

REOLOGIA DE LIGANTES ASFÁLTICOS: UM COMPARATIVO ENTRE CAP 50-70 E CAP AB-8

Thiago de Sá Sena ¹
Maria Ingridy Lacerda Diniz ²
Cinthia Maria de Abreu Claudino ³
Andresa de Oliveira Silva ⁴

RESUMO

O pavimento tem um papel fundamental na integração e no desenvolvimento do país. Durante a sua vida útil o asfalto apresenta uma determinada deterioração, tal processo também é chamado de envelhecimento e uma das suas principais causas é a variação da temperatura. A aplicação de materiais poliméricos no asfalto vem sendo utilizada como uma alternativa para o combate a estes problemas, trazendo uma maior durabilidade a via. Nesse contexto, a utilização de borracha de pneu em ligantes asfálticos torna-se viável, pois se trata de um material que seria descartado no meio ambiente. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades reológicas do CAP 50-70 e do CAP AB-8 modificado com borracha de pneus. A reologia tem como intuito principal encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura. Para isto foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, RTFOT e especificação do grau de desempenho. Ao se realizar os ensaios necessários constatou-se que as propriedades físicas dos ligantes foram satisfatórias para a utilização na pavimentação. A modificação com borracha contribui para o aumento da viscosidade, bem como no ponto de amolecimento, reduzindo a susceptibilidade térmica e também favorecendo a menor ocorrência de deformações, se mostrando com um ligante de melhor desempenho, com maior viscosidade, menor suscetibilidade térmica e maior PG antes e após o envelhecimento por RTFOT, indicando que o CAP AB-8 pode resistir a maiores temperaturas durante sua vida de serviço.

Palavras-chave: Asfalto, Asfalto modificado, Reologia, CAP AB-8.

INTRODUÇÃO

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

¹ Mestrando do Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, engthiagosena@gmail.com;

² Mestranda do Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, mariaingridydiniz@gmail.com;

³ Mestranda do Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, cinthiamariaac@gmail.com;

⁴ Pós Graduanda pelo Curso de Segurança no Trabalho da Faculdade Integrada de Patos - FIP, andresaoliveira0311@gmail.com;

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

No Brasil, desde 2001 o asfalto modificado por borracha moída de pneus inservíveis (ligante asfalto-borracha) está sendo utilizado, com suas primeiras rodovias experimentais concentradas nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul (ODA et AL.,2005). Tal alternativa surgiu com a constante ampliação das rodovias e o aumento da frota rodoviária o que causou o aumento na produção de pneus, dessa forma com o intuito de colaborar com o destino ecologicamente correto para os pneus inservíveis.

A Resolução N° 258 de 26 de agosto de 1999 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) obriga os fabricantes e importadores de pneus a reciclarem parte dos pneus usados já vendidos para poderem colocar pneus novos no mercado. Esta legislação, que vem obrigando os produtores a dar destino aos mais de 46 milhões produzidos todo ano no Brasil, encontrou no meio rodoviário um excelente parceiro para a reciclagem e minimização deste problema ecológico responsável pela proliferação de mosquitos transmissores de doenças (PANTAROTTO, 2007).

A malha rodoviária brasileira é vastamente utilizada para inúmeros fins, desde o uso intenso para o transporte de produtos até simples viagens de lazer com o transporte de pessoas. O pavimento tem um papel muito importante na integração e no desenvolvimento do país, intensificando a indústria e o comércio, dessa forma é de suma importância que seu bom desempenho durante sua vida útil seja garantido.

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

Durante a sua vida útil o asfalto apresenta deterioração das suas propriedades, tal processo também é chamado de envelhecimento e surge devido à presença do oxigênio,

radiação ultravioleta (UV), variações de temperatura e de maneira indireta pelo o esforço do tráfego de veículos. O processo de envelhecimento causa o aumento da rigidez da mistura betuminosa, e essa rigidez combinada com a ação do tráfego leva ao surgimento de fissuras e a degradação do pavimento (SILVA, 2005).

