



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

**VINÍCIUS MEDEIROS DE MORAIS**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO MÁSTIQUE ASFÁLTICO A  
PARTIR DA ADIÇÃO DE CASCALHO DE POÇOS DE PERFURAÇÃO  
DE PETRÓLEO**

**Campina Grande  
2021**

**VINÍCIUS MEDEIROS DE MORAIS**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO MÁSTIQUE ASFÁLTICO A  
PARTIR DA ADIÇÃO DE CASCALHO DE POÇOS DE PERFURAÇÃO  
DE PETRÓLEO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil do  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
requisito básico para a aprovação do componente  
curricular.

Orientador: Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes  
Lucena

Co-orientadora: Flávia do Socorro de Sousa  
Carvalho

Campina Grande  
2021

## AGRADECIMENTOS

Sempre em primeiro lugar, louvo e dou graças a Deus, pelo Seu amor e bondade infinita, a Sua presença me carrega até aqui, sempre me guiando pela luz da sua misericórdia, fortalecendo e me levantando em todas as dificuldades.

Aos meus pais, Antonio Bento de Moraes e Joseny de Medeiros Moraes, por todo amor, confiança e forças derramadas sobre mim, vocês sempre foram meu porto seguro e minha fonte de determinação para chegar até aqui, todo o meu amor e agradecimento eterno, por tudo que fizeste por mim.

Ao meu avô, Manoel Bento de Moraes (*in memoriam*), por todos os conselhos e desejo pela minha vitória, seu amor sempre me inspirou a lutar, e sei que o senhor está orgulhoso de mim.

A minha irmã, Ana Karolina de Medeiros Moraes, pelo o amor e companheirismo dispostos a mim, dividir a caminhada da vida contigo é um presente divino, agradeço por todo o apoio e estímulos as minhas lutas.

As minhas avós, Josefa Ferreira de Lucena e Terezinha Elizeu de Medeiros, e ao meu avô, João Leônidas de Medeiros (*in memoriam*), por todo amor derramo sobre mim, conselhos e vibrações com minhas vitórias. Estendo meus agradecimentos a toda minha família, essa vitória também é de vocês.

Ao meu orientador, Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena, por todo auxílio, confiança e esforços para com minha caminhada acadêmica, condições que tornaram possível a conclusão deste trabalho. A minha coorientadora, Flávia do Socorro de Sousa Carvalho, por toda disposição e estímulo.

Aos meus amigos irmãos, Bruno Satyro e Paulo Filho, por todo o companheirismo, cuidado e afeto, o apoio incansável de vocês foi essencial para a chegada deste momento.

Ao amigo e companheiro de teto nesses últimos cinco anos, Lucas Ayslan, pela amizade e apoio em todos os momentos, dividir esta caminhada contigo, tornou tudo mais fácil e alegre.

Aos amigos, Lucas Lucena, Gustavo Silva, Wanderson Charles, João Vitor, João Batista, Lucas Barbosa e tantos outros que jamais serão esquecidos, agradeço pela amizade e apoio.

Aos colegas e amigos, Gustavo Tolêdo, Mickael Petronio, Luma Gabriela, Jullyo Rithiery, e tantos outros que tive o prazer de compartilhar a vida acadêmica, vocês tornaram está caminhada mais produtiva e alegre.

A minha vizinha e amiga, Priscila Luz, por todo apoio e inspiração transmitido para a iniciação nas pesquisas acadêmicas, agradeço pela paciência e disponibilidade em me ajudar.

Aos professores, técnicos e amigos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), em especial a Ildinho, Arthur, Jadilson, Daniel e Thamires.

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC), por propiciar a minha formação.

A todos aqueles que não foram citados aqui, porém, me ajudaram diretamente ou indiretamente para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigado por tudo.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este presente trabalho ao meu avô, Manoel Bento de Morais (in memoriam), por todo o amor e cuidado. Sua presença é eterna em minha vida.*

## RESUMO

Dentre os desafios de projetar um pavimento que apresente um bom desempenho, a escolha dos materiais é um dos pontos mais importantes, e além disso, compreender a interação desses materiais. Entre os componentes do pavimento, o filer apresenta importantes interações com o ligante, que é a formação do mástique asfáltico, que reflete nas propriedades das misturas asfálticas. Um dos materiais que vem sendo estudado como uma possibilidade de utilização como filer em misturas asfálticas, é os cascalhos provenientes das atividades de perfuração de poços de petróleo. O presente trabalho, busca compreender o comportamento reológico do mástique asfáltico a partir da adição de cascalho proveniente de poços de perfuração. Para tal, foi realizado a formação dos mástiques asfálticos em três proporções filer/CAP estabelecidos pela bibliografia, que são, 38% de resíduo de cascalho, 19% de resíduo de cascalho + 19% da cal, e 38% da cal. Por fim, foi realizado os ensaios reológicos de viscosidade rotacional, grau de desempenho (PG), MSCR e LAS, nas amostras dos mástiques asfálticos e o CAP puro. Os resultados indicam que a incorporação do resíduo de cascalho no ligante, aumenta a viscosidade e o módulo complexo, porém, reduz a resistência ao dano. Portanto, o comportamento do mástique asfáltico a partir da incorporação do resíduo de cascalho, apresenta uma menor susceptibilidade a variação térmica, e conseqüentemente, uma tendência ao aumento na resistência à deformação permanente, entretanto, apresenta uma menor vida de fadiga.

**Palavras-chave:** Mástique asfáltico, Reologia de ligantes, Cascalho de perfuração.

## ABSTRACT

Among the challenges of designing a floor that performs well, the choice of materials is one of the most important points, and in addition, understanding the interaction of these materials. Among the components of the pavement, the filler presents important interactions with the binder, which is the formation of asphalt mastic, which reflects on the properties of asphalt mixtures. One of the materials that has been studied as a possibility to be used as filler in asphalt mixtures, is the cuttings from oil well drilling activities. The present work seeks to understand the rheological behavior of asphalt mastic based on the addition of gravel from drilling wells. For this, the formation of asphalt mastics was carried out in three filler / CAP proportions established by the bibliography, which are 38% of gravel residue, 19% of gravel residue + 19% of lime, and 38% of lime. Finally, rheological tests of rotational viscosity, performance grade (PG), MSCR and LAS were performed on samples of asphalt mastics and pure CAP. The results indicate that the incorporation of the gravel residue in the binder, increases the viscosity and the complex module, however, reduces the damage resistance. Therefore, the behavior of the asphalt mastic from the incorporation of the gravel residue, presents a lower susceptibility to thermal variation, and consequently, a tendency to increase in the resistance to permanent deformation, however, it presents a shorter fatigue life.

**Keywords:** Asphalt mastic, Binder rheology, Drilling gravel.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Esquema de produção de asfalto em um estágio .....	18
<b>Figura 2</b> - Esquema da divisão dos grupos do ligante asfáltico .....	19
<b>Figura 3</b> - Esquema da aplicação de tensão de cisalhamento na amostra de ligante asfáltico	25
<b>Figura 4</b> - Decomposição vetorial do módulo dinâmico de cisalhamento .....	26
<b>Figura 5</b> - Classificação de PG para alguns tipos de ligantes.....	27
<b>Figura 6</b> - Representação esquemática do ensaio de MSCR.....	28
<b>Figura 7</b> - Ensaio LAS proposto por Johnson (2010).....	30
<b>Figura 8</b> - Ensaio LAS proposto por Hintz (2012).....	31
<b>Figura 9</b> - Modelo de fadiga do ligante proposto por Jonhson (2010).....	31
<b>Figura 10</b> - Esquema da perfuração de poço .....	32
<b>Figura 11</b> - CAP Puro.....	36
<b>Figura 12</b> - Resíduo de Cascalho.....	37
<b>Figura 13</b> - Curvas Distribuição granulométrica por difração a laser do Resíduo de cascalho .....	39
<b>Figura 14</b> - Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG) do resíduo de cascalho. ....	40
<b>Figura 15</b> - Difratograma de raios-x do Resíduo de cascalho. ....	41
<b>Figura 16</b> - Fluxograma das atividades. ....	42
<b>Figura 17</b> - Misturador mecânico .....	43
<b>Figura 18</b> - Processo de formação do mástique asfáltico .....	44
<b>Figura 19</b> - Reômetro de cisalhamento direto (DSR).....	45
<b>Figura 20</b> - Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III ULTRA. ....	46
<b>Figura 21</b> - Perda de massa RTFO .....	49
<b>Figura 22</b> - Viscosidade Rotacional .....	51
<b>Figura 23</b> - Grau de Desempenho (PG).....	53
<b>Figura 24</b> - Índice de envelhecimento .....	54
<b>Figura 25</b> - Módulo de cisalhamento dinâmico.....	55
<b>Figura 26</b> - Ângulo de fase .....	56
<b>Figura 27</b> - Compliância não recuperável .....	57
<b>Figura 28</b> - Diferença percentual - Jnr,diff.....	58
<b>Figura 29</b> - Valores dos parâmetros "A" e "B" .....	59
<b>Figura 30</b> - Número de ciclos até a falha.....	60



<b>Figura 31 - Curvas de tensão x deformação .....</b>	<b>61</b>
--	-----------

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

°C	Graus Celsius
%Rec	Percentual de Recuperação
AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Aging Index
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBR	Bending Beam Rheometer
C	Carbono
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional de Transportes
Cos	Cosseno
Cp	Centipoise
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	Dynamic Shear Rheometer
DTT	Direct Tension Test
FWHA	Federal Highway Administration
G'	Módulo de Armazenamento
G''	Módulo de Dissipação
G*	Módulo Complexo de Cisalhamento
Hz	Hertz
Jnr	Complância não recuperável
KPa	Quilopascal
LAS	Linear Amplitude Sweep
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MSCR	Multiple Stress Creep Recovery
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
Nf	Número de Ciclos até a Falha
Pa	Pascal
PAV	Pressure Aging Vessel

PG	Performance Grade
RC	Resíduo de Cascalho
Rpm	Rotações por Minuto
RTFO	Rolling Thin Film Oven
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
Sen	Seno
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement System
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VECD	Viscoelastic Continuum Damage

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	26
Equação 2 .....	26
Equação 3 .....	29
Equação 4 .....	29
Equação 5 .....	29
Equação 6 .....	32
Equação 7 .....	47

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Classificação dos ligantes asfálticos quanto ao valor de Jnr de acordo com a norma AASHTO M320 .....	29
<b>Tabela 2</b> – Recomendação dos valores mínimos do percentual de recuperação propostos pela FHWA (2010).....	29
<b>Tabela 3</b> - Composição química de cascalhos de perfuração .....	33
<b>Tabela 4</b> - Metais Pesados em cascalhos de perfuração .....	33
<b>Tabela 5</b> - Caracterização do ligante .....	36
<b>Tabela 6</b> - Massa Específica do resíduo .....	38
<b>Tabela 7</b> - Porcentagem de ligante do resíduo de cascalho. ....	38
<b>Tabela 8</b> - Umidade higroscópica do resíduo de cascalho.....	39
<b>Tabela 9</b> - Composição química do Resíduo de cascalho. ....	40
<b>Tabela 10</b> - Viscosidade Rotacional .....	50
<b>Tabela 11</b> - Temperaturas de Usinagem e Compactação.....	52

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 A INFLUÊNCIA DO FÍLER NAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 REOLOGIA DE LIGANTES ASFÁLTICOS .....</b>	<b>23</b>
2.3.1 Grau de desempenho (PG) .....	26
2.3.2 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) .....	27
2.3.3 Varredura linear de amplitude (LAS).....	30
<b>2.4 CASCALHO DE POÇOS DE PERFURAÇÃO DE PETRÓLEO.....</b>	<b>32</b>
<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 MATERIAIS.....</b>	<b>36</b>
3.1.1 Ligante .....	36
3.1.2 Resíduo de Cascalho.....	37
<b>3.2 MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.2.1 Formação do mástique asfáltico.....	43
3.2.2 Ensaio Reológicos .....	44
3.2.3 Viscosidade Rotacional.....	45
3.2.4 Grau de Desempenho (PG).....	46
3.2.5 Fluência e recuperação sob tensões múltiplas - MSCR .....	47
3.2.6 Varredura de amplitude linear – LAS.....	47
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1 ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2 VISCOSIDADE ROTACIONAL.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 GRAU DE DESEMPENHO – PG.....</b>	<b>52</b>

<b>4.4</b>	<b>FLUÊNCIA E RECUPERAÇÃO SOB TENSÕES MÚLTIPLAS – MSCR .....</b>	<b>56</b>
<b>4.5</b>	<b>VARREDURA LINEAR DE AMPLITUDE DE DEFORMAÇÃO – LAS.....</b>	<b>58</b>
	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>63</b>

## INTRODUÇÃO

O modal de transporte de maior predominância no Brasil é o rodoviário, que segundo relatórios da Confederação Nacional de Transportes (CNT) de 2019, indicam que 90% do transporte de passageiros e 61% de toda carga transportada, é por meio das rodovias. Com isso, existe a necessidade de constantes aprimoramentos nos pavimentos, que resultem em maior conforto e segurança aos usuários.

Segundo Rodrigues (2009), a falta de recuperação das rodovias implica no comprometimento do escoamento de cargas, impedindo que seja realizado de forma rápida e eficaz, prejudicando o desenvolvimento econômico da nação.

Para tal, estudos que busquem compreender o desempenho dos pavimentos são de suma importância para aperfeiçoar a experiência do usuário na utilização do pavimento, como a segurança e o conforto, permitindo melhores condições de tráfego, como também, retardar a necessidade de recuperação da rodovia.

Segundo Cravo (2016), o desafio em projetar um pavimento é planejar uma obra de engenharia que obedeça às demandas estruturais e funcionais do pavimento, levando em consideração a escolhas dos materiais que sejam adequados as solicitações e o clima local.

A escolha do ligante é fundamental no desempenho do pavimento asfáltico, tendo em vista, que o seu processo de envelhecimento, conforme indica Silva (2011), resulta em um aumento na consistência, impactando na rigidez do material, tornando mais suscetível ao trincamento das misturas asfálticas.

Para minimizar os problemas com os revestimentos asfálticos, tem-se estudado o comportamento do mástique asfáltico (AMARAL, 2019) (RODRIGUES, 2019), que é a combinação entre o filer e o ligante asfáltico. Segundo Rodrigues (2019), o mástique desempenha um papel de lubrificação entre os agregados de maiores dimensões, influenciando no volume de vazios, e como consequência nas características da mistura asfáltica.

Um dos materiais que vem sendo estudado como uma possibilidade de utilização como filer em misturas asfálticas, é os cascalhos provenientes das atividades de perfuração de poços de petróleo. Lucena (2008) mostrou que a utilização de cascalhos, representa uma alternativa para redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequado desse resíduo na natureza.



Portanto, a presente pesquisa tem objetivo de compreender e avaliar o comportamento do mástique asfáltico formado entre o ligante e o filer provenientes de cascalhos de perfuração de poços de petróleo, com intuito de validar seu uso nas misturas asfálticas.

## **1.1 OBJETIVOS**

### *1.1.1 OBJETIVO GERAL*

O objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento de mástiques asfálticos, a partir da adição de cascalho proveniente de poços de perfuração (resíduo oleoso oriundo das atividades de exploração e produção de petróleo).

### *1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

- avaliar os efeitos da incorporação do cascalho proveniente de poços de perfuração nas propriedades reológicas dos ligantes asfálticos;
- estudar a influência da adição do cascalho proveniente de poços de perfuração no envelhecimento de ligantes submetidos ao procedimento de envelhecimento a curto prazo RTFO;
- realizar a comparação dos mástiques de cascalho e cal, nas propriedades reológicas dos ligantes asfálticos.

## REFERENCIAL TEÓRICO

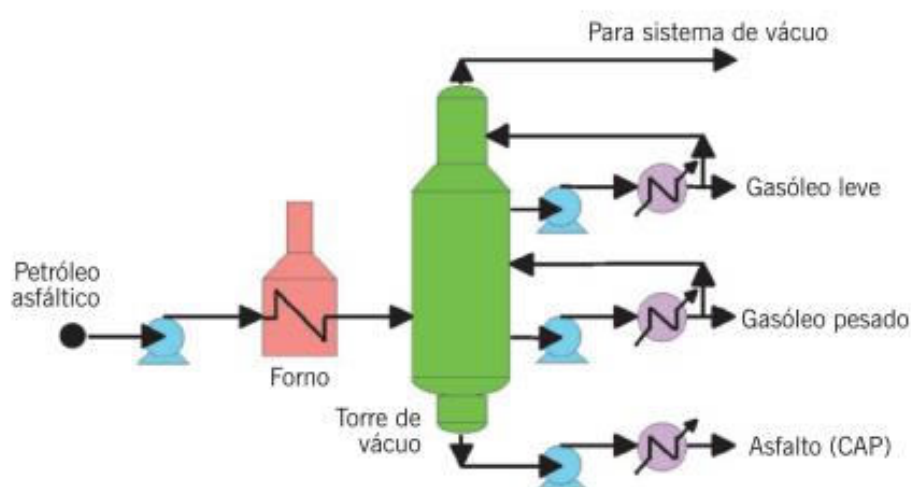
### 2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS

O ligante asfáltico, ou betume, é um material amplamente e historicamente utilizado nas construções civis, sendo datado registros de suas primeiras utilizações em 3000 a.C., inicialmente utilizado como um material impermeabilizante para reservatórios de água. Entre suas características é destacado o fato de ser uma substância aglutinante, de aparência escura e reluzente, com uma estrutura de moléculas pesadas, em sua maioria sendo hidrocarbonetos, desde os mais simples aos mais complexos.

