

**Análise comparativa das propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados por
adição de politereftalato de etileno micronizado e de borracha de pneu triturada**

**Comparative analysis of the rheological properties of asphalt binders modified by the
addition of micronized ethylene polyterefalate and grinded tire rubber**

**Análisis comparativo de las propiedades reológicas de los ligantes de asfalto modificados
mediante la adición de polietileno tereftalato micronizado y caucho de neumáticos
tritutados**

Recebido: 01/07/2020 | Revisado: 15/07/2020 | Aceito: 11/09/2020 | Publicado: 13/09/2020

Adriano Lopes Gualberto Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1141-1783>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

E-mail: adrianolopesx@gmail.com

Damares de Sá Ramalho Neta

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5660-3367>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

E-mail: damaresramalhon@gmail.com

Daniel Beserra Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8362-2582>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

E-mail: daniel.beserra@gmail.com

Giovanna Feitosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8859-9297>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

E-mail: giovannafeitosa@gmail.com

Larissa Santana Batista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5066-521X>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

E-mail: larisantanabatista@gmail.com

Nayla Kelly Antunes de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4714-1105>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

Resumo

A inserção de polímeros ao ligante asfáltico pode melhorar as propriedades reológicas, viabilizando o aumento do desempenho e da vida útil dos pavimentos. Os polímeros elastômeros, encontrados na borracha de pneu e nos plastômeros, como é o caso do PET, proporcionam modificações benéficas adicionados ao ligante. Esta pesquisa tem como objetivo realizar uma análise comparativa das propriedades reológicas da adição de PET micronizado e borracha de pneu triturada ao ligante asfáltico CAP 50/70, através da realização de ensaios de reologia empírica e fundamental, de forma a determinar o grau de modificação que cada polímero provoca e qual deles promove o melhor desempenho da massa asfáltica. O teor que proporcionou os resultados mais favoráveis com a utilização do PET foi o teor de 8%, já com a borracha de pneu observou-se que a inserção de 5% beneficia mais as propriedades do cimento asfáltico. Os resultados encontrados apontam eficácia na adição dos resíduos no ligante asfáltico, embora o PET tenha apresentado ganhos mais interessantes nas características da massa asfáltica em teores mais altos, enquanto a borracha de pneu, mesmo nos menores teores, tenderia à diminuição nos parâmetros de trabalhabilidade do revestimento.

Palavras-chave: Polímeros; Reologia; Pavimento; Asfalto; Resíduos; CAP.

Abstract

Inserting polymers into the asphalt binder can improve rheological properties, making it possible to increase pavement performance and service life. Elastomeric polymers, found in tire rubber and plastomers such as PET, provide beneficial modifications added to the binder. This research aims to perform a comparative analysis of the rheological properties of adding micronized PET and crushed tire rubber to the asphalt binder CAP 50/70, by performing empirical and fundamental rheology tests in order to determine the degree of modification each polymer causes and which one promotes the best performance of the asphalt compound. The content that provided the most favourable results with the use of PET was the content of 8%, while with tire rubber it was observed that the insertion of 5% benefits more the properties of asphalt cement. The results found point to effectiveness in adding the residues to the asphalt binder, although PET showed more interesting gains in the characteristics of the asphalt mass in higher contents, while tyre rubber, even in the lower contents, would tend to decrease the parameters of workability of the coating.

Keywords: Polymers; Rheology; Pavement; Asphalt; Waste; CAP.

Resumen

La inserción de polímeros en el ligante asfáltico puede mejorar las propiedades reológicas, lo que permite aumentar el rendimiento y la vida útil del pavimento. Los polímeros elastoméricos, que se encuentran en el caucho de los neumáticos y en plastómeros como el PET, proporcionan modificaciones beneficiosas añadidas al aglutinante. Esta investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de las propiedades reológicas de la adición de PET micronizado y caucho de neumáticos triturados al ligante de asfalto CAP 50/70, mediante la realización de pruebas reológicas empíricas y fundamentales para determinar el grado de modificación que provoca cada polímero y cuál promueve el mejor rendimiento del compuesto de asfalto. El contenido que proporcionó los resultados más favorables con el uso del PET fue el contenido del 8%, mientras que con el caucho de neumáticos se observó que la inserción del 5% beneficia más las propiedades del cemento asfáltico. Los resultados encontrados apuntan a la eficacia en la adición de los residuos al ligante de asfalto, aunque el PET mostró ganancias más interesantes en las características de la masa de asfalto en los contenidos más altos, mientras que el caucho de neumáticos, incluso en los contenidos más bajos, tendería a disminuir los parámetros de trabajabilidad del revestimiento.

Palabras clave: Polímeros; Reología; Pavimento; Asfalto; Residuos; CAP.

1.Introdução

O transporte rodoviário é a principal forma de escoamento de produção e deslocamento de passageiros no Brasil. Segundo dados da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2018) a frota rodoviária brasileira cresceu 55% entre 2004 e 2018, passando de 30,8 milhões para 68,6 milhões de veículos licenciados. Em pesquisa realizada regulamentada pela CNT em 2018, 61,8% das rodovias pavimentadas, em relação ao seu estado geral, encontram-se em situação de regular a péssimo.

No pavimento, a presença de problemas foi constatada em 50% da extensão, prejudicando dessa forma o tráfego, aumentando o consumo de combustível e de manutenções nos veículos devido a ondulações, buracos e outros defeitos. Os principais fatores de degradação dos pavimentos flexíveis são: excesso de carga transportada por eixo; falta ou pouco planejamento no dimensionamento das rodovias; alta pressão de enchimento dos pneus e o aumento do volume de tráfego.

Como forma de diminuir o efeito desses fatores uma alternativa é a busca de materiais que aumentem a durabilidade do revestimento asfáltico, podendo ser realizadas modificações

nos materiais pétreos e no ligante. Em meio as novas tecnologias existentes, a utilização de ligantes asfálticos modificados é um tema de destaque, uma vez que a sua inserção possibilita melhorias no desempenho do revestimento. Ainda mais quando a modificação pode ser realizada através da adição de resíduos provenientes da atividade humana, como é o caso do politereftalato de etileno (PET) e da borracha de pneu.

De acordo com Sulyman *et al.* (2016) as características de um pavimento flexível podem melhorar muito através da adição de polímeros, como exemplo a diminuição de deformações características, redução de deformações permanentes, trincas por fadiga e por variação térmica e melhora da adesividade agregado-betume. Em contrapartida, a adição de polímeros possui custo mais elevado e por isso há uma tendência crescente de substituição dos polímeros comerciais virgens por polímeros reciclados, como, por exemplo, as garrafas PET e os pneus.

Com a finalidade de verificar qual dos resíduos é o melhor para aplicar no pavimento como forma de melhorar o seu desempenho e contribuir para a redução de impactos ambientais que esses materiais causam no meio ambiente. O presente trabalho tem como objetivo o estudo comparativo das propriedades reológicas empíricas e fundamentais dos ligantes asfálticos modificados pela adição de PET micronizado e de borracha de pneu triturada.

2. Metodologia

A presente pesquisa é laboratorial. Assim sendo, as condições do meio foram controladas para realização da experiência. Os resultados dos ensaios laboratoriais são dados quantitativos que serão discutidos e explanados no decorrer desse artigo. Nunes (2019), Silva (2015), Marinho Filho (2017) foram os escritores utilizados como base para a metodologia.

2.1 Materiais

Neste tópico estão descritos os materiais e os procedimentos adotados durante a fase experimental da pesquisa para a obtenção das propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticos puro e modificados. Os métodos de ensaios realizados foram fundamentados nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), nas normas internacionais da American Society for Testing and Materials (ASTM) e da American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO). Outras metodologias de ensaios não existentes em normas foram descritas em suas especificações. Nos tópicos a seguir estão descritas as atividades desenvolvidas nesta pesquisa para os ensaios desenvolvidos com o ligante sem

modificação, denominado de CAP puro, e com modificação, denominados: BO 2%, BO 5%, BO 8%, PET 2%, PET 5 e PET 8%.

No presente estudo foi utilizado o ligante classificado como CAP 50/70 utilizado como ligante base, borracha de pneu triturada cedida da pesquisa de mestrado de (Nunes, 2019), a mesma é do tipo pós-consumo triturada, estando a faixa granulométrica compreendida entre 0,15 e 0,59 mm, e o PET micronizado utilizado na pesquisa de doutorado de (Silva, 2015), com faixa granulométrica entre 0,6 e 0,074 mm, conforme especificado no estudo original.

A escolha dos teores foi realizada com base em pesquisas bibliográficas de forma a escolher porcentagens intermediárias que interseccionassem os estudos já realizados utilizando o PET e a borracha de pneu (BO) como aditivos ao ligante asfáltico. Visando a utilização de uma faixa que possibilitasse um intervalo de utilização para os dois polímeros, foram escolhidos os teores de 2%, 5% e 8% para a realização da pesquisa em questão.

Após a determinação dos teores a serem estudados, os ligantes foram submetidos aos ensaios de reologia empírica: penetração, ponto de amolecimento e estabilidade à estocagem, e ao ensaio de reologia fundamental, PG. Em seguida, passaram pelo processo de envelhecimento, realizado na estufa RTFO, e foram novamente submetidos aos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, PG e o ensaio MSCR, que é realizado somente após o RTFO com a temperatura de PG.

2.1.1 Preparação das amostras

O processo de preparação das amostras foi feito para obter os ligantes modificados com adição do PET e da borracha de pneu micronizada, nos teores especificados.