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

A utilização de borracha de pneu em ligantes asfálticos torna-se viável e relevante, pois se trata de um material que é descartado e que contribui de maneira direta para a degradação do meio ambiente. Já se misturada ao asfalto, a borracha de pneu pode modificar as propriedades reológicas do mesmo. Portanto esse trabalho teve como objetivo analisar o comportamento reológico dos ligante asfálticos CAP 50-70 tradicional e do ligante CAP AB-8 modificado com borracha no intuito de comparar seus desempenhos para serem aplicados em misturas asfálticas a serem empregadas na construção de rodovias.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

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

Os cimentos asfálticos de petróleo brasileiros são classificados pelo seu grau de dureza obtido por meio do ensaio de penetração a 25°C. Existem quatro tipos de CAP de acordo com

o Instituto Brasileiro de Petróleo e o Departamento Nacional de Infraestrutura Transporte (DNIT), que são o CAP 30-40, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200. Segundo Baldo (2007), a matéria prima mais importante para a obtenção é o petróleo, mesmo com a existência de asfaltos naturais em lagos (onde o asfalto natural é resultante de um processo de lento de evaporação das frações mais leves de petróleo), bem como as rochas asfálticas (Gilonita), de importância econômica mais limitada.

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

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

Estudos sobre a incorporação de polímeros ao asfalto mostraram melhorias em seu comportamento elástico e aumentaram sua resistência a deformação permanente e as trincas por fadiga, também ajudou na adesão entre agregado e asfalto, e na sua resistência ao envelhecimento. Os principais polímeros estudados encontram-se o SBR (borracha estireno-butadieno), SBS (copolímero de estireno e butadieno), EVA (copolímero de estireno e acetato de vinila) e a borracha de pneu moído. Segundo Souza et. al. (2016), em 1839 constatou acidentalmente que, ao aquecer a borracha e adicionar enxofre em altas temperaturas, as propriedades da borracha eram melhoradas. Esse processo foi denominado vulcanização, o que conferiu a borracha propriedades como, força, elasticidade, impermeabilidade para gases, resistência ao desgaste, química, ao aquecimento e à eletricidade.

Os pneus inservíveis se tornaram um problema, devido à grande quantidade existente e o descarte inadequado, tornando-se assim um grande fator de degradação ambiental. A produção brasileira de pneus é de 40 milhões de pneus por ano e quase metade dessa

produção é descartada nesse período de forma inadequada. Quando abandonados, servem de acúmulo de água e procriação de mosquitos e outros vetores de doenças. Também representam risco incêndio, que caso ocorra, acarreta em contaminação do ar com fumaça altamente tóxica e deixa um óleo que pode contaminar o lençol freático. A disposição de pneus em aterros sanitários no Brasil é proibida desde 1999, por diminuir a vida útil dos aterros e dificultar sua compactação (COELHO et al., 2014).

O asfalto borracha é uma alternativa de reuso. Segundo a patente americana são usados no asfalto borracha 3% a 5% de vazios no pavimento fechado, e 18% a 25% de vazios no pavimento aberto o que leva a redução do desgaste de pneus. A equivalência é de um pneu usado para cada metro de pista de pavimento produzido. Em cada quilômetro de asfalto-borracha, considerando-se uma pista com sete metros de largura e 4 cm de espessura, são utilizados mil pneus inservíveis (OLIVEIRA et al., 2009).

Os ligantes modificados com borracha de pneu têm viscosidade bem mais elevada que a de ligantes convencionais, tal qualidade aliada a sua excelente coesão e flexibilidade, permite a utilização desse tipo de asfalto em misturas asfálticas especiais, como camadas porosas de atrito (CPA), Stone Mastic Asphalt (SMA) e Gap-Graded. Além de proporcionarem superfícies de pavimento com excelente macro-textura, o que traz ganhos no quesito de atrito pneu-pavimento e na drenabilidade superficial, melhorando a visibilidade (anti-spray) e reduzindo os riscos de aquaplanagem em dias de chuvosos, outro ganho muito importante é a redução do ruído gerado pelo tráfego de veículos (ODA, 2005).

A reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais, relacionando a interação entre tensão de cisalhamento e deformação com o tempo (MELO, 2014). De acordo com a variação da temperatura, as propriedades reológicas dos cimentos asfálticos podem variar enormemente. Há temperaturas altas bem como quando a taxa de carregamento (frequência) é reduzida, a propriedade viscosidade do asfalto se torna mais evidente. Já em temperaturas baixas ou em altas taxas de carregamento, o asfalto reage como um sólido elástico. Em temperaturas suficientemente altas e/ou em longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto é essencialmente um líquido Newtoniano e pode ser descrito por um valor de viscosidade independente da taxa de aplicação de carga (AZEVEDO, 2017).