O emprego dos ligantes asfálticos é ampla, podendo ser encontrado sua aplicação desde as obras de engenharia até as mais diversas atividades industriais. Entre suas aplicações é destacado o uso no revestimento dos pavimentos. Segundo Bernucci *et al.*, (2008) cerca de 95% das estradas pavimentadas utilizam o revestimento asfáltico, e é a principal forma de revestimento para pavimentos em todo o mundo.

Os ligantes asfálticos empregados nos revestimentos são oriundos da destilação do petróleo, na qual, após a destilação das frações mais leves e as pesadas (Figura 1), o seu resíduo caracterizado na especificação emitida na Resolução de número 19 de 11 de julho de 2005 da ANP (Agência Nacional de Petróleo), é denominado como Cimento Asfáltico de Petróleo, ou CAP. (CRAVO, 2016).

**Figura 1** - Esquema de produção de asfalto em um estágio



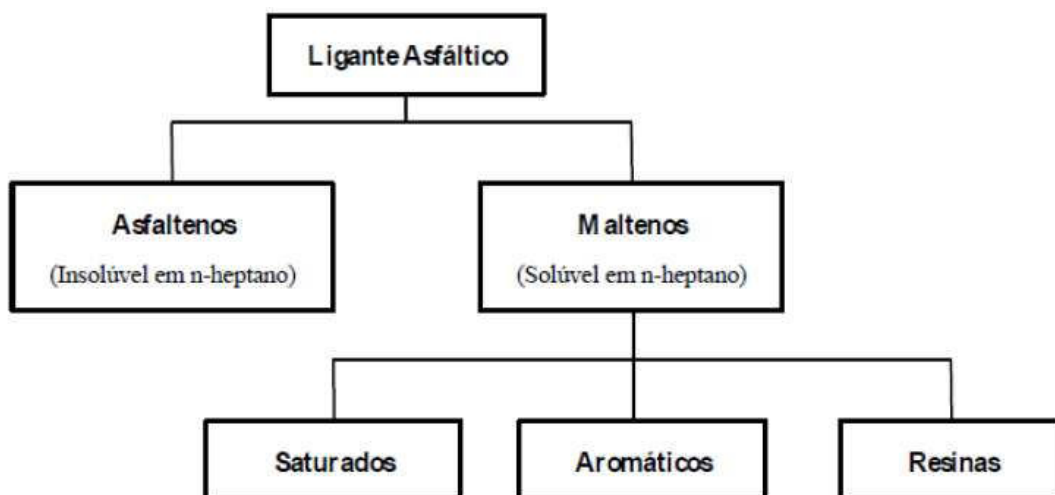
**Fonte:** Bernucci *et al.*, 2008

Quanto a sua composição química, os ligantes asfálticos provenientes da destilação do petróleo, apresentam em sua maior proporção os átomos de carbono, que compõe cerca de 80% a 87% (em massa), seguido dos átomos de hidrogênio, que equivale a cerca de 8% a 12% (em massa). Além disso, os heteroátomos tais como o enxofre (1% a 9%, em massa), nitrogênio (0% a 1,5%, em massa) e oxigênio (0,5% a 1,5%, em massa) também estão presentes. Em menor quantidade encontram-se metais como: vanádio (10 mg/kg a 2000 mg/kg) e níquel (20 mg/kg a 200 mg/kg), além de traços de elementos como alumínio, silício, cromo, cobre, zinco e chumbo (EL BEZE, 2008).

Quanto a variação entre as proporções dos heteroátomos, presentes no ligante asfáltico, é devido a fonte de extração do petróleo e seu processo de destilação, e por conta dessa variação, o resultado obtido se apresenta de diversas maneiras, modificando suas propriedades físicas e seu desempenho nas misturas asfálticas (SULTANA, 2014).

Historicamente os ligantes asfálticos são divididos em dois grupos, o grupo dos asfaltenos e o grupo dos maltenos, sendo este último subdividido em três grupos, os aromáticos, os saturados e as resinas, a essa classificação se denomina SARA, em referência às iniciais dos constituintes (Figura 2) (HUNTER *et al.*, 2015). Segundo Cravo (2016) as divisões acontecem pela complexa tarefa em determinar a composição química exata, sendo necessário utilizar uma abordagem reducionista, fracionando o CAP em famílias de acordo com a sua solubilidade.

**Figura 2** - Esquema da divisão dos grupos do ligante asfáltico



Fonte: Gama, 2016

Os quatro grupos apresentados impõem uma grande influência sobre as propriedades de um ligante asfáltico. Os asfaltenos são responsáveis pelo aumento da viscosidade, tornando

os CAPs menos susceptíveis a variações de temperatura, os saturados influenciam negativamente a susceptibilidade térmica, as resinas melhoram a dispersão dos asfaltenos e a ductibilidade e os aromáticos acabam contribuindo positivamente sobre as propriedades físicas, melhorando-as (CORBETT e PETROSSI, 1978).

Segundo Lucena (2008) a principal característica do ligante asfáltico é a sua susceptibilidade à temperatura, o que garante o comportamento termoplástico, isto é, o material apresenta características de semissólido em temperatura ambiente, e líquido viscoso quando aquecido.

## **2.2 A INFLUÊNCIA DO FÍLER NAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

O filer, ou material de enchimento, é definido pela norma DNIT – EM 367/97 como um material inerte aos demais componentes da mistura asfáltica, com granulometria de pelo menos 65% de passante na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada.

Motta & Leite (2000) apontam que a influência do filer no comportamento das misturas asfálticas é amplamente reconhecido nos estudos, pois, o filer além de preencher os vazios entre os agregados graúdos, modifica as propriedades do ligante, modificando seu comportamento.

Conforme indica Anderson *et al.*, (1992) *apud* Cravo (2016) os agregados minerais têm potencial para absorver (recolher em si) ou dessorver (permitir aderência) componentes asfálticos em sua superfície. E quanto a essa capacidade de absorção dos agregados minerais, tem uma influência direta no tempo de envelhecimento das misturas asfálticas.

Coutinho (2012), afirma que os problemas com fadiga surgem devido fenômenos de pequena escala, ocorrendo na parte fina da mistura asfáltica, que é resultado da interação do ligante e do filer.

A Matriz de Agregados Finos (MAF) é definida pela parte fina das misturas asfálticas, composto por agregados miúdos, filer e ligante asfáltico, e a Mistura Asfáltica Completa (MAC), é composta por cimento asfáltico, agregados graúdos, agregados miúdos e filer (CASTELO BRANCO, 2008).

Bardini *et al.*, (2009), comenta que o índice de vazios influencia diretamente no comportamento do pavimento a fadiga, e que esse efeito ocorre na rigidez e nas tensões de tração que atuam no ligante ou na combinação filer-ligante, que provoca diminuição da resistência à fadiga.

O filer desempenha duas funções nas misturas asfálticas, conforme a dimensão de suas partículas. As maiores partículas têm a função de preencher os vazios e interstícios dos

agregados graúdos, articulando o contato pontual entre as partículas maiores e dando maior resistência às misturas. As partículas menores do filer se combina com o ligante asfáltico, promovendo uma maior consistência e cimentando as partículas maiores, formando a parte ativa do mástique (CRAVO, 2016).

Quando a quantidade de ligante aumenta além do índice de vazios Rigden ou índice de vazios do filer seco compactado, as partículas perdem o contato entre elas e a quantidade adicional de ligante promove lubrificação entre as partículas. Quando a quantidade livre de ligante asfáltico diminui, a rigidez da mistura aumenta. Quanto mais fino for o filer, menor deve ser a razão filer/ligante, pois o volume livre de ligante é que aumenta a espessura de recobrimento das partículas dos agregados (MOTTA & LEITE, 2000).

A formação do mástique promove significativas alterações nas características das misturas asfálticas, influenciando no comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água. A rigidez do mástique também influencia as tensões desenvolvidas e a resistência à fadiga a temperaturas intermediárias, bem como afeta a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica a altas temperaturas e as tensões desenvolvidas e a resistência ao trincamento a baixas temperaturas. (KIM *et al.*, 2003).

Na dosagem das misturas asfálticas, o mástique influencia a lubrificação das partículas de agregados maiores e afeta os vazios do agregado mineral, as características de compactação e o teor ótimo do ligante asfáltico (BARDINI, 2010).

As propriedades do mástique é definida a partir do tipo e o teor de seus componentes, conforme sua natureza e propriedades. Bardini (2012) afirma que o mástique tem grande influência na microestrutura das misturas asfálticas, afetando sua trabalhabilidade, rigidez e propriedades mecânicas finais.

Bechara *et al.*, (2008), afirma que a principal variável na formação do mástique é sua proporção filer/ligante, influenciando diretamente nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica.

Moraes (2014) estudou as alterações que o mástique proporciona no envelhecimento das misturas asfálticas, verificando que esse efeito é de acordo com a quantidade de interações entre o filer e o ligante, que irá depender das características do material pétreo, tais como área superficial, granulometria, reatividade, e entre outros. Foi observado também, que a presença do mástique nas misturas envelhecidas, resultou na modificação da curva mestra, modificando sua inclinação.

No mástique, o ligante asfáltico manifesta sua natureza elástica, viscoelástica ou viscosa em função da temperatura ou do tempo de carregamento, enquanto o agregado mineral preserva sua natureza elástica independentemente das condições de temperatura e de carregamento (FAXINA *et al.*, 2009).

Segundo Bardini *et al.*, (2012) a adição do filer nas misturas asfálticas provoca mudanças no comportamento reológico do mástique asfáltico, garantindo um aumento do módulo complexo e redução do ângulo de fase. Com isso, há um aumento na rigidez do ligante nas temperaturas altas.

Amaral; Alves (2019) e Rodrigues (2019) estudaram o comportamento do mástique asfáltico a partir da adição dos filer, metacaulim e pó de basalto, na proporção filer/ligante de 0,6 e 1,2 em massa ao CAP 30/45 e CAP modificado de classe 65/90. Foi verificado que as adições dos filer agiram tornando o mástique mais rígido, mais viscoso, menos elástico e menos suscetível à temperatura, e o metacaulim foi mais eficiente nas alterações das propriedades do asfalto do que o filer de pó de basalto.

Oliveira (2015) avaliou o comportamento do mástique asfáltico perante a utilização de diferentes dos ligantes 35/50 e 50/70, e os filer pó calcário, cimento e cal hidráulica, bem como para o caso de utilização de ligante modificado com borracha. Foi verificado que houve um aumento da dureza do ligante e da capacidade viscosa deste, como também uma diminuição do ponto de amolecimento das misturas. Nas propriedades reológicas, um aumento do módulo de rigidez e da capacidade resistente às deformações permanentes, bem como a capacidade dissipativa e elástica, embora em pequena escala. Nestes mástiques, o ângulo de fase apresentou valores muito similares aos verificados nos ligantes de origem.

Farias (2005) estudou a influência do filer proveniente da britagem de concreções lateríticas e da cal hidratada. Foi observado que a origem da laterítica e do tipo de filer, foram decisivos nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas, e que o filer laterítico apresentou melhor comportamento na resistência à tração e à resistência à fadiga.

Bardini (2013) examinou os efeitos do filer mineral sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas densas, particularmente em relação ao tipo e teor de filer. Os resultados apresentaram que, quanto a vida de fadiga, as misturas asfálticas compostas com cal hidratada apresentaram as maiores vidas de fadiga e quanto maior o teor de filer, maior a vida de fadiga, e quanto à deformação permanente, as misturas asfálticas com o menor teor de filer apresentam os menores valores de deformação não recuperável, enquanto que as misturas com o valor intermediário de filer apresentam os maiores valores.

### 2.3 REOLOGIA DE LIGANTES ASFÁLTICOS

A etimologia da palavra reologia vem do grego, *rhéos*, que significa fluxo e *logia*, que significa estudo, ou seja, reologia é o estudo do comportamento do fluxo, ou das deformações e escoamento da matéria, avaliando sua resposta em relação ao tempo e a temperatura. A reologia busca compreender a viscosidade, plasticidade, elasticidade e o escoamento da matéria.

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 a deformação é totalmente recuperada quando a força é removida. Os fluidos ideais, tal 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.*, 2006).

Segundo Mothé (2009) o parâmetro mais importante na reologia dos sólidos é a viscosidade, enquanto na reologia de líquidos, o parâmetro mais importante é a elasticidade.

Nos ligantes asfálticos há uma variação de suas propriedades conforme a temperatura, se apresentando um fluido viscoso Newtoniano, nas temperaturas altas, 150°C a 180°C, utilizadas na usinagem e compactação. Nas temperaturas de serviço entre 10°C a 70°C, o ligante se comporta como material viscoelástico. Para as mais baixas se apresenta como um material elástico com menores taxas de deformação se tornando um sólido frágil. Abaixo de sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) o ligante é descrito como um sólido vítreo (CRAVO, 2016).

Coutinho (2012) afirma que o modelo que melhor representa o comportamento dos ligantes asfálticos é o viscoelástico, pois o material asfáltico não se comporta como um sólido elástico ideal, caracterizado pela Lei de Hooke, como também, não se comporta como um fluido newtoniano.

Devido a esse comportamento viscoelástico, Gama (2016) escreve que é necessário estudar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos, para que exista condição para escolher adequadamente o material, conforme suas necessidades de desempenho e situações que serão submetidas às misturas asfálticas.

Segundo os estudos de Falchetto (2014), as misturas asfálticas tem comportamento semelhantes ao de concretos, cerâmicas ou rochas quando submetidas a baixas temperaturas.

Historicamente a avaliação dos ligantes eram efetuados por meio de observações táteis e subjetivas, por conta da falta de procedimentos que avaliasse os ligantes asfálticos (LESUEUR, 2009). Com isso, as especificações utilizadas para caracterizar o ligante, quanto a

suas propriedades reológicas, eram por meio de testes que forneciam valores empíricos, que classificavam o ligante asfáltico (KANABAR, 2010). Na década de 70, os EUA classificavam os ligantes por meio do ensaio de penetração, padronizado à temperatura de 25° C, e posteriormente, entre as décadas de 80 e 90, acrescentaram o ensaio de viscosidade Saybolt-Furol à 60° C (JAROSZEK, 2012).

Com a implantação da metodologia SUPERPAVE, em 1987 nos Estados Unidos, a análise reológica dos ligantes asfálticos passou a ser ampliada, a fim de aperfeiçoar os métodos de dimensionamento existentes, com novas maneiras de verificar o comportamento das misturas asfálticas em laboratório que se adequasse com o comportamento apresentado no campo (LUZ, 2019).

O uso de ensaios reológicos permitiu relacionar os resultados de resistência à deformação permanente e trincas por fadiga, com os ensaios mecânicos para misturas asfálticas, equilibrado a comparação do comportamento e a influência do ligante na mistura asfáltica como um todo (MARINHO FILHO, 2017).

Mello (2014) indica que os testes para determinação das propriedades reológicas, da metodologia SUPERPAVE, são realizados nos seguintes equipamentos:

- Estufa de Película Delgada Rotacional – RTFO (*Rolling Thin Film Oven*) usado para simular o envelhecimento do ligante a curto prazo que ocorre durante a usinagem e compactação da mistura;
- Vaso de Pressão de Envelhecimento – PAV (*Pressure Aging Vessel*) que simula o envelhecimento a longo prazo ao longo da vida útil do pavimento;
- Prensa de Tração Direta – DTT (*Direct Tension Test*) utilizado para determinar as propriedades de falha; Viscosímetro Rotacional usado para mensurar a viscosidade de ligantes asfálticos submetidos a altas temperaturas, comumente utilizadas nas fases de usinagem e compactação destes materiais;
- Reômetro de Flexão de Viga - BBR (*Bending Beam Rheometer*) usado para medir a rigidez em baixas temperaturas;
- Reômetro de Cisalhamento Dinâmico – DSR (*Dynamic Shear Rheometer*), usado para efetuar a identificação do comportamento viscoso e elástico do ligante.