O ligante foi pré-aquecido na estufa durante 1 hora, pesado e colocado no recipiente metálico, com acionamento do rotor para o CAP puro continuar sendo aquecido até alcançar a temperatura de 165°C. Na sequência, colocava-se a borracha ou o PET. Posteriormente ao processo de mistura de cada ligante com a determinada porcentagem do resíduo adicionado, a mesma foi colocada em recipientes fechados e armazenada de forma que não ficasse exposta à contaminação por agentes poluentes, em temperatura ambiente, não interferindo nas características de envelhecimento do ligante.

2.2 Métodos

2.2.1 Reologia empírica

2.2.1.1 Ensaio de penetração

O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi o penetrômetro. Para isso a amostra foi resfriada para temperatura de ensaio colocando-a em banho maria.

Após o ligante passar pelo processo de envelhecimento em estufa RTFO, o mesmo foi novamente submetido à análise através do ensaio de penetração. Com ambos os valores de penetração é possível calcular a penetração retida, parâmetro que representa a sensibilidade do material betuminoso ao envelhecimento e é descrita pela Equação 1.

$$PEN_{retida} = \frac{PEN_{final}}{PEN_{inicial}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 1})$$

2.2.1.2 Ponto de amolecimento

Foi realizado conforme a NBR 6560:2000 (Método do Anel e Bola). Duas amostras do ligante em estudo foram colocados em anéis padronizados sob carga constante de duas esferas de aço, de peso e dimensão padronizadas, e postos em um béquer de forma que o conjunto é aquecido a uma velocidade constante de 5 °C/min.

Depois de obtidos os resultados de ponto de amolecimento e penetração é possível calcular o índice de suscetibilidade térmica ou índice de penetração. Segundo Bernucci *et al.* (2010) este índice indica a sensibilidade da consistência dos ligantes à variação de temperatura e é dado pela Equação 2.

$$IST = \frac{500 \cdot \log(PEN) + 20 \cdot T^{\circ}\text{C} - 1951}{120 - 50 \cdot \log(PEN) + T^{\circ}\text{C}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

T°C = Ponto de amolecimento.

PEN = Penetração a 25°C, 100 g, 5 segundos.

2.2.1.3 Estabilidade à estocagem

O ensaio de estabilidade à estocagem é regido pela norma da American Society for Testing and Materials – ASTM D5892-96. O mesmo consiste na colocação do ligante modificado em um tubo cilíndrico metálico fechado em uma das extremidades e selado na outra. O cilindro é levado à estufa por 48 horas à 163 ± 5 °C e posteriormente é realizado o ensaio de ponto de amolecimento com amostras do fundo e do topo do tubo cilíndrico e o resultado se dá pela diferença entre as temperaturas das médias dos pontos de amolecimento das amostras, em graus.

2.2.2 Reologia fundamental

2.2.2.1 Envelhecimento à curto prazo (RTFO)

O Rolling Thin Film Oven Test (RTFO) normatizado pela ASTM D2872- 04 realiza a simulação do envelhecimento do ligante por oxidação e evaporação a curto prazo. Este ensaio foi realizado à temperatura de 165°C, onde foram colocados em uma prateleira circular rotativa oito recipientes cilíndricos de vidro contendo 35 gramas de ligante, os mesmos receberam injeções de ar a uma vazão de 4000 ± 200 ml/min. Os ligantes rolaram continuamente ao longo da superfície do recipiente durante 85 minutos formando uma película relativamente fina, de aproximadamente 1,25 mm. Após envelhecidas, as amostras foram novamente caracterizadas por meio dos ensaios empíricos e reológicos de viscosidade rotacional e PG.

Ao fim do ensaio as amostras são pesadas a fim de realizar a verificação da perda de massa que é calculada a partir da Equação 3.

$$\Delta M = \left(\frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

ΔM = variação em massa (%)

$M_{inicial}$ = massa do CAP antes do RTFO (g)

M_{final} = massa do CAP após o RTFO (g)

2.2.2.2 Viscosidade rotacional

Esse procedimento é preconizado pela norma ABNT NBR 15184:2004 e a viscosidade é tida como uma propriedade física que define a resistência ao escoamento de um fluido. O mesmo foi realizado utilizando um viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, modelo DVII acoplado a um controlador de temperatura Thermosel.

2.2.2.3 Grau de desempenho - PG

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D6373-16, utilizando-se amostras de 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura. Iniciou-se a uma temperatura de 46°C com degraus de 6 °C, verificando-se para cada degrau o parâmetro $G^*/\sin \delta$, até 82 °C, utilizando uma frequência de 10 rad/s e deformação de 10% nas amostras, antes e após o envelhecimento RTFO. O equipamento utilizado foi o reômetro de cisalhamento dinâmico, modelo Discovery Hybrid Rheometer - DHR 1, e o software para o ensaio é o FASTTRACK, desenvolvido pela TA Instruments. Ao final de cada ensaio o programa gerava relatórios com os parâmetros analisados.

2.2.2.4 Fluência e recuperação sobre tensão múltipla – MSCR

O ensaio se prosseguiu em conformidade com a norma ASTM D7405-15, realizado com as amostras envelhecidas após RTFO, de dimensões idênticas às utilizadas no ensaio de grau de desempenho e foi realizado no reômetro de cisalhamento dinâmico. Partindo-se dos resultados dos PG realizados antes e após o RTFO, comparou-se o valor de temperatura para cada teor e dessa forma, a menor temperatura para cada proporção é escolhida para ser a temperatura de ensaio do MSCR. Foram realizados 10 ciclos para tensão baixa (0,1 kPa), simulando condições de tráfego normal e 10 ciclos para alta tensão (3,2 kPa), simulando um tráfego intenso, com o objetivo de analisar a sua reação elástica. Para cada ciclo uma tensão era aplicada durante 1 segundo na amostra do ligante e retirada posteriormente, permitindo que o material repousasse durante 9 segundos. Ao fim de cada ciclo eram determinados os valores de ϵ_0 , ϵ_c , ϵ_r , ϵ_1 , ϵ_{10} , da curva de deformação versus tempo. A partir dos parâmetros encontrados na realização do ensaio foi possível calcular a compliância não recuperável (J_{nr}), a porcentagem

de recuperação elástica (%Re) e sensibilidade à níveis de deformações (Jnr diff).

3 Resultados e Discussão

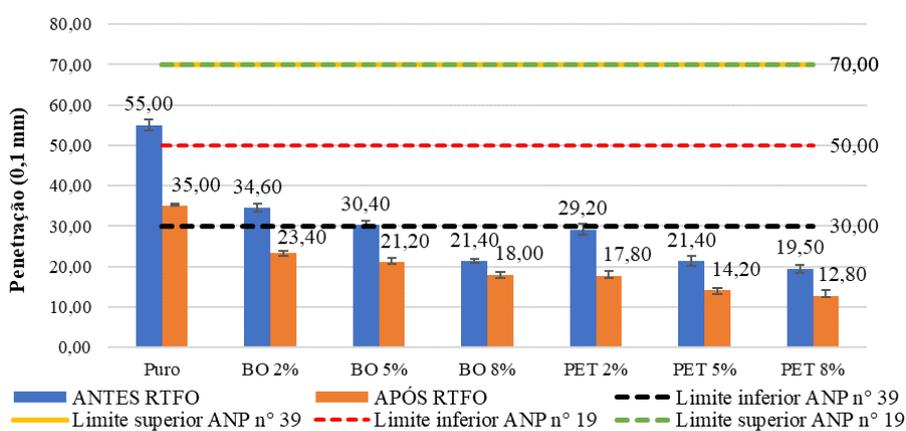
3.1 Reologia Empírica

3.1.1 Ensaio de penetração

Segundo Oda (2000) a classificação por penetração é baseada principalmente na consistência do ligante asfáltico, mensurada quando o mesmo está com a temperatura de 25°C, que é considerada a temperatura média do pavimento em serviço. A autora considera que as principais vantagens deste ensaio é que a classificação é feita através de ensaios realizados a temperaturas próximas as de serviço e os experimentos são rápidos e possuem baixo custo de investimento.

Na Figura 1 estão representados os resultados para o ensaio de penetração do ligante puro e modificado com PET e borracha de pneu (BO).

Figura 1 - Ensaio de penetração para os ligantes puro e modificado.



Fonte: Autor (2020).

Os valores encontrados com a adição de 2% e 5% de BO, exibidos na Figura 1, estão dentro dos limites especificados pela ANP n° 39 (2008), de 30 a 70x(0,1mm), que estabelece os critérios a serem seguidos para cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha moída de pneus e somente o teor de 8% de BO, apresentou penetração abaixo do limite estabelecido de acordo com a normativa.

Resultados semelhantes foram obtidos por Oda (2000), onde em sua pesquisa a mesma

afirma que é previsto que a adição de borracha torna o ligante mais viscoso, resultando em valores mais baixos de penetração em função do aumento do teor de borracha nas misturas, porém a mesma também afirma que a partir do teor de 12% de borracha a penetração estabiliza ou diminui para os teores de 14 e 18%.

Os valores de penetração obtidos com a modificação do PET não atendem aos extremos determinados pela ANP n° 19 (2005), ficando consideravelmente abaixo dos limites especificados para o CAP 50/70 puro, o mesmo ocorre quando se compara os resultados com a ANP n° 39 (2008), porém a penetração do teor de 2% de PET é próxima à faixa limitante estabelecida pela norma.

