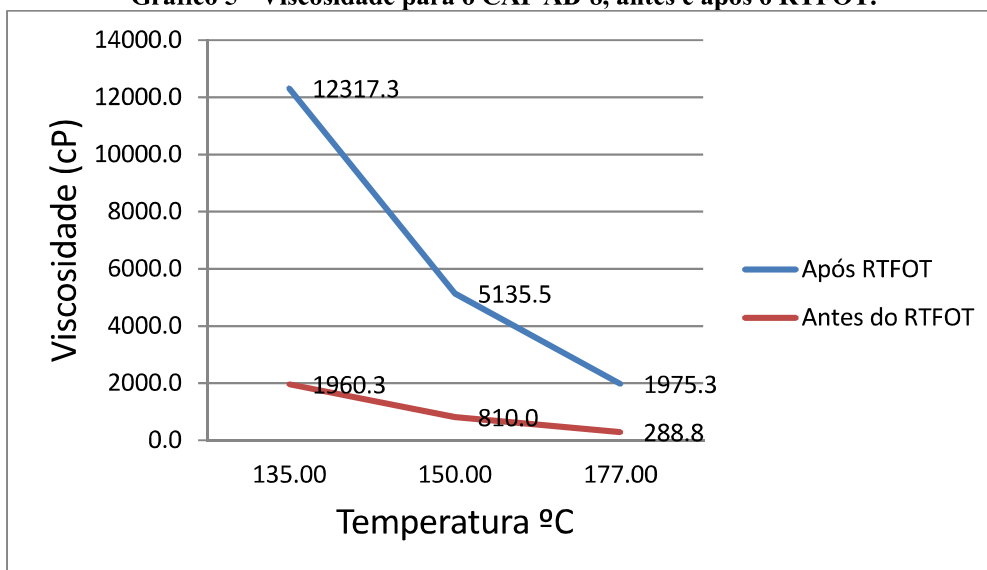
Fonte: Próprio autor.

**Gráfico 4 - Viscosidade para o CAP 55-75, antes e após o RTFOT.**



Fonte: Próprio autor.

**Gráfico 5 - Viscosidade para o CAP AB-8, antes e após o RTFOT.**



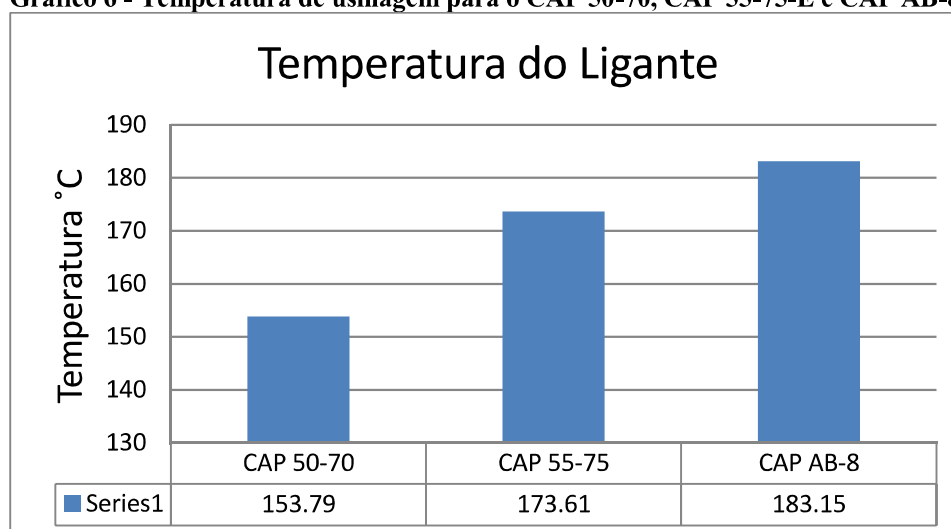
Fonte: Próprio autor.