Há dois tipos de caracterização dos ligantes. O convencional, que consiste basicamente, nos ensaios de penetração, índice de suscetibilidade térmica, viscosidade e ponto de amolecimento. Já a caracterização SUPERPAVE baseia-se em ensaios que melhor se relacionam com o desempenho do material. Segundo Melo (2014), a caracterização da através dos ensaios de penetração e viscosidade apresenta limitações quanto à estimativa do

desempenho do asfalto ao longo do tempo de serviço. O ensaio de viscosidade fornece apenas informações sob a altas temperaturas, sem informação sobre seu desempenho a média e baixa temperatura. O ensaio de penetração apenas descreve a consistência a uma temperatura intermediária.

A caracterização comum consiste nos seguintes ensaios de caracterização:

- Ensaio de viscosidade (NBR 9277/2014) que serve para avaliar a capacidade do fluido em resistir ao escoamento. Tal ensaio se tem muita importância por determinar a consistência adequada do ligante para realização da mistura asfáltica.
- Ensaio de ponto de amolecimento ou “Anel e Bola” (NBR 6560/2000) em que uma amostra de cimento asfáltico é colocada em um recipiente constituído por um anel metálico. A partir disso, é realizado o ensaio mantendo-o suspenso em banho em um béquer com água. A temperatura lida no momento em que o conjunto toca o fundo do béquer é considerada o ponto de amolecimento do material.
- Ensaio de Penetração (NBR 6576/2007) consiste em verificar a consistência do CAP, através da penetração, em décimos de milímetro, de uma agulha padronizada numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25° C. Quanto maior a consistência do CAP menor é a penetração da agulha.

Já a caracterização *Superior Performing Asphalt Pavement* - SUPERPAVE é conjunto de novos ensaios e uma nova classificação de CAPs, baseado em ensaios reológicos, que foi lançado nos Estados Unidos em 1987 dentro do Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária com o objetivo de estabelecer novos procedimentos e equipamentos para o estudo de Cimentos asfálticos e suas misturas. Esse programa contribuiu muito para o desenvolvimento da malha rodoviária americana (AZEVEDO, 2017).

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

- Reômetro de cisalhamento dinâmico, em inglês, “*Dynamic Shear Rheometer–DSR*”: para medir propriedades dos ligantes asfálticos sob temperaturas altas e intermediárias;
- Viscosímetro rotacional, em inglês, “*Rotacional Viscosimeter–RV*”: para medir a viscosidade rotacional nas temperaturas de bombeamento, de mistura com

agregado em usina e de compactação da mistura. Este ensaio é especificado para assegurar a trabalhabilidade da mistura.

- Reômetro de fluência em viga, em inglês, “*Bending Beam Rheometer – BBR*”: para medir propriedades dos ligantes asfálticos sob temperaturas baixas e simular condições de carregamento resultantes de esfriamento;
- Prensa de tração direta, em inglês, “*Direct Tension Test– DDT*”: a fim de medir as propriedades dos ligantes asfálticos sob temperaturas baixas e simular condições de carregamento resultantes de resfriamento;
- Estufa de película delgada e rotacional, conhecido em inglês como “*Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT*”: Equipamento destinado a representar o envelhecimento do ligante asfáltico que ocorre durante o processo de usinagem da mistura asfáltica (curto prazo); e,
- Vaso de pressão de envelhecimento, em inglês “*Pressure Aging Vassel – PAV*”: equipamento utilizado para simular o envelhecimento do ligante asfáltico durante a vida em serviço do pavimento (longo prazo).

Assim, com base na caracterização SUPERPAVE, o CAP é classificado em função da temperatura, estimando faixas de temperaturas em que o mesmo pode ser utilizado. Tais faixas são denominadas Grau de Desempenho (PG), e podem ser definidas por duas temperaturas limites, sendo uma máxima, que garante à resistência deformação permanente e uma mínima, que indica à resistência a formação de trincas térmicas (AZEVEDO, 2017; LUCENA et al., 2005).