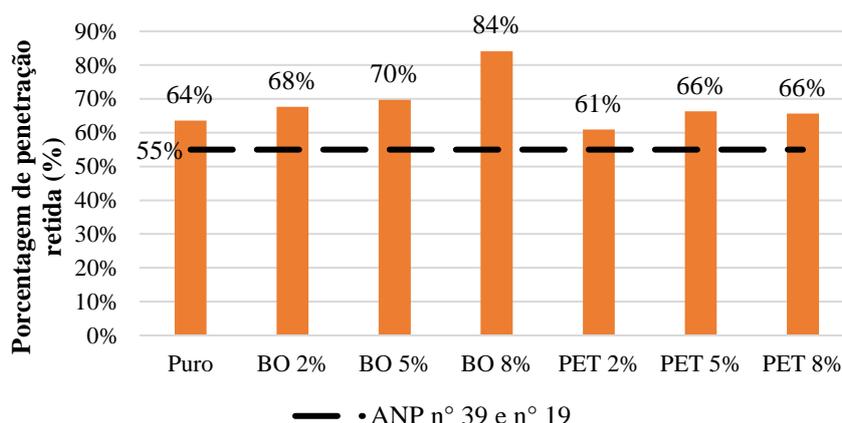
De acordo com o trabalho de Mohammed e Hussein (2014), que realizaram ensaios com 1, 2, 3, 4 e 5% de PET, obtiveram os resultados do ensaio de penetração com asfalto modificado com PET que mostram que a consistência diminui com a adição do polímero. Os valores de penetração para o ligante modificado diminuem conforme o teor de polímero na mistura aumenta.

A partir do comportamento observado no gráfico é possível perceber que com a adição dos polímeros houve uma considerável redução da penetração e a mesma continuou decrescente para o aumento dos teores, ou seja, isso significa que a adição de polímero torna o ligante modificado mais duro, o que implica em alta resistência à deformação no pavimento da estrada, mas por outro lado, isso pode afetar a flexibilidade, tornando o asfalto muito mais rígido, portanto, a resistência à fissuração por fadiga pode ser afetada (Kalantar *et al.*, 2010).

O ligante com 8% de PET apresentou maior redução do valor da penetração quando comparado ao ligante puro, com redução de 64% antes do procedimento de RTFO, o que é esperado, pois o PET é classificado como um polímero plastômero e de acordo com (Bringel, 2007) os mesmos tendem a aumentar a rigidez e a estabilidade da mistura asfáltica, enquanto os elastômeros, como a borracha de pneu, aumentam a flexibilidade dos revestimentos.

Os resultados obtidos na análise da penetração retida dos ligantes estão representados na Figura 2, a seguir.

Figura 2 - Relação da penetração retida.



— • ANP n° 39 e n° 19

Fonte: Autor (2020).

Segundo as especificações da ANP n° 19 (2005) e da ANP n° 39 (2008), o valor mínimo para a penetração retida para o CAP 50/70 e para o ligante modificado com borracha é de 55%, especificação essa que é atendida pelo ligante puro utilizado como referência para esse estudo, assim como para os teores modificados com PET e com BO, conforme a Figura 2.

Exceto pelo ligante com 2% de PET, todos os outros teores em análise apresentaram valores superiores de penetração retida em relação ao ligante puro. Os ligantes modificados com BO apresentaram para todas as porcentagens valores superiores quando comparados com os teores de PET, que obtiveram 5 pontos percentuais de variação do ligante 2% de PET para o de 5% de PET e se manteve constante quando observado o teor de 8% de PET.

Segundo Chen *et al.* (2003) e Djaffar *et al.* (2013) o alto valor de penetração invertida significa que o asfalto modificado é menos suscetível a mudanças de temperatura e mais resistente a rachaduras de baixa temperatura, bem como permanentes deformação.

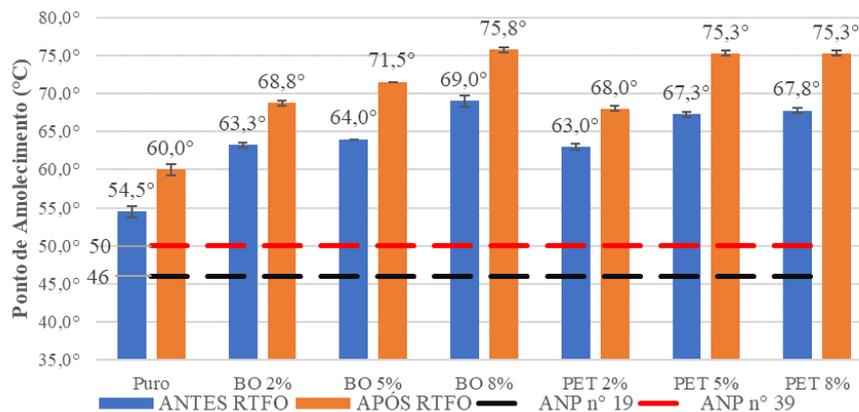
Sendo assim, a maior resistência ao procedimento de envelhecimento é apresentada pelos ligantes modificados com BO, esse é um indicativo do melhor desempenho dessa modificação, sendo necessária a avaliação de outros parâmetros para comprovação.

3.1.2 Ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento. Trata-se de uma referência semelhante ao chamado ponto de fusão bastante usado na Europa. Esse ensaio é classificatório em especificações

brasileira e europeia, e é empregado para estimativa de suscetibilidade térmica, além de também estar presente em especificações de asfaltos modificados e asfaltos soprados (Bernucci *et al.*, 2010). Os resultados obtidos com o ensaio de ponto de amolecimento estão expostos na Figura 3, abaixo.

Figura 3 - Ensaio de ponto de amolecimento para os ligantes puro e modificado.



Fonte: Autor (2020).

A resolução ANP n° 19 (2005) estabelece que 46°C é o limite mínimo para a temperatura de ponto de amolecimento para o ligante puro CAP 50/70, dessa forma, todos os ligantes em estudo atenderam a essa especificação.

Avaliando os valores encontrados na Figura 3, para os teores de BO, a ANP n° 39 (2008) especifica que o valor mínimo para temperatura de amolecimento do ligante é de 50°C, dessa forma todos os teores de BO satisfizeram essa resolução. Os resultados obtidos com a adição do PET também atenderam a essa especificação.

Realizando-se o comparativo entre o ligante puro e os ligantes modificados, todos os teores de ligantes com adição de PET ou BO necessitaram de valores mais elevados de temperatura que o ligante puro. Esse fato é decorrente da rigidez sofrida pelo ligante ao ser adicionado de polímeros.

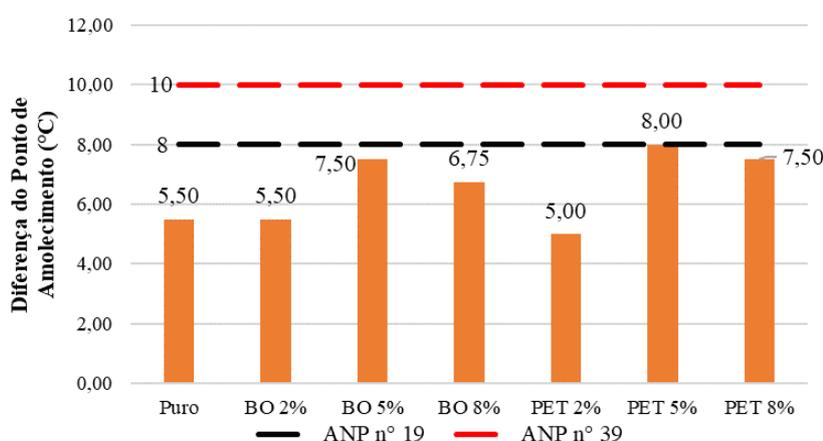
O aumento máximo do ponto de amolecimento, para a modificação com BO, ocorreu no teor de 8%, comparando-se os valores obtidos para esse teor com o ligante puro obteve-se um aumento percentual de 26,6% antes do RTFO e 26,3% após o RTFO. Oda (2000) afirma que o aumento do ponto de amolecimento é crescente de acordo com o acréscimo de borracha, o que indica um aumento da resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto borracha.

O maior ponto de amolecimento entre os teores de PET, quando comparado com o

ligante puro, foi também com o teor 8%, apresentando um aumento máximo de 24,4% antes do RTFO alcançando um valor de 67,8°C. As temperaturas de ponto de amolecimento dos ligantes com adição de PET nas porcentagens de 5% e 8% tiveram uma variação de 0,5°C antes do RTFO e não obtiveram nenhuma variação para o mesmo ensaio após RTFO, esse resultado demonstra que a partir do teor de 5% a adição do PET não interfere nas propriedades do ligante quanto a sua consistência. Na Figura 4 está representada a variação do ponto de amolecimento após o RTFO dos ligantes estudados.

Em conformidade com os resultados obtidos, Mohammed e Hussein (2014) afirmam que seus resultados mostram claramente que a adição de PET aumenta o valor do ponto de amolecimento, e conforme o teor de polímero aumenta, o ponto de amolecimento também aumenta. Os autores ainda afirmam que este fenômeno indica que a resistência do aglutinante ao efeito do calor é aumentada e reduzirá sua tendência a amolecer em climas quentes. Além deste aumento na dureza, indicam uma melhoria na susceptibilidade à temperatura com a modificação do polímero.

Figura 4 - Variação do ponto de amolecimento após RTFO.



Fonte: Autor (2020).