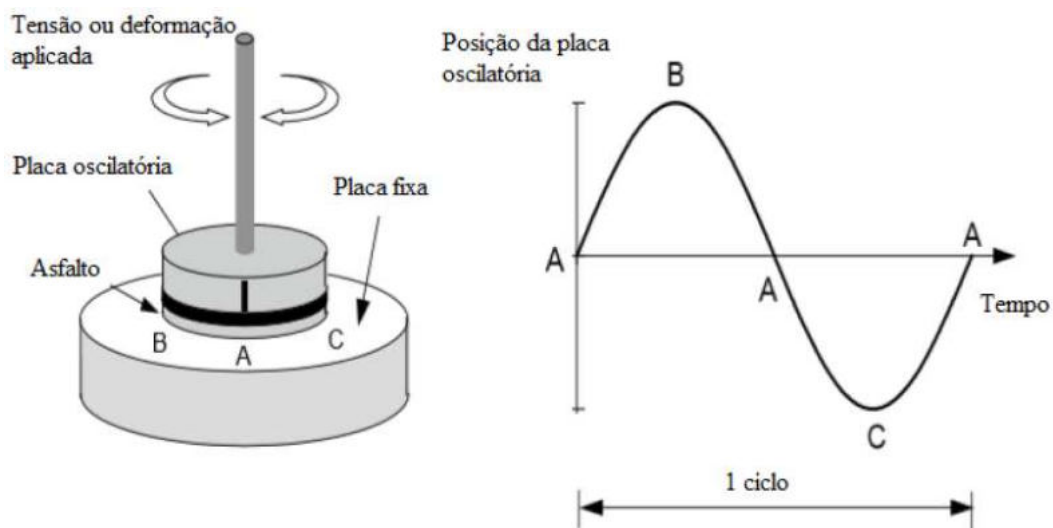
Luz (2019) escreve que o ensaio utilizado para verificar a viscosidade do ligante quando submetido a altas temperaturas, é o ensaio de viscosidade rotacional, e essa informação é uma



das maneiras para definir as etapas de usinagem e compactação das misturas asfálticas. Outro ponto importante, é que por meio da viscosidade é possível controlar as fases de bombeamento e mistura, sem comprometer a trabalhabilidade.

Marinho Filho (2017) comenta que entre os equipamentos especificados no programa SHRP (Strategic Highway Research Program), que é responsável pela criação da metodologia SUPERAVE, o DSR mostrou-se extremamente útil para o conhecimento das propriedades reológicas de ligantes asfálticos, auxiliando na análise das características de rigidez e elasticidade às temperaturas intermediárias e altas. O ensaio funciona por meio de um equipamento com duas placas planas paralelas que aplicam um cisalhamento na amostra, onde cada oscilação completa da placa superior corresponde a um ciclo (Figura 3).

**Figura 3** - Esquema da aplicação de tensão de cisalhamento na amostra de ligante asfáltico



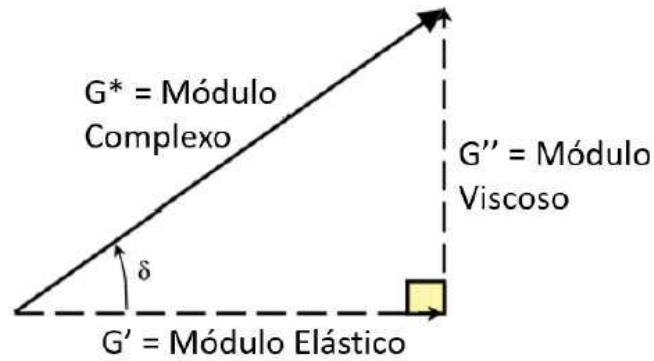
Fonte: Duarte, 2018

Segundo Cravo (2016) neste tipo de ensaio observa-se um ângulo de atraso, também conhecido como ângulo de fase, com base na deformação resultante da tensão aplicada, e que isso está associado ao módulo de rigidez da amostra. O módulo dinâmico de cisalhamento,  $G^*$ , é a resistência total a deformação do material sob uma tensão e o ângulo de fase,  $\delta$ , é a distribuição da resposta entre o módulo de armazenamento, elástico, e o módulo de perda, viscoso, dos componentes do material viscoelástico.

Fernandes (2009) indica que o módulo dinâmico de cisalhamento ou módulo complexo,  $G^*$ , pode ser definido como a razão entre o máximo de tensão de cisalhamento e o máximo de deformação, e que a partir da decomposição vetorial (Figura 4), é possível determinar o módulo de armazenamento,  $G'$ , que é componente elástico, e o módulo de perda,  $G''$ , que é componente

viscoso. As equações 1 e 2, demonstra a determinação dos componentes elástico e viscoso, a partir do módulo complexo.

**Figura 4** - Decomposição vetorial do módulo dinâmico de cisalhamento



Fonte: Marinho Filho, 2017

$$G' = G^* \cdot \cos\delta \quad \text{Equação 1}$$

$$G'' = G^* \cdot \sin\delta \quad \text{Equação 2}$$

Onde,  $G^*$ : módulo dinâmico de cisalhamento;

$G'$ : módulo de armazenamento;

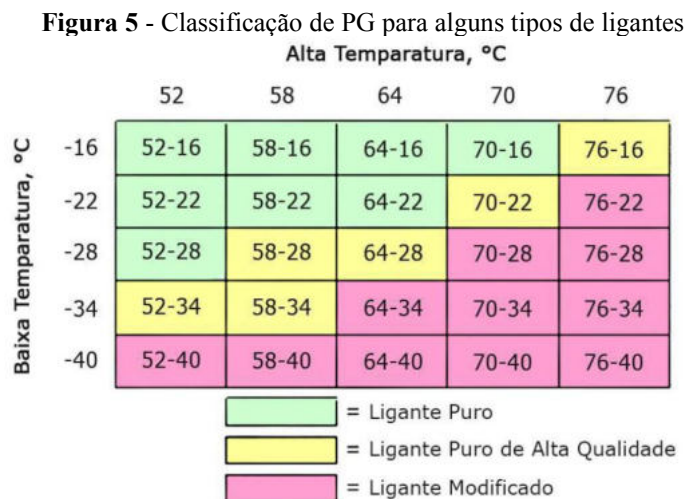
$G''$ : módulo de perda;

$\delta$ : ângulo de fase.

### 2.3.1 Grau de desempenho (PG)

Com o desenvolvimento da metodologia SUPERPAVE, foi elaborado novos sistemas de classificação para o ligante, a partir de ensaios mais precisos, substituindo o ensaio de penetração. A classificação de ligantes por meio do Grau de Performance (PG), foi aplicada a partir de 1990, na qual, essa especificação se baseia no desempenho do ligante asfáltico em várias temperaturas, tendo como objetivo principal a relação das condições que as misturas asfálticas serão submetidas, com foco nas condições climáticas, as temperaturas do ligante e do ambiente onde serão aplicados assim como, considerações de envelhecimento (MARINHO FILHO, 2017).

A representação da classificação do ligante ao ensaio de PG, consiste no seguinte modelo: **PG XX-XX**. Em que os dois primeiros dígitos é a maior temperatura que o ligante pode trabalhar, e os dois últimos números é a menor temperatura para o ligante sem afetar seu desempenho. Na Figura 5, é apresentado a classificação de PG de alguns tipos de ligante.



Fonte: Pavementinteractive.org

Segundo a norma da ASTM D 6373 -16 (2016), o parâmetro empregado para determinar o limite superior de PG é o  $|G^*|/\text{sen}\delta$ . Para ligantes antes do envelhecimento os valores desse parâmetro devem ser superiores a 1,00 kPa, e para ligantes envelhecidos após o RTFO, esse valor do parâmetro deve ser superior a 2,20 kPa.

A temperatura de classificação do PG garante ao ligante o desempenho da mistura ao cisalhamento global, considerando em termos de elasticidade em altas temperaturas, no qual, quando o pavimento é submetido a cargas cíclicas, parte dessa deformação não se recupera e torna-se permanente (GAMA, 2016).

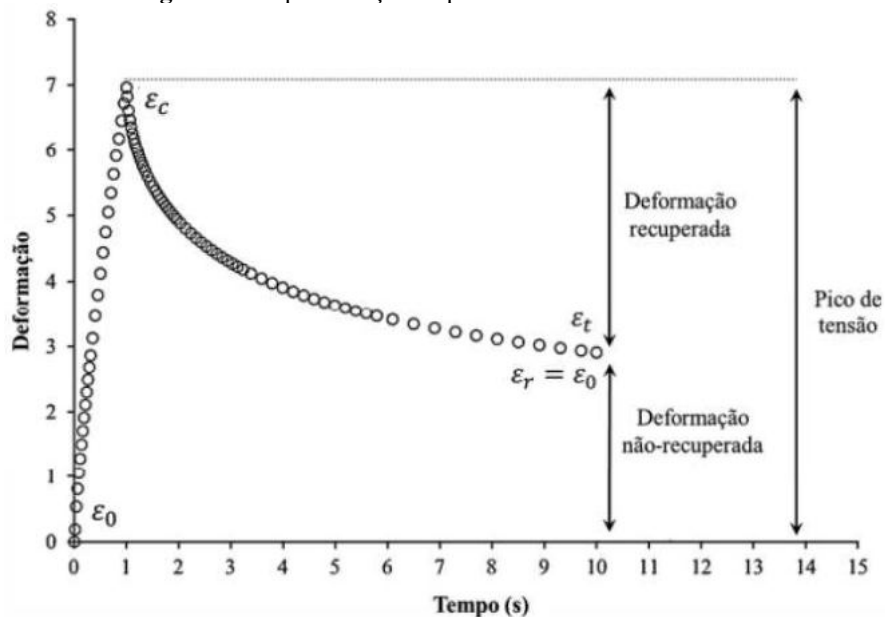
### 2.3.2 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

Diante da necessidade de ter um parâmetro que pudesse caracterizar melhor os ligantes puros e modificados a resistência à deformação permanente, Domingos e Faxina (2015) mostram que a melhor maneira de verificar esse comportamento, seria com ensaios que aplicasse cargas de forma repetida, com um período de descanso, conforme ocorre no pavimento.

O ensaio de Fluência e Recuperação sob tensões Múltiplas (MSCR), normatizado pela ASTM D 7405 -15 (2015), surge como um procedimento usado para identificar a existência de uma resposta elástica do ligante asfáltico, verificando sua variação sob dois níveis de tensão, na temperatura específica, determinada no ensaio de PG. Outro valor observado neste ensaio é a conformidade da fluência não recuperável, ou compliância não recuperável ( $J_{nr}$ ), que é um indicador da resistência do material à deformação permanente.

O procedimento do ensaio consiste na aplicação 20 ciclos de 10s cada um, sendo que, os 10 primeiros ciclos são sob uma tensão de 0,1kPa e os demais sob uma tensão de 3,2 kPa. Todos os ciclos têm em comum a aplicação da tensão por um tempo de 1s seguido de um relaxamento de 9s. Esses ciclos simulam a condição de tráfego sobre o pavimento, sendo os 10 ciclos iniciais a condição de tráfego normal, e os 10 ciclos seguintes a condição de tráfego intenso. Na Figura 6, é apresentado um esquema do comportamento do ligante ao decorrer do ensaio em função do tempo de aplicação de carga.

**Figura 6** - Representação esquemática do ensaio de MSCR



Fonte: Marinho Filho, 2017.

Ao final dos ciclos de tensão controlada são obtidos os parâmetros por meio dos valores das 3 leituras de deformação ocorrida em cada ciclo, conforme indicado na Figura 6, as quais são a recuperação no início da fluência ( $E_0$ ), após a aplicação da tensão controlada ( $E_c$ ) e após o tempo de recuperação da amostra ( $E_r$ ). Com esses valores, calcula-se os parâmetros:

$$Jnr(\sigma, N) = \frac{Er - E0}{\sigma(Pa, kPa)} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

$$\%Rec(\sigma, N) = \frac{[(Ec - E0) - (Er - E0)]}{Ec - E0} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$Jnr, diff = \frac{(Jnr 3200 - Jnr 100) \times 100}{Jnr 100} \quad \text{Equação 5}$$

A partir da avaliação dos valores determinados no ensaio, é possível a eliminação de ligantes muito sensíveis à tensão devido aos critérios propostos pela AASHTO M320 (2016) e a Federal Highway Administration (FHWA, 2010), conforme apresentado nas Tabela 1 e Tabela 2.

**Tabela 1** - Classificação dos ligantes asfálticos quanto ao valor de Jnr de acordo com a norma AASHTO M320

Propriedade	Valor máximo (kPa <sup>-1</sup> )	Tipo de tráfego	Número de passadas de um eixo padrão simples (ESAL)
J <sub>NR</sub> a 3.200 Pa e na temperatura máxima do PG	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
	1,0	Muito Pesado (V)	> 30 milhões
	0,5	Extremamente Pesado (E)	> 100 milhões

Fonte: AASHTO M320.

**Tabela 2** – Recomendação dos valores mínimos do percentual de recuperação propostos pela FHWA (2010).

Complância não recuperável a 3.200 Pa (kPa <sup>-1</sup> )	Percentual de recuperação mínimo (%)
1,01 a 2,00	30
0,51 a 1,00	35
0,251 a 0,50	45
0,125 a 0,25	50

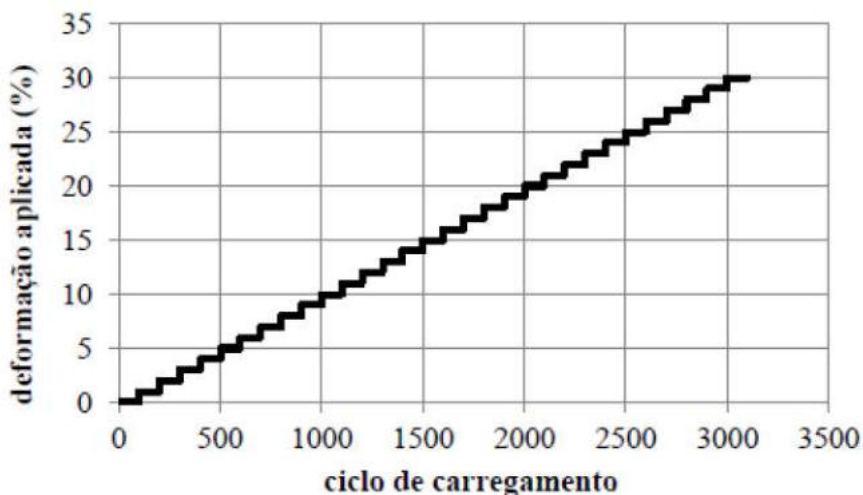
Fonte: FHWA (2010).

### 2.3.3 Varredura linear de amplitude (LAS)

O ensaio de LAS é normatizado pela ASHTO TP 101-14, sendo uma forma de determinar a resistência ao dano de ligantes asfálticos por meio da aplicação de carregamentos cíclicos empregando amplitudes de carga linearmente crescentes.

A análise do ensaio, foi inicialmente baseada na teoria do dano contínuo viscoelástico (VECD), conforme é apresentado na Figura 7, como uma forma de determinar o modelo de fadiga do ligante asfáltico (JOHNSON, 2010), que a partir dos estudos de Bahia (2013), verificou-se falha nesse método, na qual o dano de fadiga não acontece pela redução de  $G^*$ .

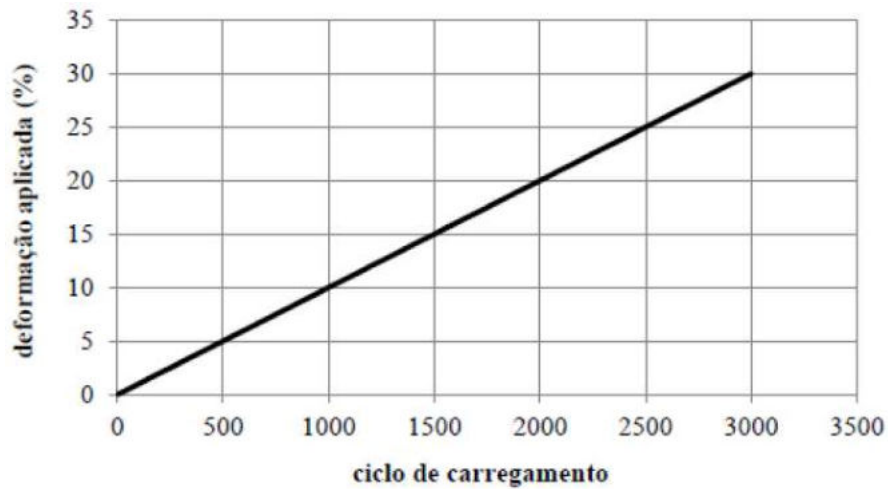
**Figura 7** - Ensaio LAS proposto por Johnson (2010)



Fonte: Pamplona (2013)

Para a correção do ensaio, Hintz (2012) sugere que a análise seja realizada pelo modelo de fratura e não pela teoria do dano contínuo viscoelástico, devido a macrofraturas que ocorrem durante o ensaio, e que alteram o raio da amostra. Foi recomendado que o carregamento da amplitude seja aplicado de forma linear, e não em degraus, como era realizado anteriormente, conforme demonstra a Figura 8.