De um modo geral, os resultados mostraram que os ligantes modificados apresentam valores de viscosidade mais altos em relação ao ligante puro, principalmente o CAP AB-8, nota-se também o aumento da viscosidade após o RTFOT para todas as amostras, principalmente para o CAP AB-8 onde o resíduo pós RTFOT apresenta um aumento de 628% no valor da sua viscosidade em relação ao seu valor inicial. De acordo com as normas, as viscosidades dos três estão entre as margens definidas.

#### **4.3.1 Temperaturas de Manuseio dos Asfaltos**

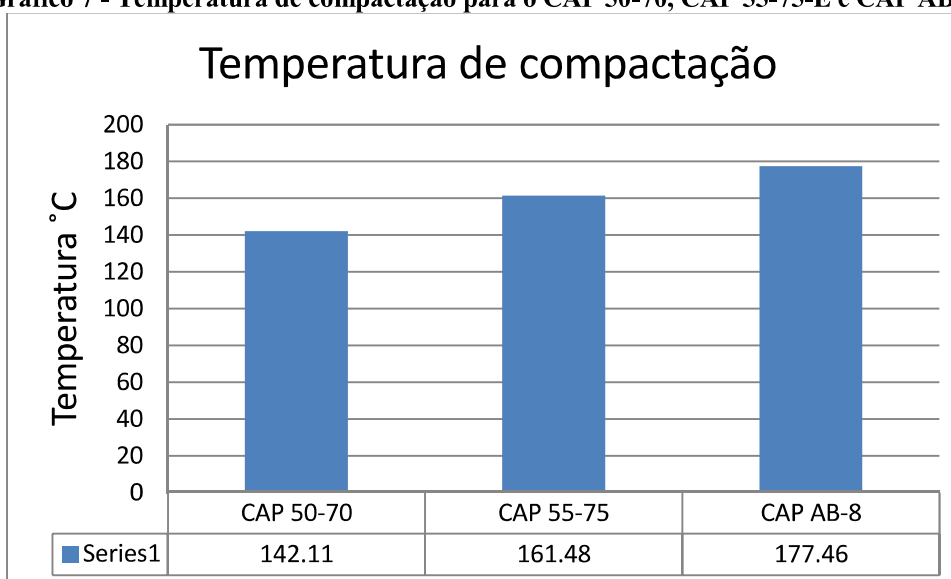
A partir das curvas de viscosidade-temperatura obtidas, foram calculadas as temperaturas de mistura do ligante e do agregado bem como a temperatura de compactação para cada tipo de ligante asfáltico. Os resultados são apresentados nos Gráficos 6 e 7.

Gráfico 6 - Temperatura de usinagem para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 7 - Temperatura de compactação para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8.



Fonte: Próprio autor.

A temperatura de usinagem para os agregados é admitida em função da temperatura do ligante, variando de 10 a 15 °C para mais da temperatura do ligante. Os resultados são apresentados na tabela 5.

**Tabela 5 - Temperatura de usinagem dos agregados para o CAP 50-70, CAP 55-75-E e CAP AB-8.**

Temperatura de usinagem dos agregados		
CAP 50-70	CAP 55-75	CAP AB-8
138,8 - 168,79	158,61-188,61	168,15 - 198,15