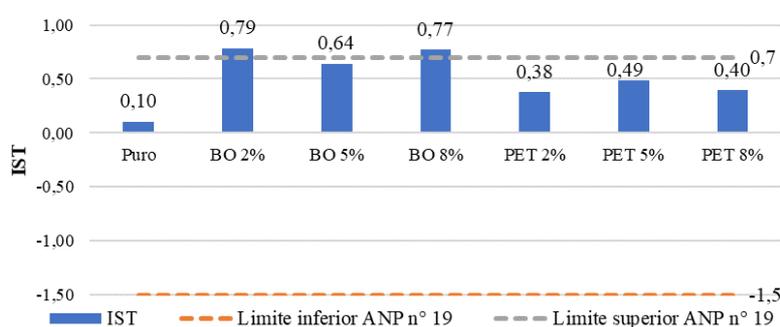
A ANP nº 19 (2005) define ainda que o aumento máximo da temperatura de amolecimento após o procedimento de envelhecimento do ligante é de 8°C para o CAP 50/70. Como apresentado na Figura 4, todos os teores apresentaram variação do ponto de amolecimento em conformidade com essa resolução.

Já a ANP nº39 (2008) estabelece que essa variação máxima de ponto de amolecimento pode ser de até 10°C, para ligantes asfálticos modificados com a inserção de borracha de pneu. Essa especificação também é atendida pelas modificações realizadas com PET e BO.

A avaliação dessa diferença de temperaturas demonstra o efeito do envelhecimento nesta propriedade do ligante asfáltico. As amostras mais afetadas pelo RTFO foram as com adição de 5% de PET e de BO.

A partir da obtenção dos resultados do ensaio de ponto de amolecimento é possível calcular o índice de Susceptibilidade Térmica – IST, os valores encontrados estão dispostos na Figura 5. Segundo a ANP n° 19 (2005), o limite inferior e superior para esses parâmetros são -1,5 e +0,7, respectivamente.

Figura 5 - Índice de susceptibilidade térmica dos ligantes puro e modificados.



Fonte: Autor (2020).

Analisando os resultados obtidos na Figura 5, a partir da realização dos ensaios, tem-se que o ligante puro atendeu às especificações da ANP n° 19 (2005) assim como a maior parte dos ligantes modificados, exceto os ligantes com teores de 2% e 8% de BO, que possuem IST superior ao limite máximo de +0,7, valores próximos a +1,0, indicando serem ligantes poucos sensíveis a elevadas temperaturas. A ANP n° 39 (2008) não estabelece critérios de especificação para esse parâmetro.

Os ligantes modificados com o PET apresentaram o IST mais próximo de 0, assim sendo, essa modificação apresentou resultados mais satisfatórios quando comparados aos dos ligantes modificados com BO. Não foi possível estabelecer uma linearidade entre o aumento de polímeros no ligante e a diminuição ou aumento da susceptibilidade térmica.

3.1.3 Estabilidade à estocagem

O objetivo do ensaio de estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero é determinar a estabilidade do valor da consistência, por meio da avaliação da diferença do ponto de amolecimento, determinado no topo superior e inferior de uma amostra de asfalto modificado (Bastidas, 2017).

De acordo com Souza (2010) os resultados obtidos da diferença entre os pontos de amolecimento, são reportados e usados como uma diretriz para estabelecer procedimentos para o manuseamento de campo. Grandes diferenças nos valores de separação indicam que a agitação do material deve ser mantida durante o armazenamento.

Os resultados deste ensaio estão expostos na Tabela 1. As diferenças entre o ponto de amolecimento da base e do topo do recipiente metálico onde são armazenados os ligantes representam a tendência que o ligante com a modificação tem à separação de fase.

Tabela 1 - Ensaio de estabilidade à estocagem.

Tipo	Ponto de Amolecimento Topo (°C)	Ponto de Amolecimento Base (°C)	Diferença (°C)
Puro	53	53,5	0,5
2% BO	54,5	61	6,5
5% BO	55	62,5	7,5
8% BO	56	65,5	9,5
2% PET	55	59	4,0
5% PET	61,5	66	4,5
8% PET	61	66,5	5,5

Fonte: Autor (2020).

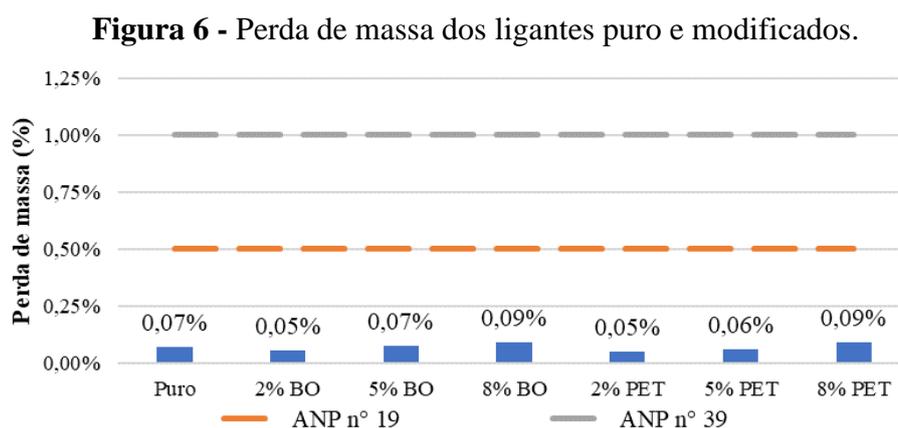
Pode-se observar na Tabela 1, que os ligantes modificados com a BO apresentaram diferenças maiores na temperatura de ponto de amolecimento. Takallou e Sainton (1992) pesquisaram a possibilidade da utilização de catalisadores e óleos na mistura a fim de melhorar a reação entre a borracha de pneu e o ligante asfáltico, os mesmos afirmam que um catalisador ou um pré-tratamento pode permitir que a BO aja na composição como um agregado elástico, para melhorar propriedades elásticas do pavimento de concreto asfáltico e reduzir a suscetibilidade à temperatura.

Mohammed e Hussein (2014) obtiveram diferenças menores em seu estudo com PET, nele a maior diferença entre o ponto de amolecimento foi de 2,5 e se deu na amostra de 5%. Os autores ainda realizam observações com relação as amostras de topo e de base, para eles as amostras da seção superior são mais elásticas, enquanto na parte inferior as amostras são mais viscosas do que seus ligantes modificados originais.

3.2 Reologia Fundamental

3.2.1 Envelhecimento à curto prazo

Na Figura 6 demonstra-se a perda de massa dos ligantes puro e modificados em comparação com a ANP n°19 e a ANP n° 39.



A Figura 6 apresenta os valores percentuais da variação de massa dos ligantes após o procedimento de envelhecimento do ligante à curto prazo. Segundo a resolução da ANP n° 19 (2005), a variação de massa máxima permitida é de 0,5%, dessa forma, todos os ligantes avaliados atenderam a essa especificação.

As variações de massa dos ligantes modificados por PET e BO também atendem ao valor estabelecido na ANP n° 39 (2008), que define como limite permitido a variação de 1% para os ligantes modificados por borracha.

Pode-se observar que com o aumento dos teores de BO e PET houve uma perda progressiva de massa, além da semelhança dos resultados obtidos para esses dois polímeros. Os ligantes com 2% de PET e BO e 5% de PET apresentaram perda de massa inferior ao do ligante puro, utilizado como referência, indicando um ganho de estabilidade nas propriedades do ligante quando sujeito à temperatura elevada e oxidação.

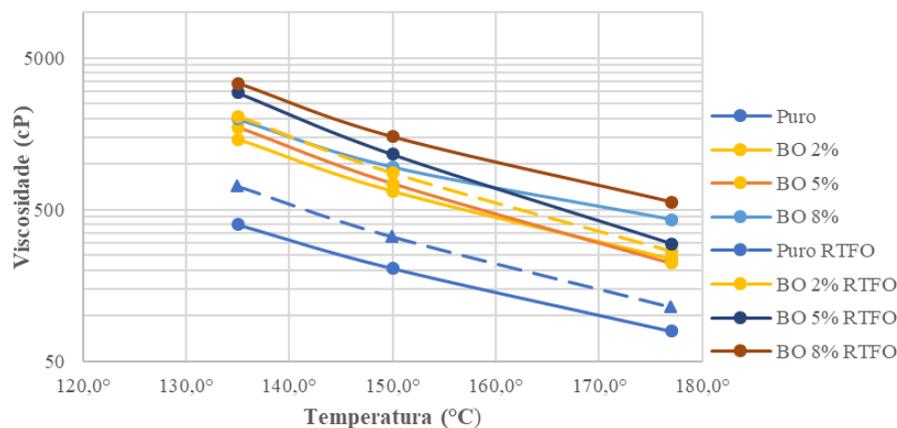
Como os resultados da variação de massa obtidos a partir do envelhecimento dos ligantes foi significativamente baixo, isso implica que o ganho ocorrido na penetração retida não tem ligação com resistência ao envelhecimento, e sim com a rigidez que possui um valor tão elevado que não é possível haver um acréscimo significativo. Avaliando-se também o ponto de amolecimento, percebe-se que as variações foram muito pequenas, não ficando claro nenhum

benefício quanto à resistência ao envelhecimento.

3.2.2 Viscosidade rotacional

A viscosidade do CAP puro e com adição de BO antes e após RTFO é ilustrada na Figura 7.

Figura 7 - Viscosidade do CAP puro e com adição de BO antes e após do RTFO.