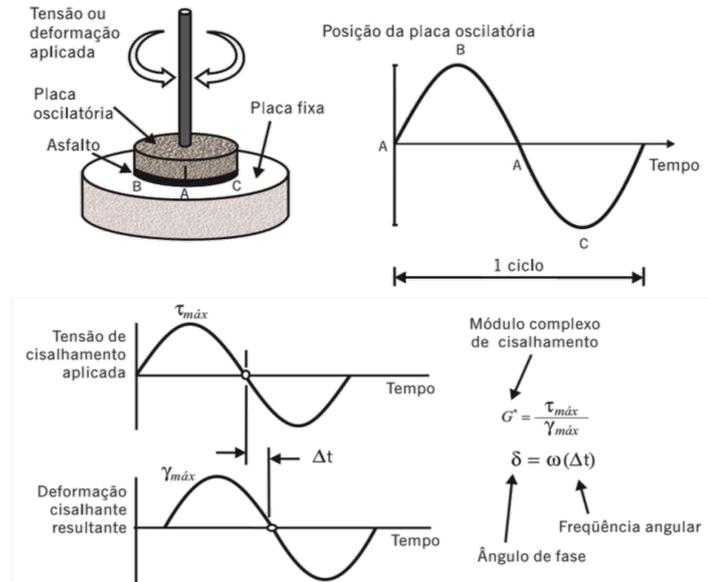
No presente trabalho, dentro os ensaios reológicos da especificação SUPERPAVE, serão apresentados apenas resultados do ensaio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico – DSR e o envelhecimento através da estufa de película delgada e rotacional – RTFOT.

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

O ângulo δ avalia a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o processo de cisalhamento, o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ (magnitude do módulo complexo G^* dividida pelo seno do ângulo de fase δ) foi sugerido como o critério oficial para quantificação da suscetibilidade do CAP ao acúmulo de deformação. A Figura 1 mostra um Reômetro de cisalhamento

dinâmico e apresenta de forma esquemática os valores de G^* e δ medidos pelos DSR. Mostrando a resposta à deformação cisalhante de uma amostra de ligante em relação à tensão aplicada por um certo intervalo de tempo Δt .

Figura 1 - Cálculo do Módulo complexo de cisalhamento G^* e do ângulo de fase (δ).



Fonte: BERNUCCI et. al., 2008.

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

$$G^* = \frac{\tau_{máx}}{\gamma_{máx}} \quad (1)$$

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

Onde:

G^* é módulo complexo de cisalhamento, Pa;

$\tau_{máx}$ é a máxima tensão de cisalhamento aplicada, Pa;

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

δ é o ângulo de fase;

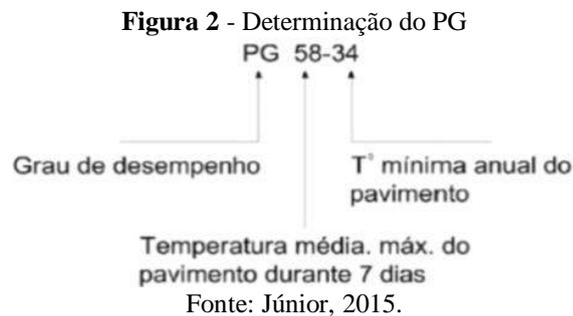
ω é a frequência angular, 1/s;

Δt é o tempo de defasagem, s.

Para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente defasada e δ vale 90° . Materiais viscoelásticos, tais como ligantes asfálticos, possuem ângulo de fase variando entre 0° e 90° , dependendo da temperatura. A altas temperaturas δ tende a 90° e a baixas temperaturas tende a 0° . A especificação de ligante usa o parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ para

temperaturas altas ($>46^{\circ}\text{C}$), $G^*\text{sen}(\delta)$ para temperaturas intermediárias (entre 7°C e 34°C) como forma de controlar a rigidez do asfalto (BERNUCCI et. al., 2008).

A classificação SUPERPAVE baseada no PG consiste em dois números: o primeiro número como mostra a Figura 2, corresponde à temperatura mais elevada do pavimento, ou seja, aquela em que os ensaios que avaliam a resistência ao acúmulo de deformação permanente devem ser realizados. O segundo número corresponde à temperatura mínima do pavimento, aquela em que os ensaios que analisam a resistência às trincas por contração de origem térmica devem ser realizados (CARNEIRO, 2015; ASPHALT INSTITUTE, 1983).



Então para que se possa selecionar o ligante asfáltico mais adequado é importante que sejam consideradas as características climáticas do local onde será executada a pavimentação, não apenas a caracterização do material asfáltico, uma vez que o desempenho do pavimento varia de acordo com os materiais selecionados, ou seja, é importante determinar o *Performance Grade* (PG), de cada via para evitar erros e problemas precocemente. A Figura 3 abaixo apresenta o Grau de desempenho (PG) necessário para asfaltos de acordo com cada região do Brasil.