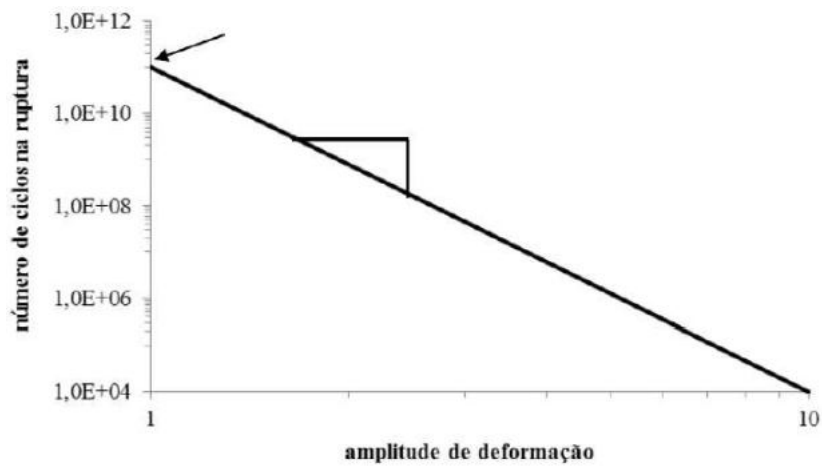
**Figura 8** - Ensaio LAS proposto por Hintz (2012)



Fonte: Pamplona (2013)

Ao final da varredura de frequência e varredura de amplitude de deformação, são obtidos os parâmetros A e B, necessários para determinar o modelo de fadiga do ligante asfáltico, representados na Figura 9.

**Figura 9** - Modelo de fadiga do ligante proposto por Jonhson (2010)



Fonte: Pamplona (2013).

O parâmetro A está relacionado integridade do ligante com relação ao dano acumulado, indicando a resistência a fadiga do ligante, e o parâmetro B, representa a sensibilidade do ligante ao nível de deformação (SOUSA NETO, 2019).

Gama (2016), indica que as misturas asfálticas e os ligantes asfálticos demonstram uma boa relação entre a carga aplicada e a vida de fadiga, podendo ser relacionado o número de

ciclos até a falha, ou vida de fadiga ( $N_f$ ), com o volume de tráfego que a mistura asfáltica suportará.

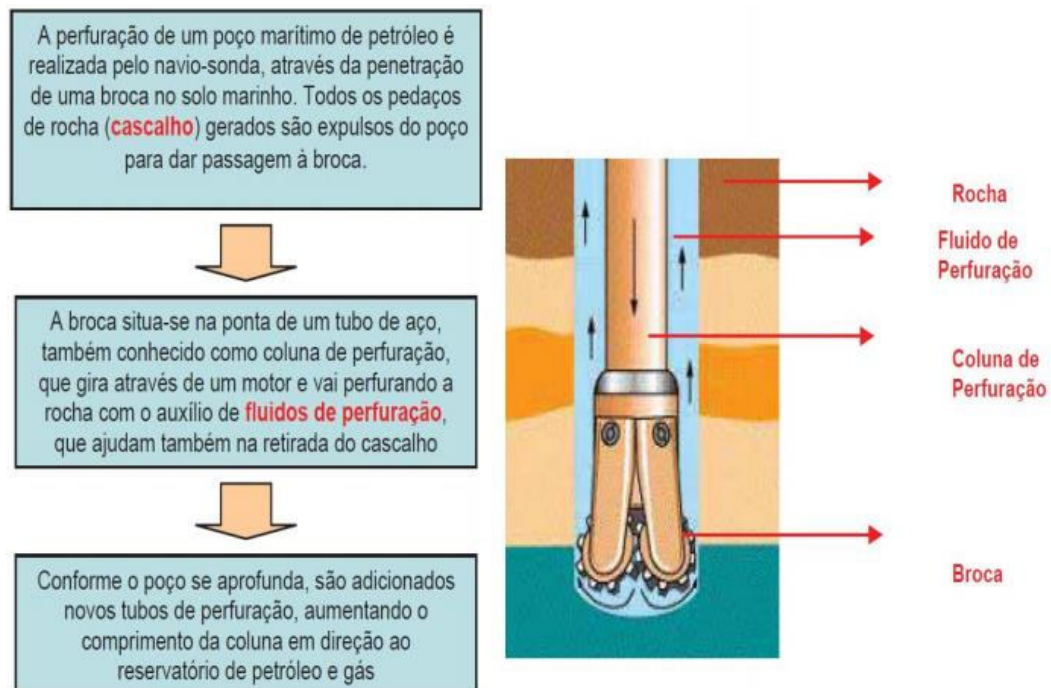
A vida de fadiga do ligante, pode ser calculado a partir dos valores determinados para os parâmetros A e B, conforme demonstrado na equação 6.

$$N_f = A * (\gamma_{máx}^B) \quad \text{Equação 6}$$

## 2.4 CASCALHO DE POÇOS DE PERFURAÇÃO DE PETRÓLEO

O cascalho de poços de perfuração de petróleo são misturas de pequenos fragmentos de rochas encharcado com o fluido utilizado na lubrificação e resfriamento da broca durante a perfuração do poço (Figura 10) (LEONARD; STEGEMANN, 2010).

Figura 10 - Esquema da perfuração de poço



Fonte: RIMA, PETROBRAS (2010)

Segundo Lucena (2008) esses fragmentos podem conter contaminantes, devido não haver uma remoção total dos fluidos impregnados nos cascalhos. Fialho (2012), afirma que a concentração presente de contaminantes, depende do fluido utilizado, da formação geológica perfurada, da fase do poço e da água utilizada na preparação dos fluidos.



Podem ser encontrados os seguintes contaminantes no cascalho de poços de perfuração de petróleo:

- a) Metais pesados;
- b) Sais solúveis;
- c) Óleos e graxas;
- d) Hidrocarbonetos;
- e) Alcalinizantes;

A composição química do cascalho de perfuração é muito variada, se apresentando de diversas formas e proporções, conforme suas características naturais e do fluido utilizado. Fialho (2012) reuniu alguns estudos que descreveram suas composições químicas expressas nos óxidos mais estáveis, e os metais pesados detectados nos cascalhos in natura e estão apresentados na Tabela 3 e Tabela 4.

**Tabela 3** - Composição química de cascalhos de perfuração

Determinações (%)	ABBE <i>et al.</i> (2009)	PIRES (2009)	MEDEIROS (2010)	LEONARD e STEGEMAN (2010)	VALORES MÉDIOS
SiO <sub>2</sub>	37,60	43,96	36,5	60,4	44,61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,54	21,48	11,5	10,4	14,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,34	5,40	4,5	4,9	5,29
BaO	11,39	2,38	N.A.	N.A.	3,44
CaO	2,78	18,12	35,3	2,5	14,68
MnO	0,17	N.A.	0,09	0,06	0,08
MgO	2,31	N.A.	N.A.	2,0	1,08
K <sub>2</sub> O	2,33	4,51	2,7	1,7	2,81
Na <sub>2</sub> O	1,17	N.A.	N.A.	2,4	0,89
TiO <sub>2</sub>	0,65	N.A.	0,81	0,6	0,52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10	N.A.	N.A.	0,1	0,05

Fonte: FIALHO, 2012, adaptada

**Tabela 4** - Metais Pesados em cascalhos de perfuração

Concentrações de metais pesados	ABBE <i>et al.</i> (2009) (ppm)	MEDEIROS (2010) (%)	LEONARD e STEGEMANN (2010) (mg/kg)
As	11,8	N.A	5
Cd	0,3	N.A	21

Cr	116,0	N.A	106
Cu	32,9	0,02	44
Ni	65,0	N.A	38
Pb	11,2	N.A	150
Zn	125,0	0,03	82
Ba	N.A	N.A	51.500
V	N.A	N.A	108
Mn	N.A	N.A	345
Sr	N.A	N.A	930

Fonte: FIALHO, 2012, adaptada

Segundo Leonard; Stegemann (2010) a administração dos resíduos gerados na perfuração dos poços de petróleo, tem sido um problema para a indústria de petróleo e gás por causa da quantidade gerada e seus contaminantes, que podem ser orgânicos e inorgânicos.

Pinto *et al.* (2017) destaca que os materiais oriundos das atividades de perfuração de poços de petróleo causam impactos ambientais, principalmente os cascalhos, devido ao grande volume produzido. Sua destinação necessita de tratamentos específicos, sendo regularizados por normas específicas.

Os dados sobre a quantidade de resíduo gerado na perfuração de poços de petróleo são bastante escassos. Nicolli; Soares (2010), consideram que um poço gera em média entre 500 e 800 m<sup>3</sup> de material resultante da trituração das rochas.

Ganghis (2009) estimou que na região nordeste do Brasil, exista uma quantidade de resíduos da ordem de 100 mil m<sup>3</sup> proveniente dos processos de perfuração de poços de petróleo, e que esse número tende a aumentar consideravelmente, tendo em vista o crescente número de poços em fase de construção.

Menezes; Paula (2015) afirmam que a acumulação desse resíduo solicita uma urgente implementação de medidas ao menos atenuadoras de seus efeitos nefastos ao meio ambiente, já que não é possível cessar sua geração.

Lucena (2008) e Bandeira (2019) estudaram a aplicabilidade do cascalho de perfuração de poços de petróleo na confecção de pavimentos. Constatou-se com os trabalhos, que a utilização do cascalho na fabricação do CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado à Quente), é uma opção para aproveitamento desse material, sendo identificado sua viabilidade técnica e ambiental, que representa uma solução para o problema causado pela disposição inadequada do cascalho de perfuração.

Medeiros (2010) analisou a incorporação do cascalho no processo de fabricação de materiais cerâmicos. Foram estudados o tijolo maciço para alvenaria, conforme a norma ABNT NBR 07170/1983, e blocos cerâmicos para alvenaria de vedação, de acordo com a norma ABNT NBR 15270-1/2005. Os resultados mostraram que utilização dos cascalhos na fabricação de material cerâmico contribui para a atenuação do problema ambiental, como também para a redução dos custos de materiais na indústria da construção civil.

## METODOLOGIA

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Ligante

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi o CAP 50/70, doado pela empresa Construtora Rocha Cavalcante, atuante na cidade de Campina Grande-PB. A amostra foi denominada de “CAP Puro” (Figura 11).

**Figura 11 - CAP Puro**



Fonte: Autor

Foi realizado a caracterização no ligante, conforme as determinações das normas brasileiras, e os resultados seguem apresentados a seguir na Tabela 5.

**Tabela 5 - Caracterização do ligante**

<b>Ensaio</b>	<b>Métodos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Especificação</b>	<b>Resultado</b>
Penetração	DNIT – ME 155/2010	0,01 mm	50 - 70	51
Ponto de Amolecimento	DNIT – ME 131/2010	°C	>46	48,75
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/2004	cP	>274	422,5
a 135 °C, SP 21, 20 rpm			>112	205
a 150 °C, SP 21, 20 rpm				

a 177 °C, SP 21, 100 rpm			57 a 285	76,5
<b>Envelhecimento a curto prazo (RTFO) a 163 °C, 85 minutos</b>				
Penetração retida, mín	NBR 6576	%	55	66,7
Aumento do ponto de amolecimento, máx	NBR 6560	°C	8	3,5
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/2004	cP		
a 135 °C, SP 21, 20 rpm			>274	587,5
a 150 °C, SP 21, 20 rpm			>112	280
a 177 °C, SP 21, 100 rpm			57 a 285	96

Fonte: Autor

É observado que os valores encontrados na caracterização do ligante, está de acordo com as exigências impostas pelo DNIT, garantindo a qualidade necessária ao material.

### 3.1.2 Resíduo de Cascalho

O resíduo de cascalho, foi fornecido pela Petrobras, proveniente da perfuração de um poço de petróleo offshore no Estado de Sergipe (poço: 4-SES-149A - profundidade de 3068m). Na perfuração do poço foi utilizado fluido de perfuração à base de parafina (Figura 12).

**Figura 12** - Resíduo de Cascalho



Fonte: Autor

A seguir, segue apresentados os dados referentes a caracterização do material, conforme as descrições das normas técnicas.

- **Massa Específica**

De acordo com a ABNT NBR NM 52, foi determinado a massa específica real do resíduo, apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6** - Massa Específica do resíduo

<b>Resíduo de Cascalho</b>	<b>Massa Específica Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>
	2,342

Fonte: Autor

- **Porcentagem de óleo e graxas do resíduo de cascalho**

A Tabela 7 apresenta o valor obtido.

**Tabela 7** - Porcentagem de ligante do resíduo de cascalho.

<b>Resíduo de Cascalho</b>	<b>Porcentagem de óleo e graxas (%)</b>
	5,4

Fonte: Autor

De acordo com o valor obtido, é observado que quanto ao aspecto toxicidade, o resíduo é classificado como tóxico, pois o teor de óleo e graxas ultrapassa o limite estabelecido pela norma, que é de 5% da massa. De acordo com a ABNT NBR 10004:2004, o resíduo de cascalho é classificado como resíduo Classe I ou perigoso, devido as características apresentadas.

- **Teor de umidade higroscópica do resíduo de cascalho**

O valor do teor de umidade higroscópica, obtido para a amostra de resíduo de cascalho utilizado na pesquisa, foi de 22,35% (Tabela 8).

**Tabela 8** - Umidade higroscópica do resíduo de cascalho.

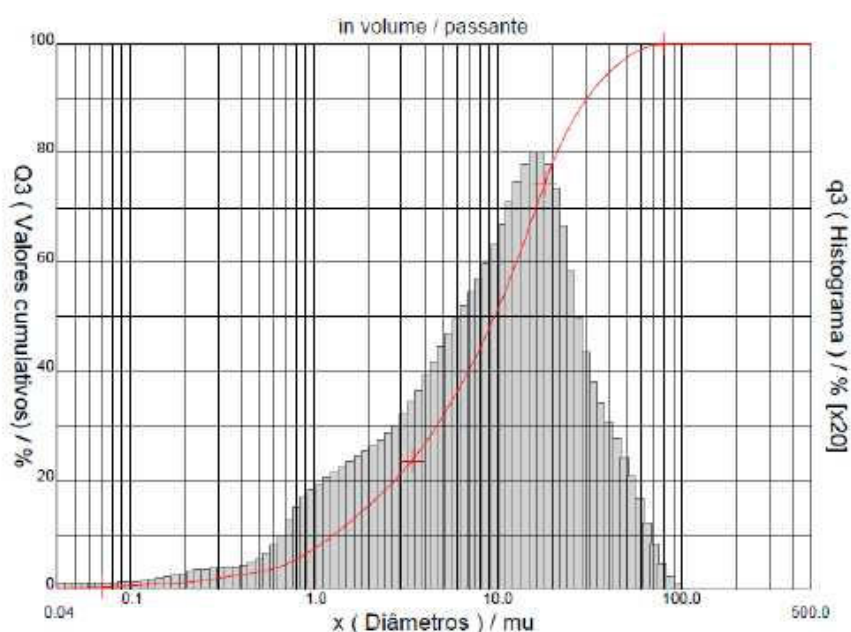
Cápsula	h (%)	h (%) média
AL - 11	22,34	22,35
AL - 12	22,36	

Fonte: Autor

- **Análise granulométrica do resíduo de cascalho**

A distribuição dos tamanhos das partículas do resíduo de cascalho foi obtida por meio do aparelho analisador de partículas por difração a laser. A Figura 13 ilustra a curva de distribuição granulométrica por difração a laser do Resíduo de cascalho.

**Figura 13** - Curvas Distribuição granulométrica por difração a laser do Resíduo de cascalho



Fonte: Autor

De acordo com o comportamento obtido para distribuição granulométrica do Resíduo de cascalho, é observado que a curva granulométrica apresentou comportamento modal com diâmetro médio de 13,28  $\mu\text{m}$ , com D10 de 1,28  $\mu\text{m}$ , D50 de 9,58  $\mu\text{m}$  e D90 de 30,37  $\mu\text{m}$ . Para este resíduo de cascalho não existe partículas superiores a 100  $\mu\text{m}$ .

- **Análise Química do Resíduo de cascalho de Petróleo**

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos a partir da análise química do resíduo de cascalho.