Fonte: Autor (2020).

A Figura 7 demonstra os valores de viscosidade obtidos para o ligante puro que são de 397,5 cP, 205 cP e 79 cP para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C respectivamente e os mesmos estão em conformidade com os limites estabelecidos pela ANP n° 19 (2005) para o CAP 50/70. Os resultados obtidos nos ensaios de viscosidade rotacional antes e após RTFO para o ligante puro e modificado por BO estão ilustrados na Figura 7.

Analisando os resultados de viscosidade dispostos na Figura 7, para os ligantes modificados com adição de BO, pode-se observar que o ligante puro possui menor viscosidade. Por conseguinte, constata-se também que o valor do parâmetro analisado cresce com o aumento do teor de BO, indicando que o ligante se torna menos fluido com o acréscimo de borracha, conforme esperado.

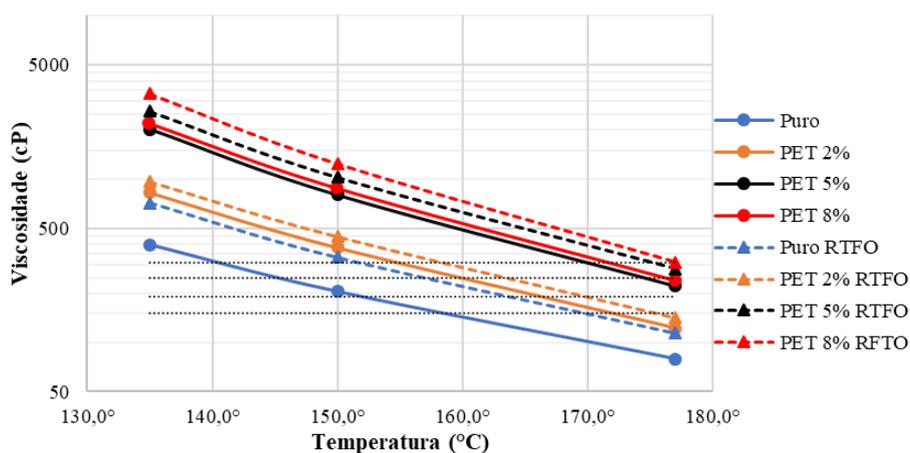
Liu *et al.* (2014), em sua pesquisa, obteve resultados de viscosidade que estão em conformidade com os obtidos nesta pesquisa, os autores acreditam que o aumento na viscosidade do asfalto borracha seja causado pela adição de borracha triturada ao aglutinante, que o torna mais aderente.

Em sua pesquisa com adição de borracha de pneu, Specht (2004) afirma que a comparação da viscosidade dos ligantes virgens e envelhecidos permite verificar sempre um

aumento expressivo na viscosidade, proporcional ao teor de borracha adicionado. Todavia, nota-se que a susceptibilidade térmica aumenta de maneira mais expressiva para o ligante com baixos teores de borracha quando comparamos o mesmo ligante na condição com e sem envelhecimento.

Os resultados encontrados com o ensaio utilizando-se o ligante modificado com PET está representado na Figura 8.

Figura 8 - Viscosidade do CAP puro e com adição de PET antes e após do RTFO.



Fonte: Autor (2020).

Ao comparar a Figura 8 com a Figura 7 nota-se que não há presença de valores discrepantes aos resultados encontrados nos ensaios de viscosidade com os ligantes com BO, sendo assim os ligantes modificados com PET também obtiveram valores altos para a viscosidade. Observa-se que os teores de 5% e 8% de PET estão sobrepostos indicando que o teor de 8% não apresenta aumento de interação CAP/PET. Na verdade, essa interação é afetada, visto que após RTFO o aumento de viscosidade é maior.

Em seu estudo com adição de PET ao ligante, Kalantar et al. (2010) também obtém resultados de viscosidade que mostram que o incremento de PET corrobora para o aumento da viscosidade do ligante asfáltico. Silva *et al.* (2018) em concordância com esses resultados, complementa que uma diminuição perceptível no resultado da viscosidade proveniente do domínio do fenol formaldeído foi observada em concentrações de 5% de PET. Ademais, os autores afirmam que a utilização desses ligantes é preferível em locais de clima quente e tráfego pesado, uma vez que proporciona melhor resistência à deformação permanente.

Após o envelhecimento dos ligantes modificados, assim como do ligante puro, houve aumento na consistência resultante do aumento da rigidez do ligante devido a oxidação e a evaporação das frações voláteis.

O manual de projeto de misturas asfálticas do Superpave (Asphalt Institute, 2000) estabelece que as temperaturas de usinagem e compactação são aquelas onde o ligante asfáltico apresenta uma viscosidade Brookfield mínima de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e máxima de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. De acordo com as especificações contidas no referido manual as temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes estudados nesta pesquisa estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Temperaturas de usinagem e compactação.

Ligante	Usinagem		Compactação	
CAP puro	152,0	158,5	140,5	145,0
BO2%	177,0		170,0	175,0
BO5%	177,0		170,0	173,0
BO8%	177,0		177,0	
PET2%	166,0	172,5	155,0	160,0
PET5%	177,0		170,0	175,0
PET8%	177,0		171,5	177,0

Fonte: Autor (2020).

A Tabela 2 apresenta os valores da temperatura, em ° C, de compactação e usinagem do ligante de referência e dos ligantes modificados. Pode-se observar que a modificação resultou no incremento da temperatura de serviço dos ligantes, principalmente nos ligantes modificados por adição de BO. É importante ressaltar que a necessidade de altas temperaturas dificulta a trabalhabilidade.

Para obtenção das temperaturas de utilização dos ligantes, nos quais os limites não interceptavam as curvas, foi realizado o prolongamento e quando esses valores ultrapassavam os 177°C, era estabelecido essa como a temperatura de uso, visto que essa é temperatura máxima de utilização de acordo com a metodologia Superpave.

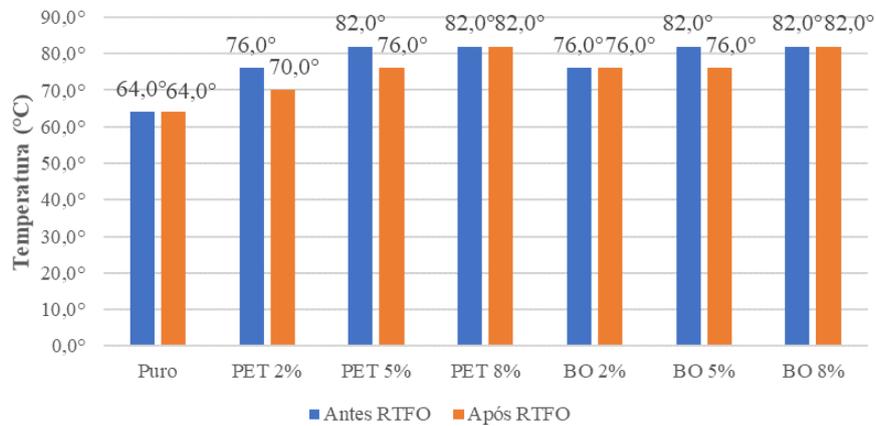
3.2.3 Grau de desempenho – PG

Considerando que o Brasil é um país que possui preponderantemente clima tropical, com temperaturas médias de 25°C, foi descartada a necessidade de estabelecer as temperaturas mínimas de utilização.

Esse parâmetro indica a qual temperatura máxima o pavimento pode estar sujeito levando em consideração as propriedades físicas do ligante. Como a temperatura de PG do ligante puro foi de 64°C, essa é a temperatura de utilização à qual o mesmo pode ser imposto, classificando-o como PG 64-XX.

Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figura 9 e representam as temperaturas máximas de PG antes e após RTFO.

Figura 9 - Grau de desempenho para os ligantes puro, com adição de PET e com adição de BO.



Fonte: Autor (2020).

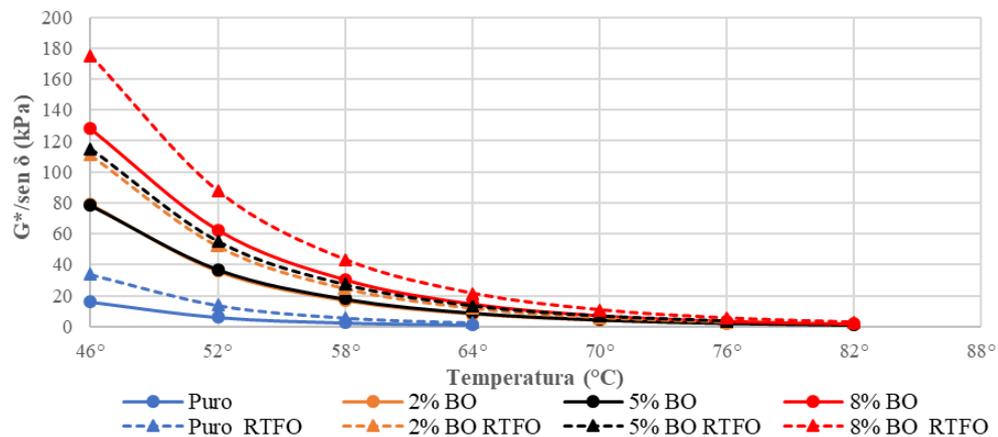
Como apresentado na Figura 9, a modificação do ligante com BO resultou no aumento de PG em relação ao ligante puro, esse aumento foi de 3 degraus (18°C) quando se compara o maior teor de BO com o ligante puro. Esse resultado demonstra um comportamento favorável da reação entre a BO e o ligante, agindo na melhoria da performance do ligante quando sujeito a altas temperaturas e condições de tráfego pesado.