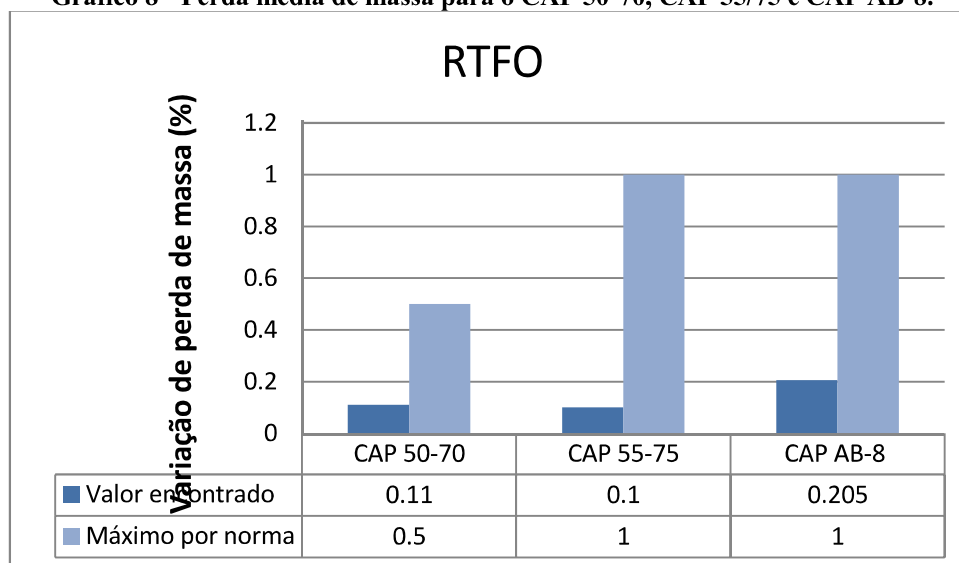
Fonte: Próprio autor.

Observa-se que as temperaturas de usinagem e compactação são maiores para os ligantes modificados, principalmente para o CAP AB-8. A utilização de temperaturas mais altas para o processo de usinagem e compactação implicam em custos mais elevados na execução.

É de grande importância que as temperaturas de usinagem e compactação sejam respeitadas para cada tipo de ligante asfáltico, objetivando, dessa forma, que o produto apresente seu desempenho ideal e, por consequência, que o revestimento tenha boa qualidade e durabilidade.

#### 4.4. ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO – RTFOT

Para este ensaio, foram verificadas as variações da perda de massa para o CAP 50/70, CAP 55/75-Ee CAP AB-8. Os resultados são apresentados no Gráfico 8.

**Gráfico 8 - Perda média de massa para o CAP 50-70, CAP 55/75 e CAP AB-8.**

Fonte: Próprio autor.

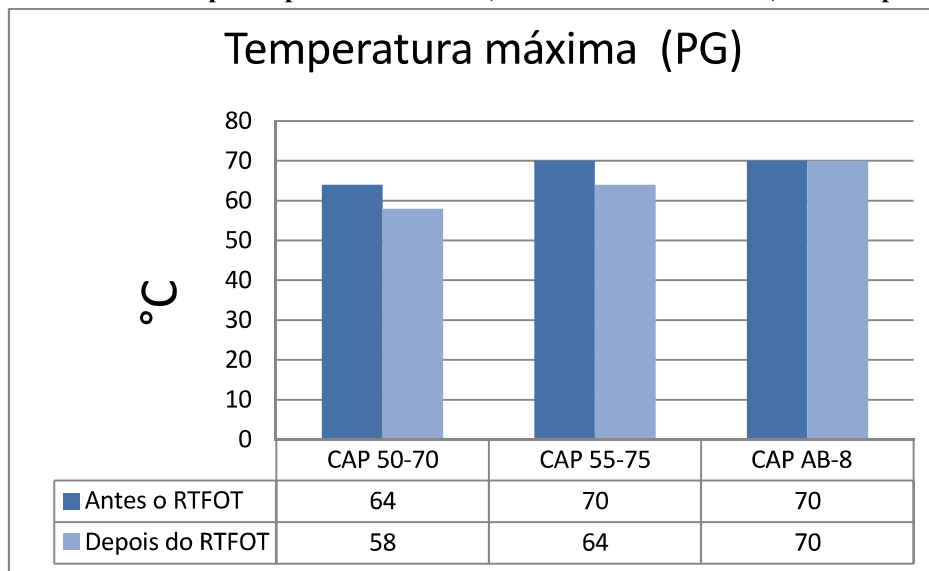
O ensaio de RTFOT provoca um endurecimento do asfalto, causando queda da penetração e aumento no valor da temperatura de amolecimento, o que é bem correlacionado com o real, visto no processo de usinagem da mistura asfáltica. (BERNUCCI et al., 2008).