**Tabela 9** - Composição química do Resíduo de cascalho.

Amostras	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	BaO	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Outros
RC	58,43	17,06	7,01	5,73	3,26	2,52	2,23	1,82	1,60	0,27

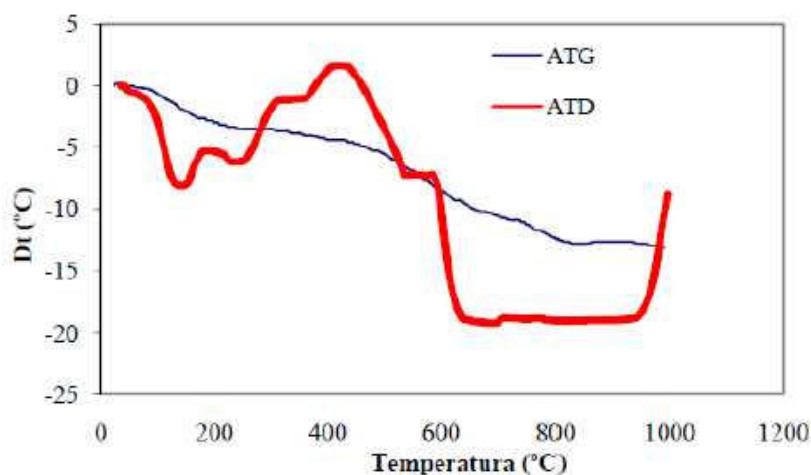
Fonte: Autor

Observa-se que o resíduo de cascalho de Petróleo é constituído basicamente por: Óxido de Silício (58,4%), Óxido de Alumínio (17%), Óxido de Ferro (7%), Óxido de Cálcio (5,7%), óxido de Bário (3,2%) e baixos teores de Óxidos de Enxofre, Magnésio, Potássio e Titânio). A composição química obtida para o resíduo de cascalho classifica-o como sendo um complexo sílico aluminoso. O material apresentou semelhanças com os resultados obtidos por Fialho (2012) e destaca-se uma maior porcentagem de Óxido de Silício no resíduo utilizado nesta pesquisa.

- **Análise Térmica Diferencial (DTA) e Termogravimétrica (TG) do resíduo de cascalho de petróleo**

A Figura 14 ilustra os resultados da DTA e TG para o resíduo de cascalho de petróleo.

**Figura 14** - Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG) do resíduo de cascalho.



Fonte: Autor



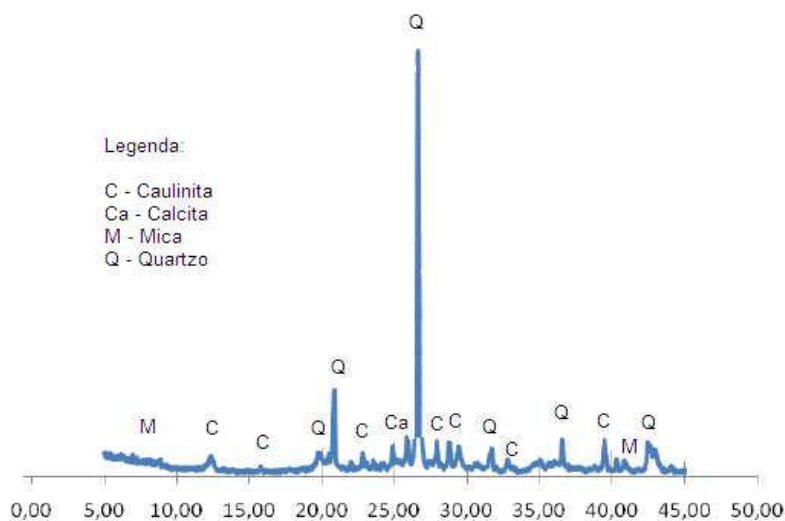
Analisando as curvas de DTA e TG do resíduo de cascalho de petróleo, observa-se a presença de um pico endotérmico em torno de 190°, correspondente a presença de água livre e adsorvida no material; pico exotérmico em torno de 320°C, correspondente à combustão de matéria orgânica; pico exotérmico a aproximadamente 412°C, correspondente a transformação do quartzo alfa para quartzo beta

Na TG ocorreu uma perda de massa de 3,75% entre 25°C e 225°C, e de 8,25% entre 300°C e 850°C. Totalizando uma perda de massa de 12%.

- **Difração de Raio-x do Resíduo de cascalho de Petróleo.**

A Figura 15 ilustra o difratograma de raio-x para o Resíduo de cascalho de Petróleo.

**Figura 15** - Difratograma de raios-x do Resíduo de cascalho.



Fonte: Autor

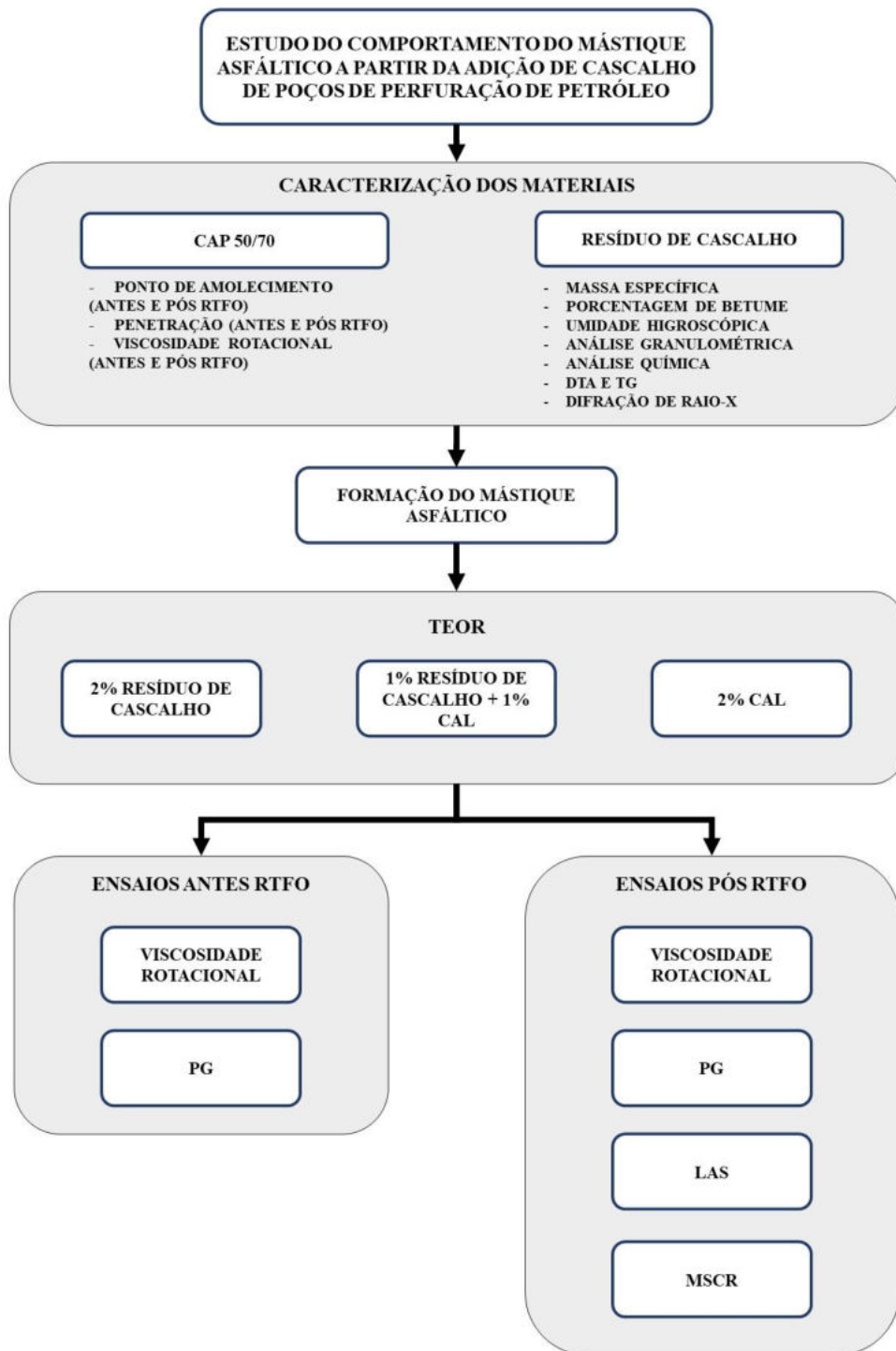
Observa-se na Figura 15, que as fases mineralógicas presentes no Resíduo de cascalho de Petróleo são: quartzo, calcita, mica e caulinita.

### 3.2 MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentadas as etapas realizadas durante a pesquisa. A Figura 16 apresenta o fluxograma com a sequência de atividades do presente trabalho. Inicialmente foi realizada a formação do mástique asfáltico a partir da adição dos filler, resíduo de cascalho e a

cal, ao CAP 50/70 nos teores descritos no trabalho de Carvalho (2021), que são as proporções filer/CAP de, 38% de resíduo de cascalho, 19% de resíduo de cascalho + 19% da cal, e 38% da cal. Após a formação dos três teores do mástique asfáltico, foi realizado os ensaios reológicos.

**Figura 16** - Fluxograma das atividades.



Fonte: Autor

### 3.2.1 Formação do mástique asfáltico

A formação dos mástiques asfálticos consistiu na mistura do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 com o filer resíduo de cascalho, em três teores. Para a realização das misturas foi usado um agitador mecânico produzido pela SoloTest, conforme mostra a Figura 17.

**Figura 17** - Misturador mecânico



Fonte: Autor.

O ligante, sem adição do filer, foi colocado no misturador mecânico e aquecido até a temperatura de  $160 \pm 5$  °C. O material foi agitado pelas hélices do aparelho a 8000 rpm durante 60 minutos afim de garantir a homogeneidade da mistura sendo incorporado lentamente a porcentagem de filer de cada teor pré-estabelecido. Na Figura 18 é mostrado o processo da mistura.

**Figura 18** - Processo de formação do mástique asfáltico



Fonte: Autor.

### 3.2.2 *Ensaio Reológicos*

Os parâmetros reológicos para o ligante puro e os mástiques asfálticos foram determinados por meio do equipamento DSR da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1) do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), apresentado na Figura 19.

**Figura 19** - Reômetro de cisalhamento direto (DSR)



Fonte: Autor.

### 3.2.3 *Viscosidade Rotacional*

O ensaio foi orientado pela norma NBR 15184/2004, que estabelece a utilização de um cilindro com ranhuras padronizadas (spindle) dentro de uma cubeta com 8 gramas de ligante, ligado a uma haste, que efetua um torque, a fim de determinar a medida da resistência da amostra em relação à haste, sobre as condições de 135°C, 150°C e 177°C, a 20, 50 e 100 rpm, respectivamente. O viscosímetro utilizado foi o Brookfield, modelo DV-III ULTRA, ligado a um controlador de temperatura, apresentado na Figura 20.

**Figura 20** - Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III ULTRA.



Fonte: Autor.

### 3.2.4 Grau de Desempenho (PG)

Para a realização do ensaio, foi confeccionado amostras com 25mm de diâmetro e 1 mm de espessura, de ligante asfáltico e mástique asfáltico, antes e pós envelhecimento em estufa a curto prazo (RTFO).

O procedimento do ensaio consistiu na variação de temperatura partindo de 46°C com intervalos de 6°C, determinando para cada intervalo o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , que não deve possuir valores menores que 1,00 kPa para ligantes que não envelhecidos, e não devem possuir valores menores que 2,20 kPa para ligantes envelhecidos a curto prazo em estufa RTFO. Ao atingir valores menores que os limites impostos pela norma para o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , o ensaio era finalizado.

Este ensaio permite também analisar o índice de envelhecimento (AI) nas amostras envelhecidas a curto prazo em RTFO por meio do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  como avaliação do comportamento do ligante, possibilitando mostrar a susceptibilidade do material ao envelhecimento (AZAHAR *et al.*, 2016). O AI pode ser obtido pela Equação 7:

$$AI = \frac{G^*/\sin\delta \text{ (pós - RTFO)}}{G^*/\sin\delta \text{ (antes RTFO)}} \quad \text{Equação 7}$$

### 3.2.5 Fluência e recuperação sob tensões múltiplas - MSCR

Para a realização do ensaio, foi confeccionado amostras com 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura do ligante puro e dos mástiques asfálticos, envelhecidos a curto prazo em estufa RTFO. A temperatura do ensaio é determinada pelo valor encontrado no ensaio de PG. As orientações do ensaio são dadas pela norma DNIT 423/2020 – ME.

Para execução do ensaio, foram realizados ciclos de tensão afim de verificar os parâmetros  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_{10}$ , da curva de deformação versus tempo. Inicialmente, foram realizados 10 ciclos para tensão de baixa (100 Pa), e posteriormente, 10 ciclos para tensão de alta (3200 Pa).

Com os valores foram calculados a porcentagem de recuperação elástica (%R), compliância não recuperável (Jnr) e sensibilidade a níveis de deformações (Jnr diff).

### 3.2.6 Varredura de amplitude linear – LAS

Para a realização do ensaio, foi confeccionado amostras com 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura do ligante puro e dos mástiques asfálticos, envelhecidos a curto prazo em estufa RTFO. As orientações do ensaio foi a norma AASHTO TP 101 (2012) onde se determina que as amostras devem ser envelhecidas em RTFO e PAV para realização deste ensaio, porém, devido às limitações do laboratório, o ensaio foi realizado apenas para as amostras envelhecidas em RTFO.

O teste analisa uma série de ciclos de carga que aumenta a amplitude de deformação sob frequência constante de maneira sistemática. Para este ensaio as amostras confeccionadas possuíam 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, envelhecidas em RTFO. Para a execução do teste a geometria de reômetro precisou ser aquecida a 56°C para garantir a aderência da amostra. Para uso deste ensaio foi necessário que as amostras no DSR fossem resfriadas à temperatura de 25°C, essa foi determinada com base nos estudos de Hintz (2013) e Nascimento (2015) que usaram ligantes de classificação do PG semelhantes ao do presente estudo.

Este ensaio foi realizado em duas etapas: a primeira foi uma varredura de frequência para analisar as propriedades reológicas das amostras, executadas na temperatura de 25°C,

deformação controlada de 0,1% e com uma varredura de frequência variando entre 0,2 a 30 Hz. A segunda etapa foi uma varredura de amplitude para mensurar o dano sofrido pela amostra, para isso foram aplicados pequenos torques sob uma frequência de 10 Hz. O carregamento da amostra foi adicionado de maneira que pudesse garantir uma deformação variando 0 até 30%. A cada ciclo 10 ciclos de carga foram gravados cada valor de tensão de cisalhamento aplicada, bem como os valores de ângulo de fase e módulo complexo.



## RESULTADOS E DISCUSSÕES

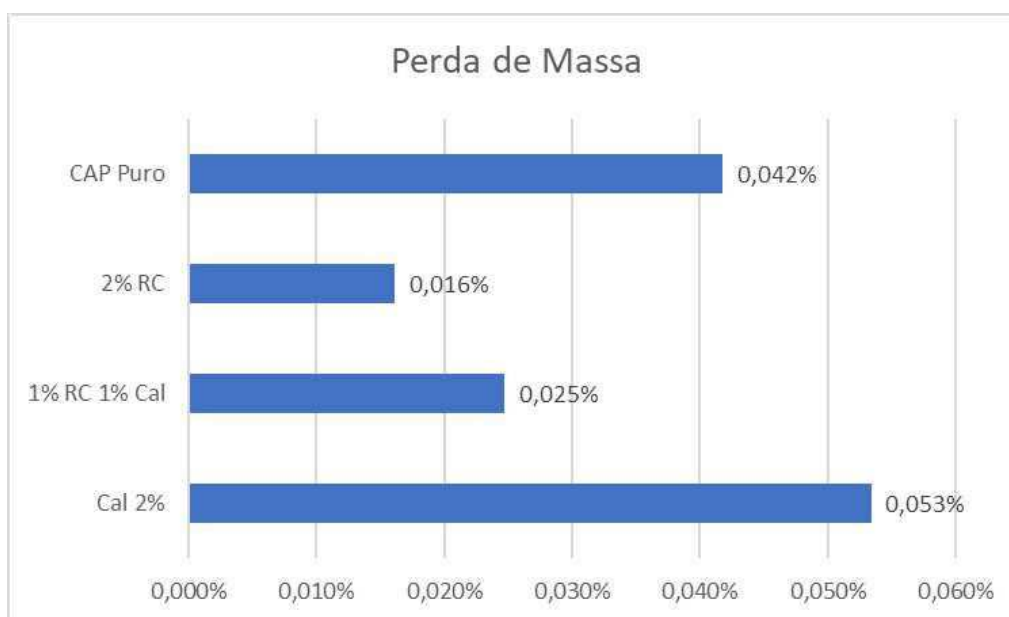
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios reológicos para os ligantes asfálticos puro, e o mástique asfáltico segundo os três teores indicados na a fase experimental desta pesquisa.