Figura 3 - Grau de desempenho para asfaltos



Fonte: Leite e Tonial, 1994.

Tais parâmetros de temperatura devem ser levados em conta na escolha do tipo de ligante, para que este mantenha suas propriedades conservadas durante sua vida útil. Observa-

se a partir da figura que a região nordeste exige a maior PG de todo o país, exigindo que os materiais utilizados em pavimentos dessa região resistam a temperaturas de no mínimo 72 °C.

METODOLOGIA

O presente trabalho buscou comparar dois tipos de asfalto: asfalto convencional (CAP 50-70) e asfalto modificado com borracha (CAP AB-8). Os CAPs foram fornecidos pelo LEP/UFCG (Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande). As características dos ligantes devem estar em conformidade com os parâmetros contidos nas especificações de material do DNIT.

A metodologia foi seguida conforme mostrado no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 - Caracterização dos materiais



Fonte: Próprio autor.

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

A consistência de um CAP no estado semissólido é medida por meio do ensaio de penetração. O ensaio é regido pela norma NBR 6576/2007 da ABNT que classifica o CAP

quanto a sua dureza. O equipamento utilizado foi um penetrômetro (Figura 5), com divisões em 1/10mm. A realização deste ensaio consiste em separar a quantidade aproximada de 50g de amostra de CAP, deixá-la esfriar na atmosfera por um período de 60 minutos, e posteriormente serem transferidas para o banho d'água a uma temperatura de 25°C, por mais 60 minutos. Com a utilização do penetrômetro faz-se a determinação da penetração. Este ensaio foi feito para cada amostra de CAP 50/70 e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.

Figura 5 – Penetrômetro (LEP/UFCG)



Fonte: Próprio autor.

O ensaio de ponto de amolecimento (Figura 6) é regido pela NBR 6560/2000. O ponto de amolecimento é a mais baixa temperatura em uma esfera metálica padronizada pesando em média 3,50g, atravessa um anel padronizado preenchido com material betuminoso, sob condições especificadas. O ponto de amolecimento refere-se à média das temperaturas em que as duas esferas envolvidas pelo CAP deslocam-se para baixo e tocam o fundo. Este ensaio foi feito para cada amostra de CAP 50/70 e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.

Figura 6 - Ensaio de ponto de amolecimento (LEP/UFCG).



Fonte: Próprio autor.

Medidas de viscosidade são importantes na caracterização dos CAPs puros e modificados, pois fornecem informações sobre as propriedades de processamento, mistura e

lançamento do CAP, até sua aplicação em serviços de pavimentação. O ensaio para determinar a viscosidade dos ligantes asfálticos foi realizado em um viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, modelo DVII+ acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Viscosímetro Rotacional



Fonte: Próprio autor.

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

Após a realização dos ensaios de caracterização, foram realizados os ensaios para a determinação das propriedades reológicas. Para a avaliação do envelhecimento a curto prazo utilizou a estufa de filme fino rotativa, RTFOT (Figura 8). Este envelhecimento correlaciona-se com o envelhecimento que ocorre com o CAP durante o processo de usinagem e transporte até aplicação. O RTFOT provoca o envelhecimento do CAP por oxidação e evaporação, permitindo avaliar a presença de frações de óleos mais leves e a oxidação que ocorre durante o aquecimento a 163 °C. As normas que regem os procedimentos e especificações deste ensaio são a ABNT NBR 15235/2009 e ASTM D2872-12/2013.

Figura 8 - Envelhecimento a curto prazo (RTFOT)



Fonte: Próprio autor.

Já os ensaios reológicos foram realizados utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), visto na Figura 9. Os corpos de prova com aproximadamente um milímetro de espessura e 25 mm de diâmetro foram preparados em moldes específicos de silicone. As amostras foram colocadas entre *spindles* de placas paralelas, com mesmos diâmetros. Nesta análise foi verificado o PG.

Figura 9 - Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR)



Fonte: Próprio autor.