Specht (2004) ensaiou os ligantes asfálticos modificados com borracha para temperaturas mínimas e máximas e a partir da análise reológica nota-se que a partir da adição de borracha, existe a possibilidade da utilização dos ligantes em uma amplitude maior de temperaturas, tanto em alta quanto em baixa. Em sua pesquisa, de forma similar a esta, em algumas situações de incremento de borracha não há alteração do PG, isso é explicado pelo autor pela escala de temperaturas da especificação que é de 6°C.

Observando a Figura 9, de forma análoga aos resultados encontrados na inserção de BO, a adição de PET resultou no aumento da temperatura de utilização do ligante asfáltico. Pode-se observar nos resultados para o teor de 2% BO que o PG é de 76°C e que a modificação não sofreu com o RTFO, já com 5% BO houve um aumento de rigidez significativo aumentando a temperatura antes do RTFO para 82 °C, porém menos significativa para a amostra após RTFO, ocorrendo a consolidação do aumento de rigidez para o teor de 8% BO. No caso do PET, esse aumento de rigidez foi escalonado para as amostras: 2% com 70°C, 5% com 76°C e 8% com 82°C. Essa variação é normal para as amostras antes e após RTFO e demonstra que a fração antes do RTFO ficou próxima do limite de falha ou a amostra após RTFO faliu por pouco.

A Figura 10 ilustra as curvas da temperatura na faixa de 46°C a 82°C versus $G^*/\text{sen } \delta$ para as amostras de ligante puro e modificados com BO, antes e após o procedimento do RTFO.

Figura 10 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura antes e após RTFO com adição de BO.



Fonte: Autor (2020).

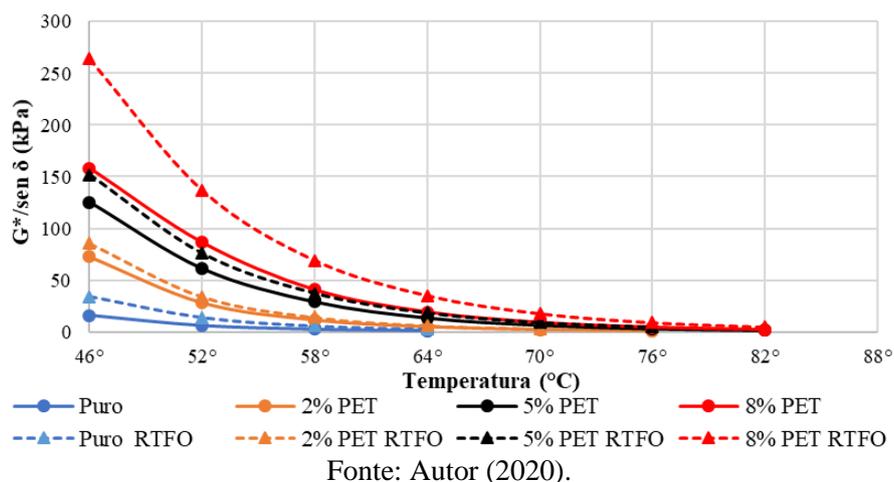
O parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ relaciona a rigidez e o ângulo de fase. As curvas da Figura 10 apresentam proporcionalidade no aumento dos teores de BO e do parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$, isto posto, o teor de 8% de BO apresentou os valores mais elevados de rigidez, influenciando positivamente na resistência a deformação permanente.

Analisando as curvas exibidas na Figura 10, pode-se perceber que com o acréscimo de BO houve um incremento na temperatura de utilização do ligante. Na análise do teor de 2% de BO, observa-se que o parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ quadruplicou quando comparado com o ligante puro, para os resultados obtidos antes do RTFO.

Esses resultados estão em conformidade com o estudo desenvolvido por Tabatabaee *et al.* (2009), onde os mesmos afirmam que o valor de $G^*/\text{sen } \delta$ aumenta proporcionalmente com o teor de borracha, atingindo a temperatura de utilização de 82°C, onde este parâmetro alcança o seu valor de 1,0 kPa, limite estabelecido para a determinação do valor máximo antes do procedimento de envelhecimento.

Já a Figura 11 apresenta as curvas da temperatura na faixa de 46°C a 82°C versus $G^*/\text{sen } \delta$ para as amostras de ligante puro e modificado com PET.

Figura 11 - Curvas do $G^*/\text{sen } \delta$ versus temperatura antes e após RTFO com adição de PET.



Em concordância com os resultados obtidos Kalantar *et al.* (2010), em sua pesquisa, onde afirma que o aumento da porcentagem de PET proporciona a elevação do valor de $G^*/\text{sen } \delta$, pode-se observar na Figura 11 que essa elevação aconteceu para todos os teores de PET acrescidos. A elevação do valor de $G^*/\text{sen } \delta$ provoca melhorias no grau de desempenho do ligante asfáltico, além de promover aumento na resistência do asfalto a ação do tráfego. Como consequência disso, concretos asfálticos usinados à quente com alta resistência de utilização são produzidos com adição de PET em temperaturas de serviço de pavimento relativamente altas, como 76 °C.

Com o processo de envelhecimento dos ligantes e com o aumento da rigidez dos mesmos, obteve-se um incremento no valor do parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$, resultando no aumento da resistência do pavimento às deformações permanentes.

Comparando-se os valores obtidos para o $G^*/\text{sen } \delta$ da modificação com a BO e com o PET, é notável que a adição do PET ocasionou maior incremento no parâmetro em questão, resultando na maior rigidez do ligante asfáltico. As modificações resultaram em temperaturas de PG equivalentes, ou seja, ambos os polímeros possibilitaram o aumento da faixa de utilização do ligante, conforme exposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo dos valores de Curvas do $G^*/\text{sen}\delta$ versus temperatura.

T (°C)	2% BO	5% BO	8% BO	2% PET	5% PET	8% PET	2% RTFO	5% BO RTFO	8% BO RTFO	2% PET RTFO	5% PET RTFO	8% PET RTFO
46°	79,1	78,2	128	72,5	125	158	111	115	175	85,3	152	264
52°	35,7	36,9	62,5	28	61,1	86,2	51,9	55,1	87,5	34	76	137
58°	16,6	17,9	30,4	11,3	29,1	40,5	24,5	27,1	43,2	14	37,3	69,1
64°	7,86	8,93	14,7	4,77	13,6	19,1	11,8	13,4	21,4	6	18,2	34,9
70°	3,82	4,53	7,17	2,14	6,55	9,07	5,79	6,84	10,7	2,72	8,88	17,5
76°	1,92	2,32	3,54	1,02	3,19	4,33	2,89	3,57	5,4		4,39	8,77
82°		1,18	1,78		1,57	2,1			2,76			4,45

Fonte: Autor (2020).

A Tabela 3 resume os valores de Curvas do $G^*/\text{sen}\delta$ versus temperatura demonstra que ambas modificações ocasionaram o aumento do $G^*/\text{sen}\delta$ e a conseqüente elevação da temperatura de PG, essa variação é decorrente da maior viscosidade e rigidez proporcionada pela modificação do PET e da BO, indicando que a adição desses polímeros ocasionou um maior acréscimo no módulo Complexo (G^*) quando comparado ao $\text{sen}\delta$.

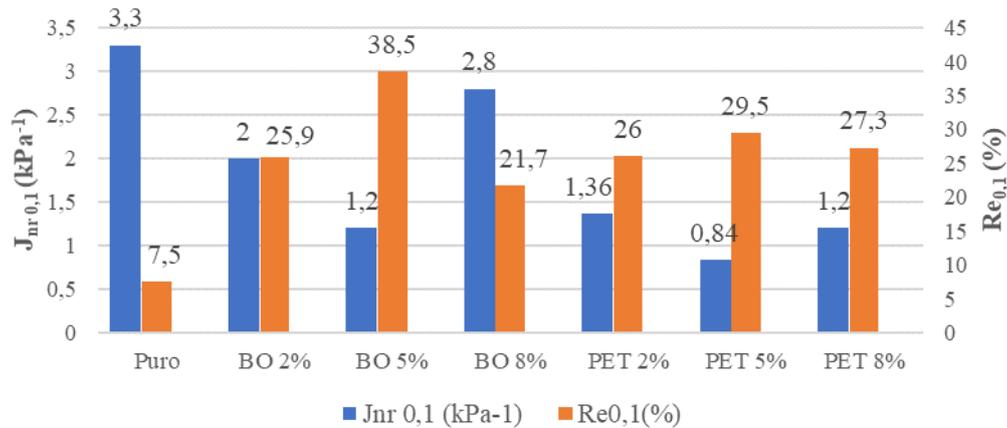
3.2.4 Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR

A execução do MSCR é feita com a amostra submetida ao envelhecimento de curto prazo no RTFO. No ensaio é utilizado o reômetro de cisalhamento (DSR) para aplicar uma carga constante que é estabelecida pela norma ASTM D7405-15, cujos valores admitidos são de 100 e 3200 Pa, o tempo de execução dessa carga é determinado em 1s e 9s de repouso, sendo assim, formando um ciclo que é repetido por 10 vezes (Mello, 2014).