Diante do texto, será atribuído a abreviação “RC” para o resíduo de cascalho.

### 4.1 ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO

A Figura 21 ilustra os resultados obtidos a partir das variações de perda de massa do ligantes puro e os mástiques asfálticos, após o procedimento de envelhecimento à curto prazo em estufa RTFO.

Figura 21 - Perda de massa RTFO



Fonte: Autor.

Segundo Dehoushe *et al.*, (2012) o envelhecimento dos ligantes asfálticos ocorrem normalmente devido as reações de oxidação e volatilização. Cravo (2016) explica que a perda de massa do ligante é o resultado de quanto o material sofreu o efeito da ação do calor e do ar aplicados no processo, ao ponto de causar a degradação e redução da matéria presente, e que subentende em alterações na composição e nas propriedades reológicas do material, como o aumento de sua viscosidade e rigidez.

Os valores obtidos estão de acordo com os limites indicados pela norma DNIT- ME 095/2006 para o CAP 50/70, que impõe variações de perda massa inferiores a 0,5%. Foi observado que os mástiques asfálticos com a presença do resíduo de cascalho (RC) tiveram uma menor perda de massa no processo de envelhecimento.

Marinho Filho (2017) afirma que a redução da perda de massa do ligante significa dizer que este volatilizou menos seus componentes, e que perdeu menos propriedades viscoelásticas e provavelmente poderá resistir mais ao enrijecimento na medida em que envelhece, provocando uma maior durabilidade à deformações permanentes e à fadiga do pavimento. Dessa maneira, os resultados indicaram que a adição do resíduo de cascalho proporcionou uma menor perda de massa.

#### 4.2 VISCOSIDADE ROTACIONAL

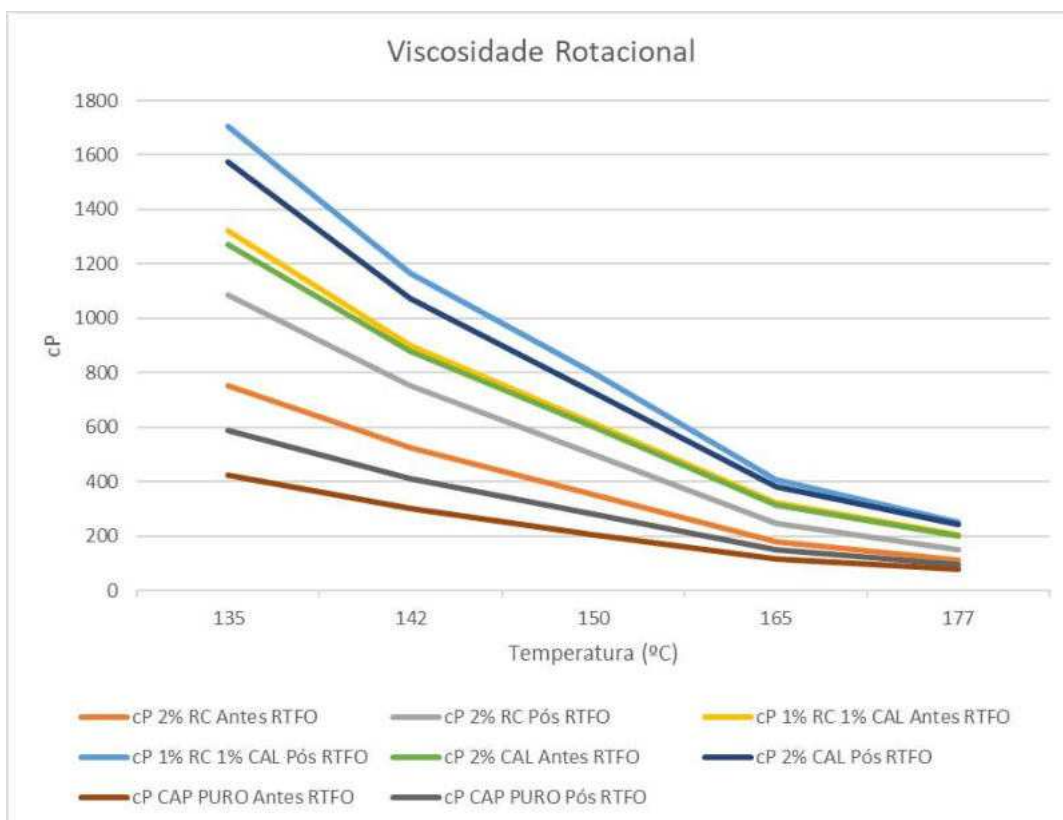
Na Tabela 10 e na Figura 22, são apresentados os resultados obtidos para as viscosidades rotacionais do ligante puro e os mástiques asfálticos, respectivamente, antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo em estufa RTFO.

**Tabela 10** - Viscosidade Rotacional

°C	cP							
	2% RC		1% RC 1% CAL		2% CAL		CAP PURO	
	Antes RTFO	Pós RTFO	Antes RTFO	Pós RTFO	Antes RTFO	Pós RTFO	Antes RTFO	Pós RTFO
<b>135</b>	751	1087	1321	1705	1271	1575	422	587
<b>142</b>	523	753	902	1164	880	1074	301	409
<b>150</b>	351	501	615	797	601	726	205	280
<b>165</b>	180	249	323	408	315	381	116	149
<b>177</b>	112	151	204	251	202	240	76	96

Fonte: Autor.

Figura 22 - Viscosidade Rotacional



Fonte: Autor.

A partir da análise dos resultados é observado uma tendência dos mástiques asfálticos com o uso da cal apresentarem maiores valores de viscosidade, indicando com isso, maiores rigidez nesses materiais.

Segundo Motta & Leite (2000) o filer com menor granulometria apresenta maior rigidez nos mástiques asfálticos por conta da melhor incorporação do agregado fino ao ligante asfáltico.

Oliveira (2015) afirma que a utilização de mástiques asfálticos muito rígidos podem ser indicados para determinados tipos de pavimentos e situações, porém, uma rigidez excessivamente elevada provoca uma mistura altamente frágil e quebradiça, o que resulta num mau desempenho nos pavimentos a baixa temperatura.

Gama (2016) indica que os ligantes asfálticos com viscosidades baixas demais podem provocar o escorregamento da mistura asfáltica quando compactada pela ação dos rolos compactadores.

De acordo com a metodologia SUPERPAVE, existe um valor de viscosidade ideal para as misturas asfálticas, na qual, permite que o ligante asfáltico seja capaz de envolver todos os agregados. Dessa maneira, é necessário definir as Temperaturas de Usinagem – TU e Temperaturas de Compactação – TC.

Na Tabela 11 é apresentados os valores determinados para as TU's e TC's. Estes valores foram obtidos por um método tradicional que determina uma TU na qual o ligante tenha uma viscosidade rotacional de  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s e uma TC na qual apresente viscosidade rotacional de  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s.

**Tabela 11** - Temperaturas de Usinagem e Compactação

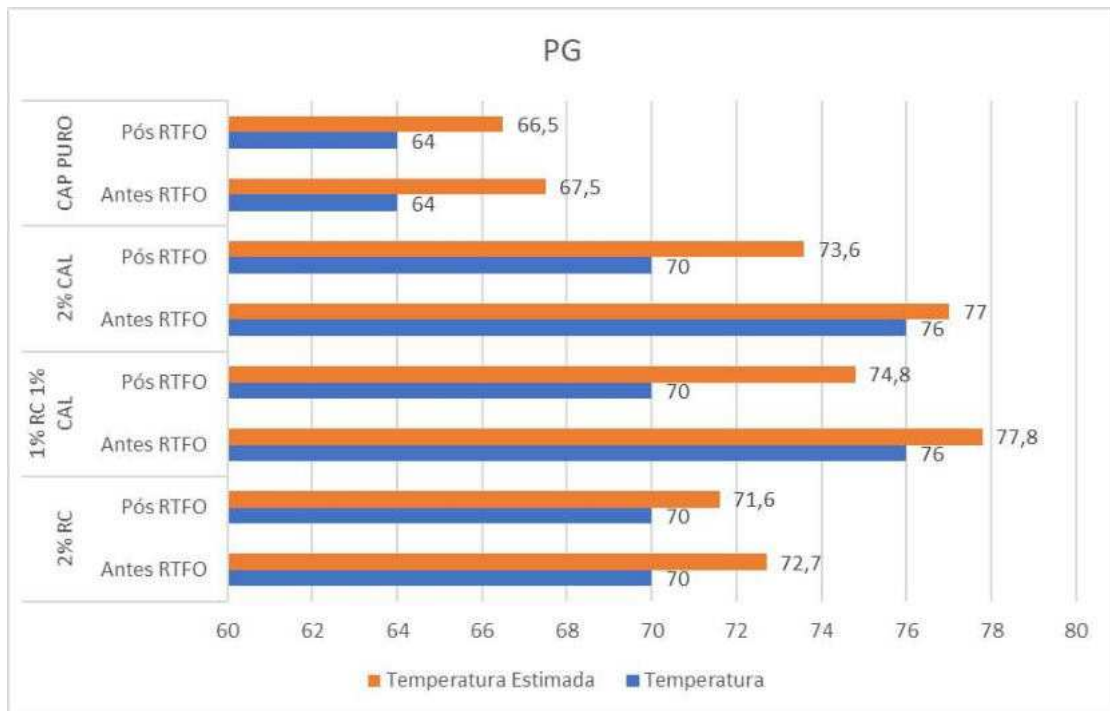
	<b>Temperaturas de Usinagem e Compactação</b>					
	Usinagem °C			Compactação °C		
	Intervalo		Valor Médio	Intervalo		Valor Médio
<b>CAP PURO</b>	163	158	161	151	143	147
<b>2% RC</b>	170	167	168	163	159	161
<b>1% RC 1% CAL</b>	175	173	174	171	168	169
<b>2% CAL</b>	175	173	174	170	168	169

Fonte: Autor.

### 4.3 GRAU DE DESEMPENHO – PG

Na Figura 23 são apresentados os resultados das temperaturas de PG do ligante asfáltico e dos mástiques asfálticos avaliados. São apresentadas também as temperaturas estimadas de falha dos ligantes, definida como a temperatura na qual o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  atinge um valor menor que 1,0 kPa antes do processo de envelhecimento a curto prazo e um valor de 2,2 kPa após esse processo, conforme indicações da especificação SUPERPAVE.

**Figura 23 - Grau de Desempenho (PG)**



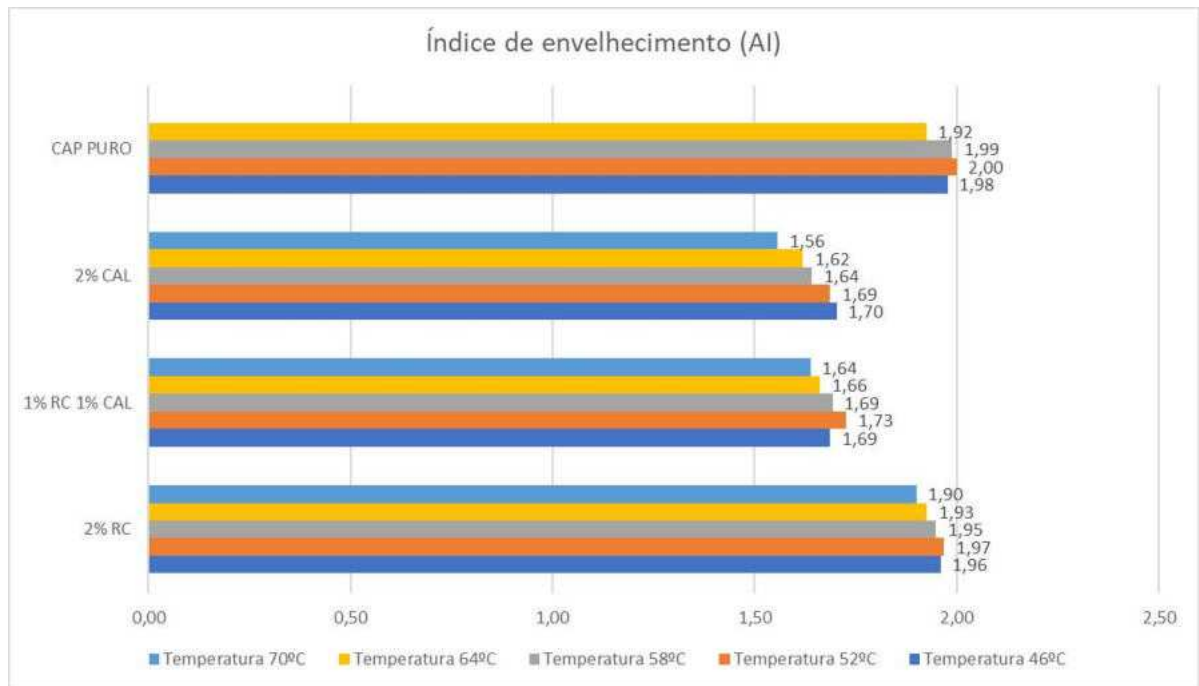
Fonte: Autor.

É observado que o acréscimo do filer, para a formação dos mástiques asfálticos, provocou aumento nas temperaturas de PG, e que esse aumento foi acentuado quando foi utilizado a cal como filer. Outro ponto observado, é que o processo de envelhecimento a curto prazo diminuiu em maior escala as temperaturas PG dos mástiques que utilizado a cal como filer, porém, esse valor ainda é superior aos valores obtidos com o CAP puro e o mástique asfáltico formado somente com o resíduo de cascalho.

Bardini (2012) observou em seus resultados que o efeito de enrijecimento dos mástiques asfálticos formados a partir da cal, é por conta da interação físico-química, devido à forma das partículas e à textura superficial da cal, que representa um grande potencial de atividade com o ligante.

A Figura 24 apresenta os valores do índice de envelhecimento (aging index – AI) obtidos a partir da relação entre os parâmetros  $G^*/\text{sen}\delta$  dos ligantes antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo pela estufa RTFO, conferindo o resultado para todas as temperaturas realizadas no ensaio que o ligante apresentou resistência superior a requerida.

**Figura 24 - Índice de envelhecimento**



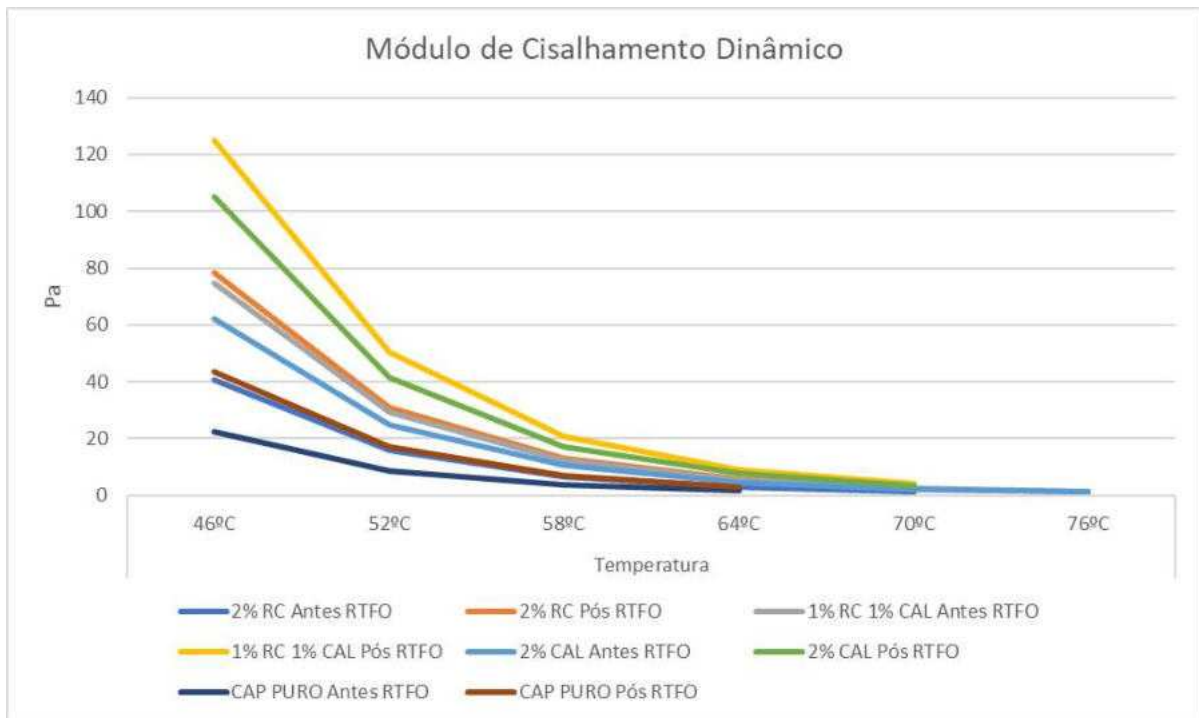
Fonte: Autor.