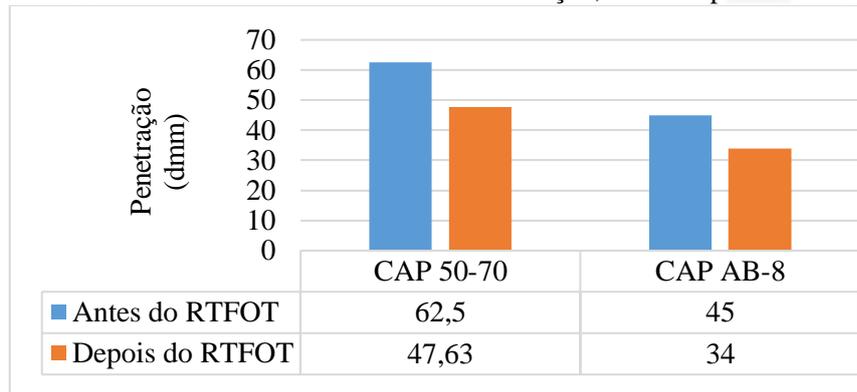
Esse ensaio é definido por duas temperaturas que indicam a faixa de uso dos ligantes asfálticos. Os CAPs serão ensaiados em temperaturas relacionadas ao seu período de emprego, determinando seu grau de desempenho *Performance Graded* (PG). Assim determinou-se uma temperatura máxima, de maneira a conservar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

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de penetração serve para determinar a consistência dos materiais asfálticos. O comportamento previsto é que os ligantes com adição de borracha de pneu moída apresentem resultados em valores mais baixos de penetração. Assim, os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Resultados dos Ensaio de Penetração, antes e após o RTFOT.



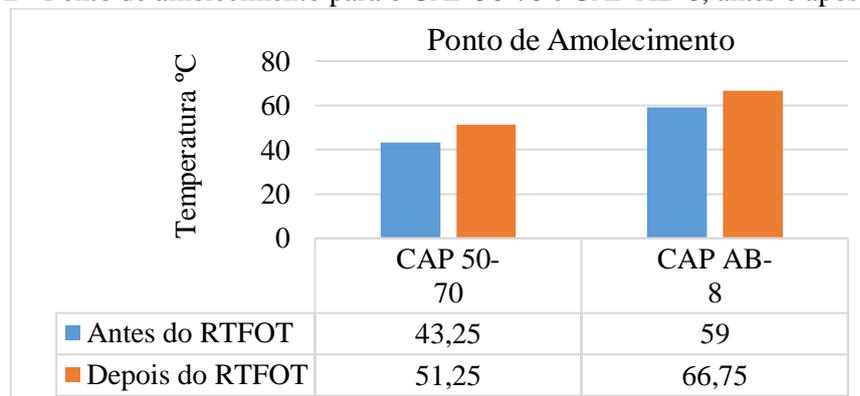
Fonte: Próprio autor.

Observa-se redução dos valores do ensaio de penetração antes e após o envelhecimento em curto prazo para todas as amostras. Observa-se que o grau de penetração do CAP AB-8 é bem menor se comparado ao CAP 50-70. Portanto, pode-se dizer que o resíduo de pneus aumenta a consistência do CAP significativamente.

O resultado obtido após o RTFOT para o CAP 50-70 está inadequado às especificações brasileiras, uma vez que a faixa aceitável é de 50 a 75 dmm. O CAP AB-8 também se está dentro dos limites estabelecidos pelas especificações de asfalto modificado por borracha (AMB) que é de 30-70 dmm.

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

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



Fonte: Próprio autor.

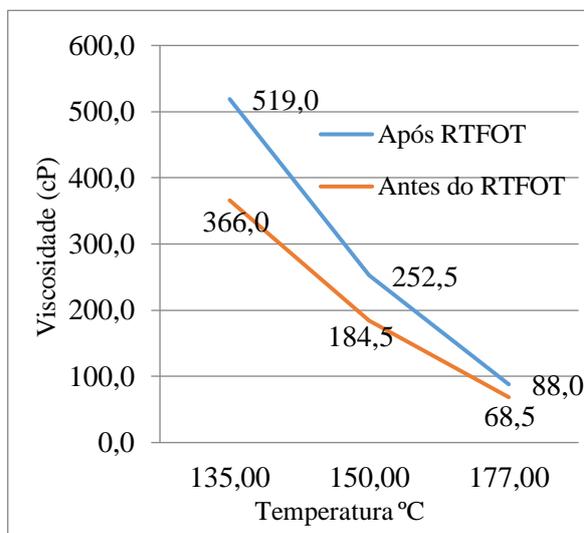
No Gráfico 2, pode-se notar um aumento na temperatura de ponto de amolecimento do CAP AB-8 quando comparado ao CAP 50-70, antes e após o envelhecimento a curto prazo.