O ensaio de MSCR possibilitou a obtenção da compliância não recuperável (J_{nr}), parâmetro este que permite avaliar a susceptibilidade ao acúmulo de deformação permanente, o percentual de recuperação (%Re), onde são fornecidos dados da elasticidade, e a diferença de percentual entre as compliâncias não-recuperáveis (J_{nr} , diff), que permite relacionar a sensibilidade ao aumento do nível de tensão.

A seguir, a Figura 12 demonstra os resultados do MSCR sobre a compliância não-recuperável (J_{nr}) e percentual de recuperação (%Re) para adição de BO e adição de PET a tensão de 0,1 kPa.

Figura 12 - Compliância não-recuperável (J_{nr}) e percentual de recuperação (%Re) para adição de BO e adição de PET a tensão de 0,1 kPa.



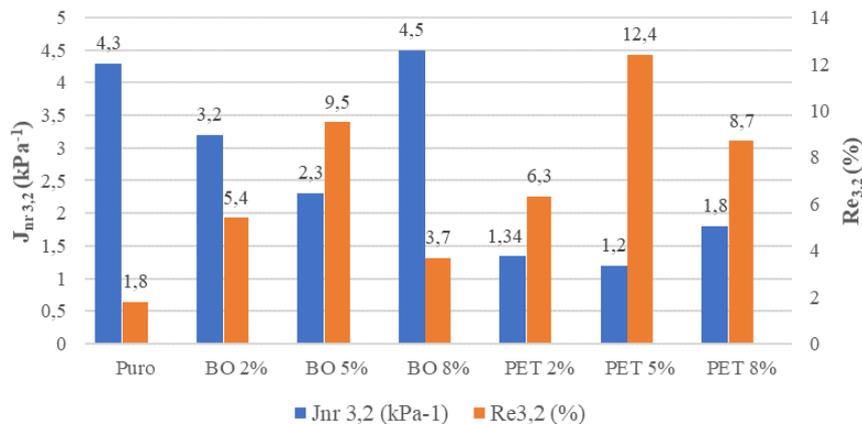
Fonte: Autor (2020).

De acordo com as Figuras 12 e 13, com a modificação de BO observou-se a redução nos valores da compliância não-recuperável quando comparado com o ligante puro, essa diminuição ocorre em todos os teores para a tensão de 0,1 kPa-1 e nos teores de 2% e 5% para a tensão de 3,2 kPa-1. Como as temperaturas de ensaio para os ligantes com teores de 2% e 5% de BO é de 76°C, e para 8% a temperatura é de 82 °C não há como fazer uma comparação direta entre os resultados do parâmetro, porém pode-se afirmar que para a temperatura de desempenho do teor de 8% o mesmo pode ser aplicado para um tráfego muito maior do que o ligante puro.

Para Kim *et al.* (2010) os ligantes com adição de borracha de pneu diminuíram visivelmente os valores de compliância não-recuperável conforme o teor de borracha aumentou, sugerindo que os ligantes com borracha melhoraram a resistência à penetração em temperaturas em serviço.

A Figura 13 retrata os resultados da simulação de tráfego para compliância não-recuperável (J_{nr}) e percentual de recuperação (%Re) para adição de BO e adição de PET a tensão de 3,2 kPa.

Figura 13 - Compliância não-recuperável (J_{nr}) e percentual de recuperação (%Re) para adição de BO e adição de PET a tensão de 3,2 kPa.



Fonte: Autor (2020).

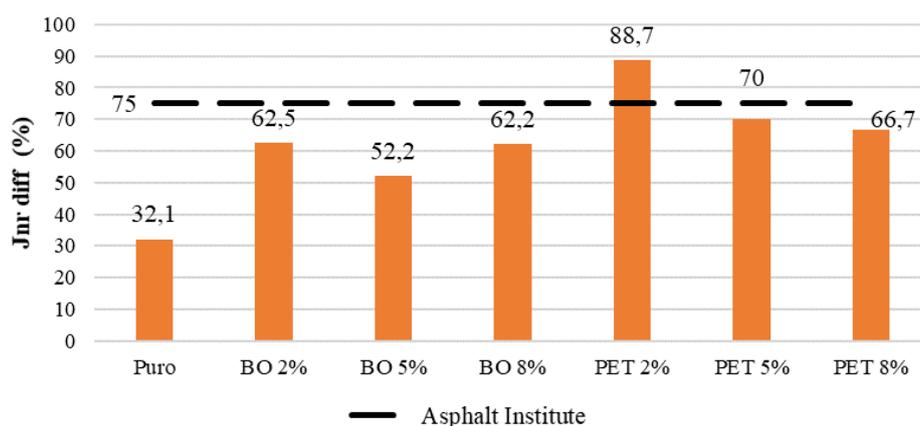
Ao analisar as Figuras 12 e 13 pode-se afirmar que o teor de 5% de BO propiciou os melhores valores para o J_{nr} e %Re nas duas simulações de tráfego. Dessa forma, verifica-se que a adição de BO proporciona melhor desempenho ao asfalto, visto que o aumento da sua elasticidade diminui o acúmulo de deformação plásticas no revestimento.

Ainda analisando as Figuras 12 e 13, observam-se os resultados obtidos com a avaliação dos teores modificados com o PET. Observa-se que a adição do polímero favoreceu o aumento da resistência à deformação permanente e à recuperação elástica, porém, com o aumento dos teores, não houve uma variação significativa nos valores encontrados para os parâmetros em análise. Salientando-se que mesmo com a elevada temperatura do ensaio, o teor de 8% de PET apresenta um bom comportamento, sendo aplicado ao tráfego pesado.

Comparando-se esses dois parâmetros para as amostras modificadas, nota-se que o acréscimo de 5% de PET no ligante promoveu o melhor resultado para a compliância não-recuperável, para ambas aplicações de tensão. Quanto à porcentagem de recuperação, observou-se que o ligante modificado com BO apresentou valores mais favoráveis para minimizar o acúmulo de deformações plásticas quando submetidos a simulação de tráfego normal, porém os teores de 5% e 8% de PET provocaram uma melhoria significativa na simulação de tráfego intenso.

A diferença percentual (J_{nr} , diff) para os ligantes puro e modificados e o limite de J_{nr} estão demonstrados na Figura 14.

Figura 14 - Diferença percentual (Jnr, diff) para os ligantes puro e modificados.



Fonte: Autor (2020).

De acordo com o Asphalt Institute (2000), o valor de Jnr, diff corresponde a diferença do Jnr 0,1 e Jnr 3,2 e não deve exceder o limite de 75%, a fim de garantir que o ligante não seja muito sensível a variação de tensão. Os resultados obtidos para esse parâmetro estão representados na Figura 14 e o ligante modificado que não atendeu a essa especificação foi o teor de 2% de PET, indicando que o mesmo é muito sensível a variação abrupta de tráfego.

A seguir a classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de Jnr disponível na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de Jnr.

Propriedade	Jnr (3,2 kPa) máx	Tipo de tráfego	Número de passadas em um eixo padrão
Jnr à 3,2 kPa na temperatura máxima de PG	4	Padrão (S)	< 10 milhões
	2	Pesado (H)	> 10 milhões
	1	Muito pesado (V)	> 30 milhões
	0,5	Extremamente pesado (E)	> 100 milhões

Fonte: AASHTO M 320 (2016).

O Federal Highway Administration - FHWA (2002) estabeleceu um critério em função do valor de Jnr 3,2 kPa. O mesmo se baseia no número de passadas de um eixo padrão que pode ser suportada pelo pavimento, como demonstrado na Tabela 4. A classificação dos níveis de tráfego para a utilização dos ligantes estudados está disposta na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação de volume de tráfego baseado no valor de J_{nr} a 3,2 kPa.

Tipo	$J_{nr, 3,2}$ (kPa ⁻¹)	PG (°C)	Nível de tráfego
Puro	4,3	64	-
BO 2%	3,2	76	Padrão (S)
BO 5%	2,3	76	Padrão (S)
BO 8%	4,5	82	-
PET 2%	1,34	70	Pesado (H)
PET 5%	1,2	76	Pesado (H)
PET 8%	1,8	82	Pesado (H)

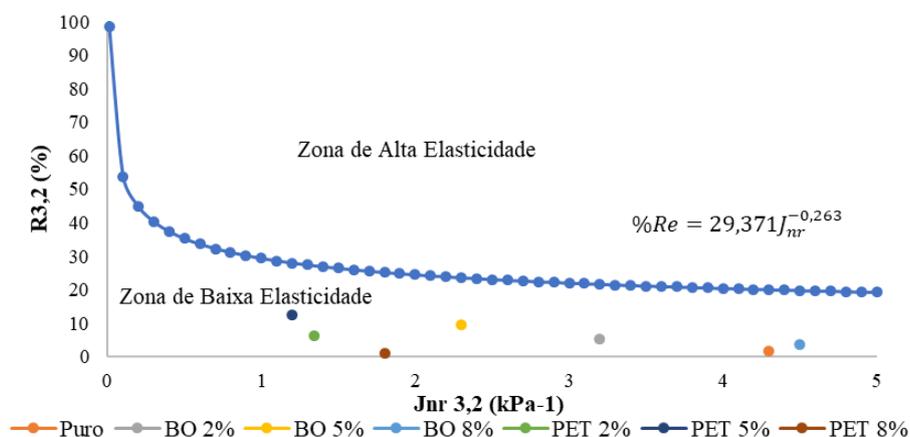
Fonte: Autor (2020).