Analisando os resultados, é destacado que os mástiques asfálticos que foi utilizado a cal como filer, apresentam menores valores de AI quando comparados com o CAP puro, e este fato se relaciona com os valores obtidos pela perda de massa após o envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO. O mástique asfáltico que foi utilizado o resíduo de cascalho como filer, obteve valores similares ao CAP puro.

Os resultados obtidos corroboram com as afirmações de Cravo (2016), na qual, a participação do filer no mástique, retarda o processo degradativo, e este efeito pode ser explicado pelo fato de que a presença do filer no ligante pode criar uma barreira física entre a propagação das reações de oxidação.

A Figura 25 ilustra o comportamento do módulo complexo de cisalhamento dinâmico no ligante puro e os mástiques asfálticos, antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO.

**Figura 25** - Módulo de cisalhamento dinâmico



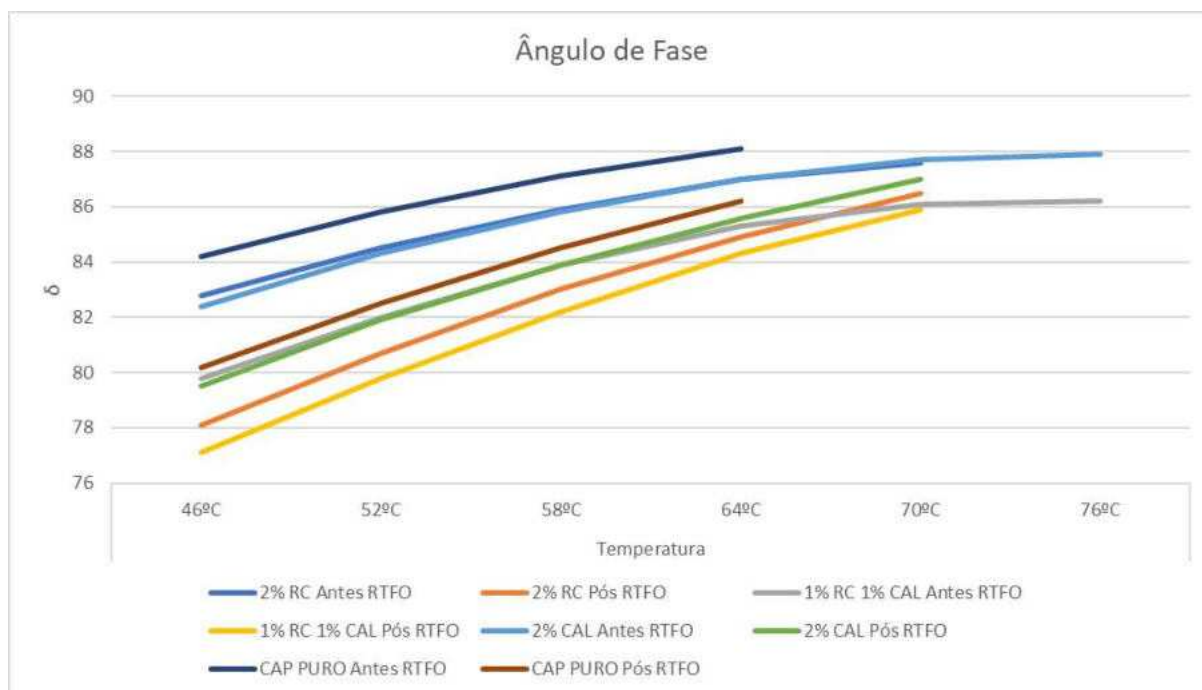
Fonte: Autor.

Notou-se, que a presença do filer no ligante asfáltico provocou um aumento no módulo complexo de cisalhamento dinâmico, sendo este, um indicador de resistência à deformação em termos da elasticidade do ligante.

Observa-se também, que o envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO, ocasionou uma variação na rigidez, e que este valor foi maior nos mástiques asfálticos que utilizou a cal como filer.

Na Figura 26 são apresentados os resultados obtidos para o ângulo de fase para o ligante puro e os mástiques asfálticos, antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO.

**Figura 26 - Ângulo de fase**



Fonte: Autor.

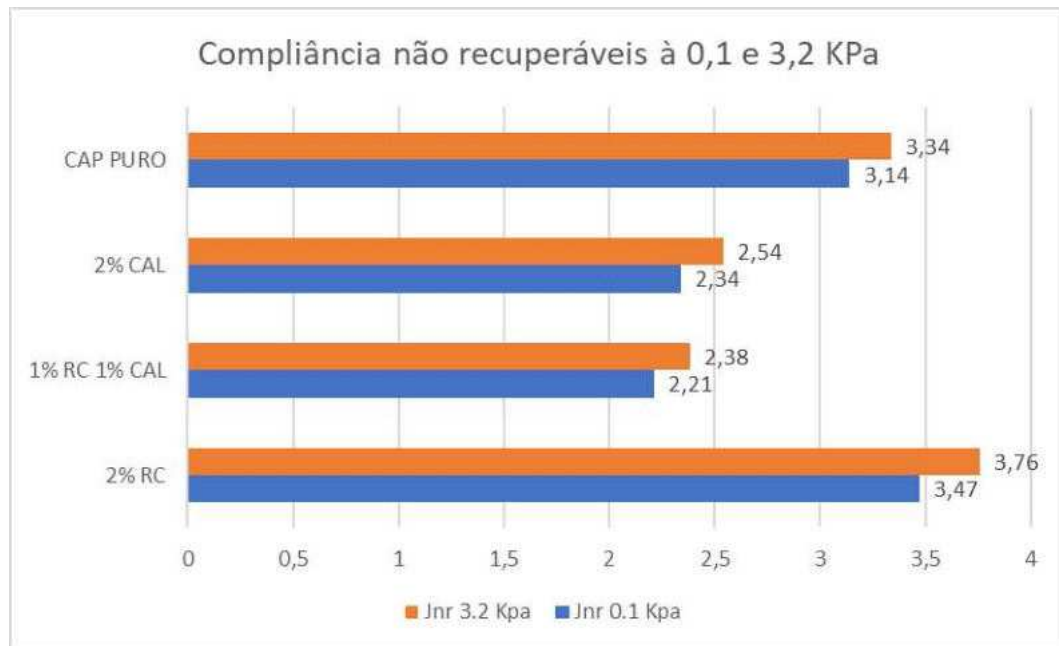
Na Figura 26 observa-se que o mástique formado com cal e resíduo de cascalho teve a melhor resposta elástica, seguido pelo mástique formado apenas com resíduo, e em ambos os casos, os materiais após o envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO. Considera-se que a aproximação dos ângulos de fase com 90° significa que o ligante é viscoso e com pouca, ou nenhuma, elasticidade.

#### **4.4 FLUÊNCIA E RECUPERAÇÃO SOB TENSÕES MÚLTIPLAS – MSCR**

Os resultados obtidos por meio do ensaio para o parâmetro de compliância não recuperável ( $J_{nr}$ ), para o ligante puro e os mástiques asfálticos após o procedimento de envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO, seguem representados na Figura 27.



Figura 27 - Compliância não recuperável



Fonte: Autor.

Analisando a Figura 27 observa-se que houve uma redução na compliância não recuperável dos mástiques asfálticos que foi utilizado a cal como filer, e um acréscimo na compliância não recuperável dos mástiques asfálticos que foi utilizado apenas o resíduo de cascalho como filer. Em ambas as comparações, estão relacionadas com o valor obtido para o ligante puro.

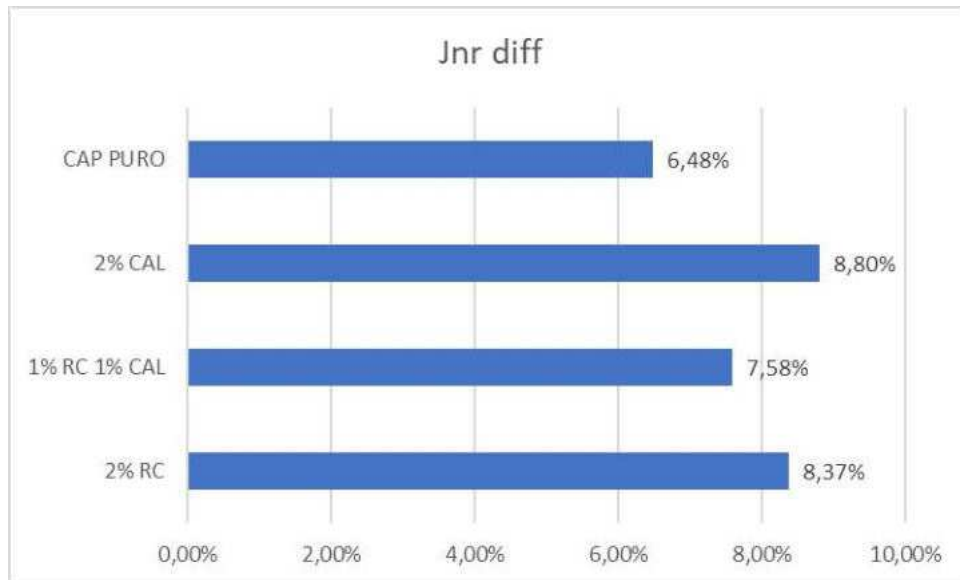
Segundo D'angelo *et al.*, (2007) o parâmetro Jnr é usado na análise das propriedades reológicas dos ligantes modificados submetidos à altas temperaturas, associando este parâmetro à deformação permanente do ligante. Domingos *et al.*, (2013) confirma que o ensaio de MSCR é reconhecido pela avaliação de aumentos significativos na suscetibilidade à deformação permanente. Com isso, o mástique com 1% de resíduo e 1% de cal possui o melhor indicativo de resistência à deformação permanente.

A partir da indicação da norma AASHTO M320 (2016), onde é possível relacionar o valor do parâmetro Jnr à 3,2 KPa com o suporte para volume de tráfego, conforme apresentado na Tabela 1, é verificado que em todos os materiais se enquadram na faixa de suporte para tráfego padrão (S), que é o intervalo de 2,0 KPa a 4,0 KPa.

Para Sobreiro (2014) existe à diferença percentual entre as compliância não-recuperáveis a 0,1 KPa e a 3,2 KPa chamado de Jnr,diff. O limite para esse parâmetro é 75%, pois assim, é possível garantir que o material não possua muita sensibilidade às mudanças nos

níveis de tensão e com isso, ser mais propenso ao aparecimento de deformações permanentes. Logo, na Figura 28 é apresentado os valores para esse parâmetro.

**Figura 28** - Diferença percentual - Jnr,diff



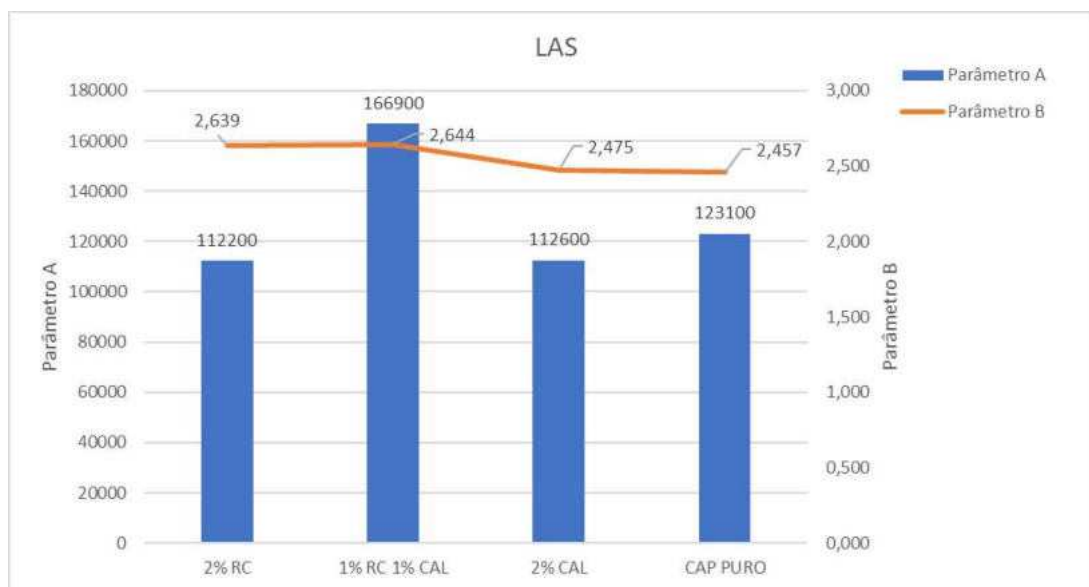
Fonte: Autor.

Os resultados mostraram valores bem distante do limite sugerido, onde os mástiques apresentaram valores superiores ao ligante asfáltico de referência.

#### **4.5 VARREDURA LINEAR DE AMPLITUDE DE DEFORMAÇÃO – LAS**

Na Figura 29 estão apresentados os resultados do parâmetro “A” e parâmetro “B” obtidos nas amostras ensaiadas.

**Figura 29** - Valores dos parâmetros "A" e "B"



Fonte: Autor.

Luz (2019) afirma que o parâmetro “A” está relacionado à mudança da integridade do material provocada pelo dano acumulado, e que a quantificação maior desse valor significa dizer que a amostra manteve sua integridade inicial. Analisando os resultados descritos na Figura 30 é observado que o mástique asfáltico formado com o Resíduo de cascalho e a cal, apresentou o maior valor para o parâmetro “A” em relação ao valor obtido para o ligante puro, um aumento de 35,6%, indicando aumento de resistência ao dano. É observado também, que os mástiques asfálticos formados com apenas resíduo de cascalho ou apenas cal, apresentaram valores inferiores para este parâmetro, que o CAP Puro.

Segundo Sousa Neto (2019), o parâmetro “B” está relacionado unicamente ao valor de  $\alpha$ , que é determinado com base na inclinação do gráfico do módulo de armazenamento ( $G^* \cdot \cos \delta$ ) versus a frequência, durante a varredura de frequências. Kodrat *et al.*, (2007) afirma que maiores valores absolutos do parâmetro “B” indicam que a vida de fadiga do material decresce a uma taxa maior quando a amplitude de deformação aumenta, assim como, menores valores absolutos do parâmetro “B” indicam que a vida de fadiga do ligante decresce a uma taxa menor quando a amplitude de deformação aumenta. Para os resultados descritos na Figura 30, é observado que houve pequenas variações para este parâmetro, indicando que a sensibilidade aos níveis de deformação aplicada apresentou um comportamento praticamente constante em todas as amostras ensaiadas.

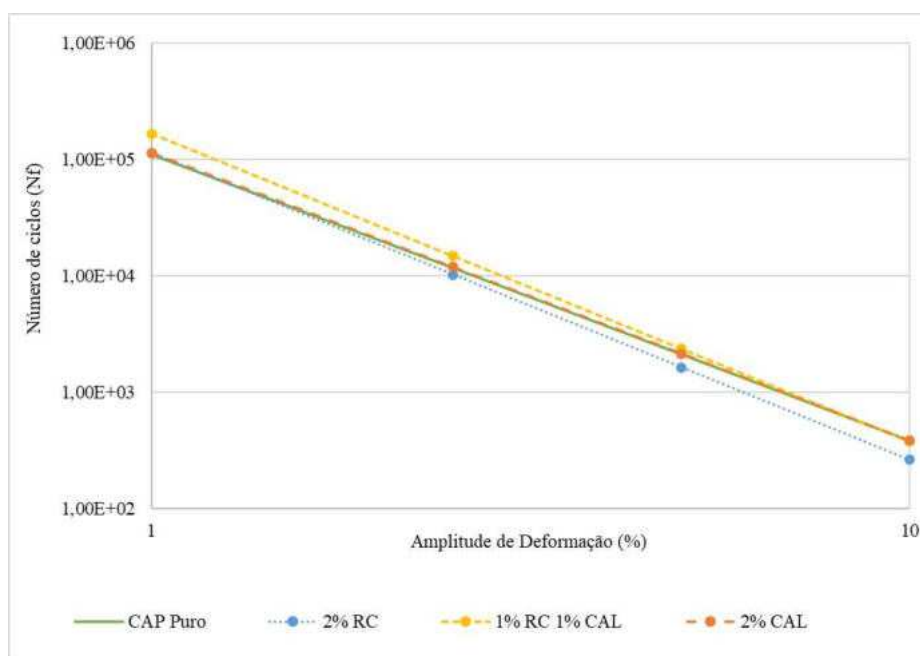
A partir do princípio do dano contínuo viscoelástico (VECD) é possível construir um modelo de fadiga que demonstra o comportamento do ligante asfáltico com relação ao dano em

temperaturas intermediárias, para uma ampla faixa de deformações e de ciclos de carregamentos (HINTZ, 2012).