O máximo de variação de massa ocasionada pela perda de voláteis e pela oxidação permitida pela Agência Nacional de Petróleo é de 0,5% CAP 50-70 e de 1%, para o CAP 55/75 e CAP AB-8. Dessa forma, pode-se verificar que todas as amostras se encontram conforme a diretriz exigida.

#### 4.5. ENSAIO REOLÓGICO DE PG (PERFORMANCE GRADED)

Pelo fato da maior parte do território brasileiro apresentar um clima tropical com temperaturas médias de 25°C, neste ensaio não foi verificada a temperatura baixa. Sendo assim, verificou-se só a máxima temperatura. O PG determinado seguiu as especificações SUPERPAVE. Estes valores obtidos garantem a adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes no que se diz respeito ao CAP. Os resultados são apresentados no Gráfico 9.

**Gráfico 9 - Grau de desempenho para o CAP 50-70, CAP 55/75 e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.**



Fonte: Próprio autor.

As amostras de CAP 50-70 e CAP 55-75 tiveram sua PG reduzida e após o envelhecimento, apenas o CAP AB-8 manteve sua temperatura. Assim o grau de desempenho apresentado pelo ligante modificado com borracha de pneus, se mostra o mais eficaz, pois este mantém sua temperatura após o envelhecimento.

O Grau de Desempenho dos CAPs obtidos nesta pesquisa indica que os mesmos possuem propriedades físicas adequadas para o emprego em campo. E estas devem ser as temperaturas mais elevadas do pavimento em serviço.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

As propriedades físicas dos ligantes asfálticos pesquisados foram satisfatórias para a utilização na pavimentação. O CAP modificado pelo polímero (SBS) e borracha contribui para o aumento da viscosidade, bem como no ponto de amolecimento, reduzindo a susceptibilidade térmica e, também, favorecendo a menor ocorrência de deformações.

Devido ao aumento da viscosidade, nos ligantes modificados, foi observada a necessidade de uma maior temperatura para usinagem e compactação o que implica em custos mais elevados e exposição do trabalhador a um ambiente ainda mais insalubre. Com o aumento da viscosidade, ocorreu a diminuição da penetração, conferindo um aumento de rigidez na amostra, o que fez com que o CAP 50-70 apresentar inconformidade com as especificações brasileiras.

As amostras ensaiadas mostraram perda de massa inferior ao exigido pela ANP e as temperaturas no ensaio de Grau de Desempenho mantiveram-se as mesmas para o CAPAB-8 antes e após o envelhecimento, e tiveram uma redução de 6 graus para o CAP 50-70 e o CAP 55-75.

O ligante que apresentou melhor desempenho em relação aos ensaios realizados foi o CAPAB-8, apresentando maior viscosidade, menor suscetibilidade térmica e maior PG antes e após o envelhecimento por RTFOT.



## 6 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Materiais asfálticos-Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional**. NBR 15235, 8p. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Micro revestimentos asfálticos a frio modificados por polímero - Materiais, execução e desempenho**. NBR 14948,8p. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Emulsões asfálticas modificadas com polímero — **Determinação do resíduo seco por evaporação**. NBR 14896, 2p. Rio de Janeiro. 2002.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais betuminosos - **Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola**. NBR 6560, 4p. Rio de Janeiro. 2000.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais betuminosos – **Determinação da penetração**. NBR 6576, 5p. Rio de Janeiro. 1998.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Materiais betuminosos para emprego em pavimentação**. NBR 7208, 2p. Rio de Janeiro. 1990.

ASPHALT INTITUTE. **Manual del asfalto**. Trad. Do inglês: Manuel Velásquez, Bilbao: Urmo, 1973.

ASPHALT INTITUTE. **Principles of hot-mix asphalt pavements**. Lexington: 1983. (Manual series,22).

ASTM D 4402 (2002). **Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus**.

ASTM D7175 – 08 (2005).**Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. American Society for Testing and Materials.