Uma vez que, quanto maior o ponto de amolecimento acontecerá um aumento da resistência

ao acúmulo da deformação permanente das misturas modificadas, ou seja, a ocorrência de deformações será menor e o ligante torna-se menos sensível a temperatura, permanecendo com suas propriedades inalteradas até temperaturas mais altas, pode-se considerar esse ponto como positivo.

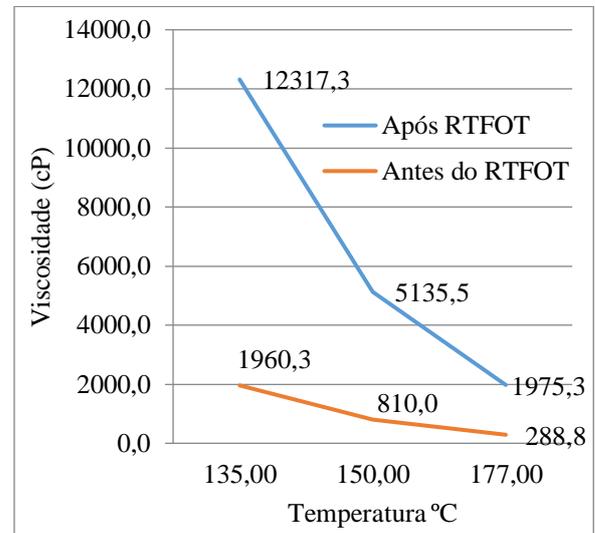
Os Gráficos 3 e 4 apresentam os valores de viscosidade para o CAP 50/70 e CAP AB-8, com borracha, antes e depois do RTFOT.

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



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 4 - Viscosidade do CAP AB-8, antes e após o RTFOT.



Fonte: Próprio autor.

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

Em relação as temperaturas de manuseio dos asfaltos, foram calculadas as temperaturas de mistura ou usinagem do ligante e do agregado a partir das curvas de viscosidade-temperatura obtidas, bem como a temperatura de compactação para cada tipo de ligante asfáltico. Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2

Tabela 1 - Temperatura de usinagem para o CAP 50-70 e CAP AB-8

Temperatura de usinagem	
CAP 50-70	153,79
CAP AB-8	183,15

Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 - Temperatura de compactação para o CAP 50-70 e CAP AB-8.

Temperatura de compactação	
CAP 50-70	142,11
CAP AB-8	177,46

Fonte: Próprio autor.

A temperatura de usinagem para os agregados é admitida em função da temperatura do ligante, variando de 10 a 15 °C para mais da temperatura do ligante. Dessa forma, os resultados para a temperatura de mistura dos agregados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Temperatura de usinagem dos agregados para o CAP 50-70 e CAP AB-8.

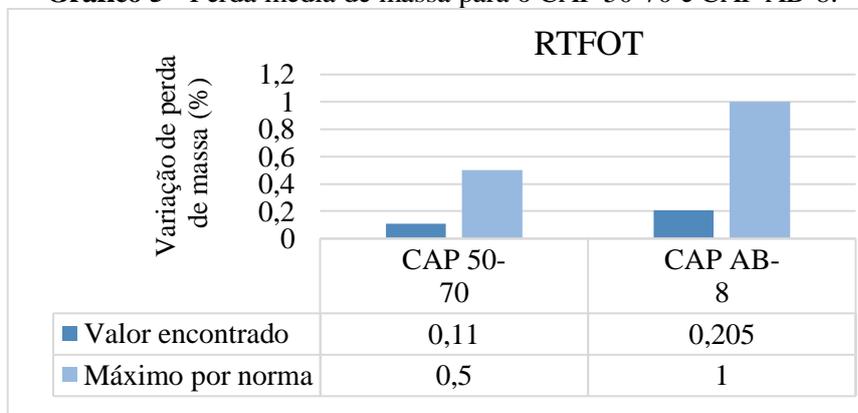
Temperatura de usinagem dos agregados	
CAP 50-70	138,8 - 168,79
CAP AB-8	168,15 - 198,15

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que a temperatura de usinagem e compactação são maiores para o CAP AB-8. A utilização de temperaturas mais altas para o processo de usinagem e compactação implicam em custos mais elevados na execução. É de grande importância que essas temperaturas sejam respeitadas para cada tipo de ligante asfáltico, dessa forma, o produto final apresenta seu desempenho ideal e, por consequência, que o revestimento tem boa qualidade e durabilidade.