Sobreiro (2014) afirma que o número de ciclos até a falha (Nf) indica o volume de tráfego que o material suportaria, em função da deformação aplicada, e esta deformação está vinculado às condições em que os materiais poderiam ser submetidos em termos de estrutura do pavimento.

Na Figura 30 é apresentado os gráficos de vida de fadiga (Nf) em função da amplitude de deformação para as amostras ensaiadas.

**Figura 30** - Número de ciclos até a falha

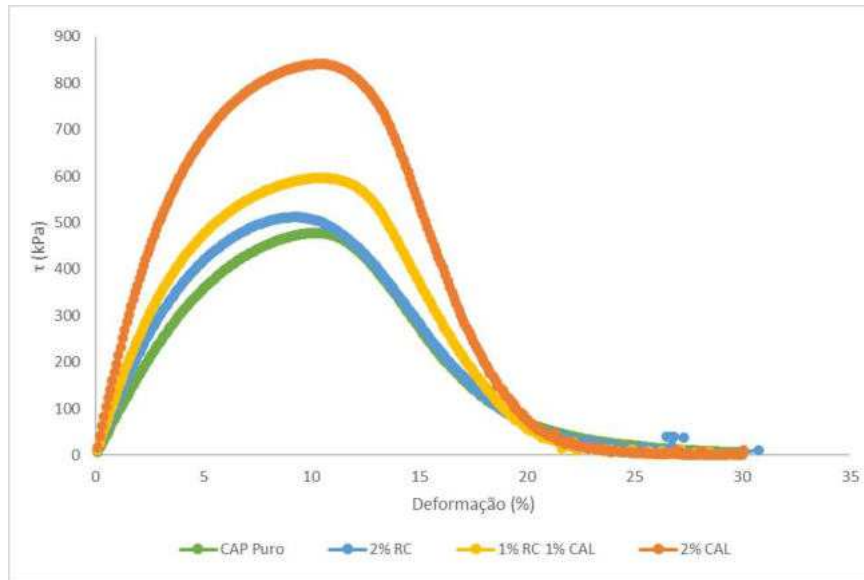


Fonte: Autor.

Analisando os resultados descritos na Figura 30 é observado que o mástique asfáltico formado com o Resíduo de cascalho e a cal, apresenta curva de fadiga superior em boa parte das amplitudes de deformação em relação a curva de fadiga obtida para o CAP Puro, e que nas maiores amplitudes de deformação, essas curvas tendem a se aproximarem. Verifica-se também que a curva de fadiga do mástique asfáltico formado apenas com a cal, apresentou comportamento similar a curva de fadiga do CAP Puro. A curva de fadiga do mástique asfáltico formado apenas com resíduo de cascalho, apresentou similaridade com a curva de fadiga do CAP Puro nas baixas amplitudes de deformação, e foi menor nas maiores amplitudes de deformação.

Na Figura 31 é apresentado os dados de tensão de cisalhamento versus deformação obtidos por meio do ensaio de varredura de amplitude das amostras ensaiadas.

**Figura 31** - Curvas de tensão x deformação



Fonte: Autor.

A partir da análise das curvas, é verificado que todos os mástiques asfálticos obtiveram alcances maiores das tensões de cisalhamento que o valor obtido para o CAP Puro. Observa-se também que os mástiques asfálticos, formado com o Resíduo de cascalho e a cal, e formado apenas com a cal, apresentaram picos projetados para a direita do que o CAP Puro, indicando que os ligantes suportam maior tensão e deformação.

Pela observação dos aspectos analisados de todos os resultados obtidos, é verificado que o mástique asfáltico formado a com o Resíduo de cascalho e a cal, apresenta o melhor conjunto de propriedades reológicas entre as amostras ensaiadas, indicando um desempenho superior deste material.

## CONCLUSÕES

Entender o comportamento e as interações dos materiais presentes no pavimento asfáltico é uma das maneiras relevantes para desenvolver uma estrutura que apresente conforto e segurança aos usuários. O estudo do comportamento do mástique asfáltico, permite compreender as interações que filer dispõe no ligante e, conseqüentemente, na mistura asfáltica, podendo ajudar a prever o desempenho do pavimento.

Associar um estudo com mástique asfáltico a um material que é visto como uma possibilidade de utilização nos pavimentos, garante que, exista uma maior confiabilidade nesta hipótese, indicando melhor o desempenho do material.

Desta maneira, os resultados reológicos atribuídos ao mástique asfáltico formado apenas com o resíduo de cascalho, indica que a incorporação deste filer, provoca ao ligante um aumento na viscosidade e no módulo complexo, refletindo em uma menor susceptibilidade a variação de temperatura, e conseqüentemente, uma maior resistência à deformação permanente. Também foi interpretado, que a incorporação do resíduo de cascalho provocou uma redução à resistência ao dano e uma menor vida de fadiga ao ligante nas maiores amplitudes de deformação.

Avaliando o efeito do envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO, foi verificado que a incorporação do resíduo de cascalho no ligante asfáltico, não modifica a temperatura de falha no grau de desempenho (PG) após o envelhecimento, e o índice de envelhecimento (AI) apresenta valores semelhantes aos obtidos para o CAP puro.

Nesta pesquisa, também foi avaliado as propriedades reológicas dos mástiques asfálticos formados com a cal, sendo verificado que está incorporação é benéfica para o ligante, aumentando o módulo complexo e reduzindo o ângulo de fase, conforme é indicado pela bibliografia. Para essas amostras, foi constatado que houve redução no índice de envelhecimento (AI) do ligante, indicando que a interação deste filer mineral com o ligante, reduz as reações que provocam o envelhecimento.

Por fim, é destacado que a incorporação conjunta do resíduo de cascalho e da cal, proporcionou ao material o melhor desempenho reológico, indicando uma possível relação favorável desses materiais ao ligante asfáltico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASUKAR, S. D.; BEHL, A.; GUNDALIYA, P. J. **Utilization of Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder**. International journal of innovative research in technology, IJIRT, v. 2, n. 12, p. 198-207, 2016.

\_\_\_\_\_. AASHTO M 320: Standard specification for performance-graded Asphalt Binder. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2010.

\_\_\_\_\_. AASHTO TP 101: Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. Washington, DC. 2012.

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

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

AMARAL, Larissa Ramos de. **Comportamento De Mástiques Asfálticos A Partir Da Adição De Diferentes Fíleres**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

ANDERSON, D. A., BAHIA, H. U., & DONGRE, R. (1992). **Rheological Properties of Mineral filler-Asphalt Mixtures**. Association of Asphalt Paving Technologists, 42, 37-66.

BAHIA, H. U. **Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design**. NCHRP Report 459. Transportation Research Board, Washington, D.C. 2001.

BANDEIRA, Angélica Rafaely. **Uso de cascalho de perfuração de poços de petróleo na confecção de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente)**. 2019. 90 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Natal, RN, 2019.

BARDINI, V.S.S. **Influência do Fíler Mineral nas Propriedades de Misturas Asfálticas Densas**. 2013. 337 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos et al. **Influência do filer mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos**. TRANSPORTES, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 19-26, 15 ago. 2012.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos, KLINSKY, Luis Miguel Gutierrez, FERNANDES JR., José Leomar Fernandes. **A Importância do Filer para o Bom Desempenho de Misturas Asfálticas**. Revista Minerva, São Carlos, v. 7, n. já/abr. 2010, p.71-78, 2010.

BERNUCCI, L. B., L. M. G. MOTTA, J. A. P. CERATTI, E J. B. SOARES. Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BECHARA, M. F.; FAXINA, A. L.; FABBRI, G. T. P., GIGANTE, A. C.; NASCIMENTO, D. R. (2008) “**Propriedades Reológicas de Mástiques Asfálticos a Altas Temperaturas**”. 39ª Reunião Anual de Pavimentação, Recife/PE. Associação Brasileira de Pavimentação.

CARVALHO, Flávia do Socorro de Sousa. **Estudo de Misturas Asfálticas com Adição de Cascalho de Poços de Perfuração**. 2021. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

CASTELO BRANCO, V. T. (2008). "A Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixes Using the Dynamic Mechanical Analyzer". Tese de Doutorado - Texas A&M University.

COUTINHO, R. P. (2012). **Utilização da Parte Fina de Misturas Asfálticas para Avaliação do Dano por Fadiga**. Dissertação de Mestrado, 96.

CRAVO, Margareth Carvalho Coutinho. **Efeitos do Envelhecimento Térmico e Fotoquímico em Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz de Agregados Finos**. 2016. 251 f. Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

CRAUS, J. ISAHIAI, I.; SIDES, A. **Guidelines for use of dust in hot-mix asphalt concrete mixtures**. Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists, v.56, p 492-516, 1978.

CORBETT, L. W., PETROSSI, U., “**Differences in Distillation and Solvent Separated Asphalt Residua**”, Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, v. 17, n. 4, pp. 342-346, Jul. 1978.

D’ANGELO, J.; ROBERT, K.; RAJ N, S.; LUDO, Z. **Revision of the Superpave high-temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. White Bear Lake, v. 76, p. 123-162, 2007.



- DAVIS, T. C., PETERSEN, J. C., & HAINES, W. E. (1966). **"Inverse Gas-Liquid Chromatography. A New Approach for Studying Petroleum Asphalts"**. Analytical Chemistry, 38, 241-243.
- DEHOUCHE, N.; KACI, M.; MOKHTAR, K.A. **Influence of termo-oxidative aging on chemical composition and Physical properties of polymer modified bitumens**. Construction and Building Materials, v. 26, p. 350-356. 2012.
- DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; SC, D. **Susceptibility of Asphalt Binders to Rutting: Literature Review**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, n. 2, p. 1–8, 2015.
- DOMINGOS, M. D. I.; PAMPLONA, T. F.; FAXINA, A. L.; GIGANTE, A. C. **Viscosidade Rotacional de Ligantes Asfálticos Modificados de Mesmo Grau de Desempenho**. Revista Transportes, v. 20, p. 15-22. 2012.
- DUARTE, E. V. N. **Avaliação reológica de ligante asfáltico 50/70 modificado com polímero reativo e não-reativo associado ao ácido polifosfórico**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2018.
- EL BEZE, L. **RECYCLAGE À CHAUD DES AGREGATS D'ENROBES BITUMINEUX: Identification de Traceurs D'Homogénéité du Melangé Entre Bitume Vieilli et Bitume Neuf d'Apport"**. Thèse, 318, 2008.
- FARIAS, M. M.; ROSENO, Jôfran Lima ; SOUZA, Newton Moreira de . **Avaliação de Agregados Calcários da Região do Distrito Federal Visando a Formulação de uma Mistura Asfáltica Porosa Confeccionada com Asfalto-Borracha**. In: 36ª Reunião Anual de Pavimentação, 2005, Curitiba. 36ª Reunião Anual de Pavimentação, 2005. v. 1. p. 1-12.
- FALCHETTO, A. C., MOON, K. H., & MARASTEANU, M. **Investigation Of Limiting Criteria For Asphalt Mixture Low Temperature Cracking**. Asphalt Pavements - Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements. Vol. 2, pp. 1841-1850. 2014.
- FENGLER, Ricardo Zardin. **Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de Trinidad Lake Asphalt**. 2018. 193 f. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

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

FHWA. Superpave Binder Specification. Federal Highway Administration. Washington. 2002.

FIALHO, Poline Fernandes. **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo do potencial de aplicação em concreto**. 217 f. 2012. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

GAMA, D. A. **Efeito da Adição de Polímeros Reativo, Não-Reativo e Ácido Polifosfórico e Suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos**. 2016. 167 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

GANGHIS, Diógenes; ALARSA, Marcelo; TRENTINI, Sérgio. **Alternativa para destinação final de cascalho de perfuração de poços de petróleo on shore gerados no Nordeste do Brasil**. Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 1, 2009.

HINTZ, C. **Understanding mechanics leading to asphalt binder Fatigue**. Dissertation. University of Wisconsin-Madison. 2012.

HUNTER, R. N., SELF, A., READ, J., **The Shell Bitumen Handbook**. 6 ed. Westminster, ICE Publishing, 2015.

JAROSZEK, H. Polyphosphoric acid (PPA) in road asphalts modification. Science Technique, v. 66, n. 12, p. 1340-1345. 2012.

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

KANABAR, N. **Comparison of ethylene terpolymer, styrene butadiene, and polyphosphoric acid type modifiers for asphalt cement**. Department of Chemistry. Master of Science. Queens University, 2010.

KIM, Y. R., LITTLE, D. N., & SONG, I. I. (2003). "Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistances and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation.". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1832, 1-8.

KODRAT, I.; SOHN, D.; HESP, S. **Comparison of Polyphosphoric Acid– Modified Asphalt Binders with Straight and Polymer-Modified Materials**. Transportation Research Board, v. 1998, p. 47–55, 2007.

LEONARD, S.A.; STEGEMANN, J.A. **Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings**. Journal of Hazardous Materials. v. 174. p. 463-472. 2010.

LESUEUR, D. **The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification**. Advances in Colloid and Interface Science Elsevier B.V., 2009.

LUCENA, Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes. **Utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de estradas**, Ano de obtenção. 2008. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

LUZ, Priscila Maria Sousa Gonçalves. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras *pinus* e *eucalipto***. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio**. 2017. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

MEDEIROS, Leonardo Coutinho de. **Adição de cascalho de perfuração da Bacia Potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos: influência da concentração e temperatura de queima**. Dissertação (Mestrado em graduação em Ciências e Engenharia da Materiais) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, 2010.

MELLO, M. S. **Avaliação das propriedades reológica e mecânica de ligantes e misturas asfálticas irradiadas**. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Nuclear. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MENESES, C. G.; PAULA, G. A. **Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da bacia potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento**. RUNPETRO, Ano 3, n. 1, p. 29-38, out.2014/mar.2015.

- MORAES, R. **Investigation of mineral filler effects on the aging process of asphalt mastics**. Thesis. 2014.
- MOTTA, L., & LEITE, L. (2000). "**Efeito do Fíler nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas**". ANPET.
- MOTHÉ, C.G.; Correia, D.Z.; Petri, H.M.; Mothé, M.G.; Carestiato, T., Tradução e Adaptação do livro Reologia e Reometria: Fundamentos Teóricos e Práticos, Gebhard Schramm, Thermo Electron/USA, Editora Art liber Ltda/ SP, 232p. 2006.
- MOTHÉ, M. G. **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica**. 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). 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**. 2015. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- NICOLLI, D.; SOARES, C. B. P. **Avaliação da Dispersão do Cascalho de Perfuração Lançado em Águas Profundas**. Disponível em: <<http://www.dep.fem.unicamp.br/boletim/BE09/artigo1.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- PESQUISA CNT de rodovias 2019. Brasília, 2019. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- PETERSEN, J. C., BARBOUR, F. A., & DORRENCE, S. M. (1974). **Catalysis of Asphalt Oxidation by Mineral Aggregate Surfaces and Asphalt Cement Components**. Asphalt Paving Technology, 43, 162-177.
- PINTO, F. V. S.; ANDRADE, J. P. S.; MAIA, D. F.; GUIMARÃES, I. O. **Impactos ambientais causados pelo descarte de resíduos Sólidos provenientes da indústria petrolífera**. II CONEPETRO, Campina Grande, PB, 2017.
- RIMA – Relatório de Impacto Ambiental. Atividade de perfuração marítima Blocos BM- POT-16 e BM-POT-17 Bacia Potiguar, revisão 02. Brasil, 2010.
- RODRIGUES, Ana Luiza Rezende. **Efeito do tipo e da proporção de fíler no comportamento do mástique asfáltico**. 2019. 9 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

RODRIGUES, Isabel Márcia; COLMENERO, João Carlos. **A Importância Da Manutenção Das Rodovias Para O Sistema De Redes Logísticas**. XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Salvador, p. 1-7, 6 out. 2009.

OLIVEIRA, Bruno Manuel da Silva. **Influência do filer e da borracha no comportamento do mástique asfáltico**. 2015. 101 p. Dissertação de Mestrado (Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Portugal, 2015.

SILVA, João Paulo Souza. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. 2011. 145 p. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2011.

SOBREIRO, F. **Efeito Da Adição De Ácidos Fosfóricos No Comportamento Reológico De Ligantes Asfálticos Puros E Modificados Com Copolímero SBS**. 2014. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SOUSA NETO, Valter Ferreira de. **Avaliação reológica do ligante asfáltico modificado com nanopartículas de óxido de zinco**. 2019. 117 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2019.

SULTANA, S.; BHASIN, A. **Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder**. Construction and Building Materials, v. 72, p. 293–300, 2014.

TUNNICLIFF, D. G. (1962) A Review of Mineral Filler. Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists, v. 31, p. 118–150.