ASTM D6373 – 15 (2008).**Specification for Performance Graded Asphalt Binder**. American Society for Testing and Materials.

AZEVEDO, Breno Costa de. **Análise do comportamento reológico dos ligantes asfálticos cap 50/70 e cap 55/75.** [ 2017 ]. 51 f. trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia Civil) - Universidade São Francisco, Campina Grande – Paraíba, 2017.

BALDO, José Tadeu. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA- materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

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

BILLITER, T. C. (1997) **The Characterization of Asphalt-Rubber Binder.** Tese de Doutorado, Texas A&M University, College Station, EUA.

CARNEIRO, Mariana Souza. **Seleção do ligante asfáltico em função do clima e do tráfego da região de aplicação:** Estudo de caso - Rio de Janeiro. 2015. 70 f. trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

COELHO, Alaíde Luiza; RODRIGUES, Matheus; SOUSA, Hawinne; RESENDE Andressa de. **Impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos pneus inservíveis, e a sua utilização na massa asfáltica.** Revista Anuário de produções acadêmico - científicas dos discentes da faculdade Araguaia, Goiânia, v.3, n.3, 2014. Disponível em: <<http://www.fara.edu.br/sipe/index.php/anuario/article/view/285>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

DOMINGOS, Matheus David Inocente; FAXINA, Adalberto Leandro. **Ensaio MSCR segundo as normas ASTM D7405-10a e AASHTO T350-14: um estudo de caso envolvendo ligantes asfálticos modificados.** Revista Transportes, v.24, n.3, 2016. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1115>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

JÚNIOR, J., M., R. **Estudo das Propriedades Reológicas do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP50/70) Modificado com Polímeros Funcionalizados.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

LUCENA, Maria da Conceição Cavalcante. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. 2005. 186 f. tese (Doutorado em química orgânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

LEITE, L.F.M., **Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1999.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. 414 f. tese (Doutorado em engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ODA, Sandra;NASCIMENTO, Luís Alberto Herrmann do; EDEL, Guilherme. **Aplicação de asfalto-borracha na Bahia**. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2005, Salvador. Anais eletrônicos... Salvador: 2005. Disponível em: <[http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0672\\_05.pdf](http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0672_05.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 1997.

OLIVEIRA, Cláudio Roberto de; RIBEIRO, Sílvio José, GOMES, Carlos Augusto; SILVA, Gilberto. **Experimentos em misturas asfálticas com adição de borracha moída de pneus**. In: XIII INIC, IX EPG E III INIC JR, 3., 2009, São Paulo. Anais eletrônicos. São Paulo:UNIVAP, 2009. Disponível em: <[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2009/anais/indice\\_geral.html](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/indice_geral.html)>. Acesso em: 21 mar. 2017.

PANTAROTTO, Thiago da Cunha. **Concreto betuminoso usinado a quente modificado por asfalto borracha**. 2007. 81 f. Monografia (Bacharelado em engenharia Civil) - Universidade São Francisco, Itatiba, 2007.

SANCHES, Felipe Gustavo; GRANDINI, Fernando Henrique Bueno; JUNIOR, Orlei Baierle. **Avaliação da viabilidade financeira de projetos com utilização do Asfalto-Borracha em relação ao asfalto convencional**. 2012. 73 f. trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

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

SOUZA, Luciana Alves De Souza; FIGUEREDO, Giane Lourdes Alves de Souza; SANTOS, Elizeu José dos; MARI, Marcelo Molina; BRITO, Rogério dos Reis, A

**destinação de pneus inservíveis numa transportadora da região norte do estado do Tocantins**, RevistaJNT- Facit Business and Technology Journal, v.1, n.1, 2017. Disponível em: <<http://131.221.229.66:8081/revista/index.php/JNT/article/view/139>>. Acesso em: 18 mar. 2017.

YODER, e J. **Principles of pavement design**. Londres: JONH WILEY E SONS, INC., 1959. 569 p.