Para o ensaio de envelhecimento a curto prazo – RTFOT, foram verificadas as variações da perda de massa para cada CAP testado. Os resultados são apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Perda média de massa para o CAP 50-70 e CAP AB-8.



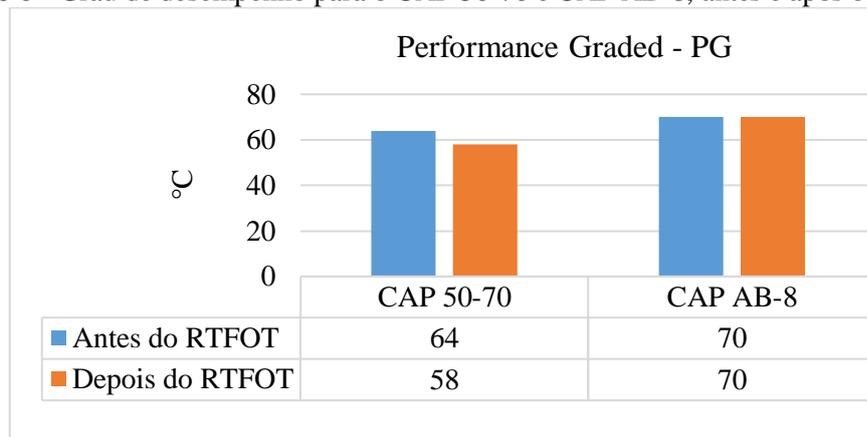
Fonte: Próprio autor.

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

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

O ensaio reológico de *Performance Graded* (PG) seguiu as especificações SUPERPAVE. Os valores obtidos garantem a adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes no que se diz respeito ao CAP. Os resultados são apresentados no Gráfico 6. Pelo fato da maior parte do território brasileiro apresentar um clima tropical com temperaturas médias de 25°C, neste ensaio não foi verificada a temperatura baixa. Sendo assim, verificou-se só a máxima temperatura.

Gráfico 6 - Grau de desempenho para o CAP 50-70 e CAP AB-8, antes e após o RTFOT.



Fonte: Próprio autor.

A amostra de CAP 50-70 teve sua PG reduzida em seis graus após o envelhecimento, enquanto que o CAP AB-8 manteve sua temperatura. Assim o grau de desempenho apresentado pelo ligante modificado com borracha de pneus, se mostra o mais eficaz, pois este mantém sua temperatura após o envelhecimento.

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

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

Com o aumento da viscosidade, ocorreu a diminuição da penetração, conferindo um aumento de rigidez na amostra, o que fez com que o CAP 50-70 apresentar inconformidade com as especificações brasileiras.

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

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

COELHO, Alaíde Luiza; RODRIGUES, Matheus; SOUSA, Hawinne; RESENDE Andressa de. **Impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos pneus inservíveis, e a sua utilização na massa asfáltica.** Revista Anuário de produções acadêmico - científicas dos discentes da faculdade Araguaia, Goiânia, v.3, n.3, 2014. Disponível em: <<http://www.fara.edu.br/sipe/index.php/anuario/article/view/285>>. Acesso em: 04 abr. 2020.

DOMINGOS, Matheus David Inocente; FAXINA, Adalberto Leandro. **Ensaio MSCR segundo as normas ASTM D7405-10a e AASHTO T350-14: um estudo de caso envolvendo ligantes asfálticos modificados.** Revista Transportes, v.24, n.3, 2016. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1115>>. Acesso em: 04 abr. 2020.

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

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

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

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

ODA, Sandra; NASCIMENTO, Luís Alberto Herrmann do; EDEL, Guilherme. **Aplicação de asfalto-borracha na Bahia.** In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO

E GÁS, 3., 2005, Salvador. Anais eletrônicos... Salvador: 2005. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0672_05.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2020.

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

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

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

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

SOUZA, Luciana Alves De Souza; FIGUEREDO, Giane Lourdes Alves de Souza; SANTOS, Elizeu José dos; MARI, Marcelo Molina; BRITO, Rogério dos Reis, A destinação de pneus inservíveis numa transportadora da região norte do estado do Tocantins, **Revista JNT - Facit Business and Technology Journal**, v.1, n.1, 2017. Disponível em: <<http://revistas.faculdefacit.edu.br/index.php/JNT/article/download/139/144>>. Acesso em: 04 abr. 2020.