A Tabela 5 explana que para cada quantidade de ligante puro e modificado há diferenças de níveis de tráfego, por exemplo do tipo BO 5% com 2,3 de J_{nr} 3,2 kPa, classifica-se para nível de tráfego Padrão (S) de acordo com a Tabela 4.

A normativa da AASHTO TP 70-13 introduziu uma apresentação gráfica em formato de curva a fim de analisar a resposta elástica do ligante modificado em elevada temperatura. Este gráfico é definido pela equação $y = 29,371J_{nr}^{-0,263}$ e possibilita a avaliação da quantidade ideal de polímero.

A Figura 15 possui a curva de porcentagem recuperação versus compliância não-recuperável (J_{nr}) a 3,2 kPa-1 baseada na fórmula $y = 29,371J_{nr}^{-0,263}$.

Figura 15 - Curva de porcentagem e recuperação versus compliância não-recuperável (J_{nr}) a 3,2 kPa-1.



Fonte: Autor (2020).

O mesmo é dividido em zonas distintas que representam duas situações de elasticidade, uma na qual o ligante apresenta boa resposta elástica e outra na qual o mesmo apresenta uma falha, conforme exposto na Figura 15.

Todos os ligantes avaliados nesta pesquisa apresentaram uma resposta negativa quanto a elasticidade em suas respectivas temperaturas de PG, mesmo a borracha de pneu que se caracteriza como um polímero elastômero e tende a favorecer tal característica no ligante.

Além disso, Silva (2015) concluiu também em sua pesquisa que o ligante modificado com PET possui baixa plasticidade e justifica que este fato era esperado ao analisar as propriedades físicas de ligantes modificados com PET, verifica que a adição deste resíduo promove diminuição na recuperação elástica do material.

Porém sabendo que a temperatura influi de forma significativa nos resultados desse ensaio, a utilização da temperatura de PG do ligante puro pode beneficiar essa característica.

4. Considerações Finais

Por meio da realização desta pesquisa avaliou-se a influência da adição de PET e de borracha de pneu no ligante asfáltico CAP 50/70, as análises foram elaboradas a partir da realização de ensaios de reologia empírica e fundamental.

Os resultados indicam que a rigidez dos ligantes aumentou com a utilização de teores mais elevados dos polímeros, porém foi constatada que essa variação se deu de forma mais considerável nas modificações com a utilização do teor de 8% de PET, visto que a natureza polimérica desse resíduo apresenta uma cadeia tridimensional rígida proporcionando uma grande resistência inicial. Esse aumento de rigidez proporciona maior resistência às deformações permanentes a altas temperaturas.

Com o aumento dos teores de borracha obteve-se um incremento da elasticidade do ligante comprovado pelos resultados de recuperação elástica apresentados pelo mesmo, onde o teor de 5% de BO apresentou melhor desempenho para simulação de tráfego normal, também proporcionando melhoria na resistência à deformação permanente por possuir rápida recuperação após a aplicação de carga. A modificação de PET favorece de forma mais efetiva esse parâmetro quando analisado com carga de tráfego intenso.

Os elevados valores de viscosidade dos ligantes modificados não favorecem a trabalhabilidade do mesmo, pois elevam a temperatura de utilização e provocam custos mais elevados para execução do projeto. Contudo, a maior rigidez proporcionada por essas modificações estende a vida útil do pavimento, propiciando benefícios econômicos a longo

prazo, com sua utilização.

O processo de envelhecimento à curto prazo não promoveu aumento significativo de perda de massa nos teores mais elevados de modificação, indicando que a adição desses polímeros não influi na resistência ao envelhecimento. Dessa forma, o aumento do ponto de amolecimento, da penetração retida e do índice de susceptibilidade térmica, é justificado pela intensificação da rigidez após o envelhecimento. As modificações propiciaram também a elevação da temperatura de utilização dos ligantes, permitindo o emprego dos mesmos em regiões com climas mais tórridos, porém esse aumento prejudica a utilização desses ligantes em climas mais frios, visto que essa rigidez favorece o trincamento térmico.

Ao longo da pesquisa observou-se certa equiparação com os resultados encontrados para os dois polímeros, principalmente nos valores obtidos com os ensaios de ponto de amolecimento e penetração, porém destaca-se que a utilização de borracha de pneu promoveu a obtenção de valores mais elevados de viscosidade e separação de fase, proporcionando um maior grau de complexidade para sua utilização em campo.

A partir da análise dos dados de reologia fundamental, pode-se concluir que para a inserção de PET, o teor de 8% propiciou alterações mais favoráveis, associando a temperatura na qual o mesmo foi ensaiado (82°C), com o aumento da resistência à deformação e ao percentual de recuperação, podendo ser utilizado para situações de tráfego pesado. Os resultados quanto à viscosidade indicam um aumento considerável na consistência do ligante, porém é consenso na literatura que a utilização de ligantes modificados por polímeros exigem temperaturas mais elevadas de usinagem e compactação. Paralelamente, a utilização desse teor propicia uma maior destinação de resíduo à atividade de pavimentação, reinserindo uma maior quantidade do mesmo a um novo ciclo produtivo.

Associando os resultados de compliância não-recuperável, percentual de recuperação e percentual entre as compliâncias não-recuperáveis, pode-se afirmar que a adição de 5% de borracha de pneu favorece características mais significativas dos ligantes. Em comparação entre o ligante puro e os outros teores de BO, as adições propiciam o aumento da resistência à deformação permanente, contribuem para melhoria na resistência às trincas por fadiga e possuem maior porcentagem de recuperação elástica, sendo utilizável numa faixa de tráfego padrão.

Conclui-se assim, que as adições de borracha de pneu ou de PET no ligante asfáltico são opções viáveis para a utilização desses resíduos em um novo ciclo produtivo, entretanto o PET apresentou ganhos mais interessantes da característica da massa asfáltica em teores mais altos, enquanto a borracha de pneu, mesmo nos menores teores, geraria diminuição nos parâmetros

de trabalhabilidade do revestimento.

Com a finalidade de enriquecer o tema é necessário a realização de pesquisas futuras a fim de sanar algumas lacunas existentes e aprimorar o entendimento da modificação dos parâmetros reológicos com a inserção do PET e da borracha de pneu. Sugere-se: Avaliar as propriedades reológicas variando-se o tempo de mistura, a temperatura e a quantidade de rotações por minuto no procedimento de inserção do polímero ao ligantes; Realizar a adição de compatibilizantes a fim de aumentar a homogeneidade do ligante asfáltico modificado e sua trabalhabilidade e por fim utilizar os ligantes asfálticos com classificações distintas, com intuito de verificar para qual situação os modificadores aumentam o desempenho do ligante mais significativamente.

Referências

AASHTO TP70. (2013). *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Washington D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABNT NBR 6560. (2000). *Materiais betuminosos: determinação do ponto de amolecimento: método do anel e bola*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 15184. (2004). *Materiais betuminosos: determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANP. (2005). *Resolução ANP nº 19, de 11 de julho de 2005*. Brasília, DF: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Anexo I.

ANP. (2008). *Resolução ANP nº 39, de 24 de dezembro de 2008*. Rio de Janeiro: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

NCHRP 9-10. (2000). *Superpave protocols for modified asphalt binders*. (Preliminary Draft).183p. Lexington: Asphalt Institute.

ASTM D2872-04. (2005). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing Materials.

ASTM D5892-15. (1996). *Annual Book of Standard Specification for Type IV Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction*. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing Materials.

ASTM D6373-16. (2016). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing Materials.

ASTM D7405-15. (2015). *Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing Materials.

Bastidas, J. G. (2017). *Asfaltos e misturas modificados com materiais alternativos*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-138/17. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, DF, Brasília, Brasil.

Bernucci, L. L. B., Motta, L. M. G, Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B. (2010). *Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros*. Petrobras: Abeda, Rio de Janeiro.

Bringel, R. M. (2007). *Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.

CNT. (2018). *Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas*. Brasília: Confederação Nacional do Transporte.

Chen, J. S., Liao, M. C., & Lin, C. H. (2003). Determination of polymer content in modified bitumen. *Materials and structures*, 36(9), 594-598.

Djaffar, S. B., Samy, D., & Khadidja, A. M. (2013). Rheological properties and storage stability of SEBS polymer modified bitumen. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5(5), 1031.

FHWA. (2002). *Superpave Binder Specification*. Washington DC: Federal Highway Administration.

Kalantar, Z. N., Mahrez, A., & Karim, M. R. (2010). Properties of bituminous binder modified with waste polyethylene terephthalate (PET). *Proceeding of Malaysian Universities Transportation Research Forum and Conferences*. University Tenaga Nasional, Putrajaya, Malásia.

Kim, H. S., Lee, S. J., & Amirhanian, S. (2010). Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(6), 839-843.

Liu, H., Chen, Z., Wang, W., Wang, H., & Hao, P. (2014). Investigation of the rheological modification mechanism of crumb rubber modified asphalt (CRMA) containing TOR additive. *Construction and Building Materials*, 67, 225-233.

Marinho Filho, P. G. T. *Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

Mohammed, D. T., & Hussein, Z. H. (2014). Evaluation of Pyrolysis PET Utilization in Asphalt Binder. *Evaluation*, 3(9).

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

Nunes, C. G. L. (2019). *Estudo do comportamento de misturas asfálticas modificadas por borracha de pneus inservíveis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.

Oda, S. (2000). *Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação*. Tese de Doutorado em Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil.

Spechet, L. P. (2004). *Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus*. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS.

Silva, J. D. A. A., Rodrigues, J. K. G., Carvalho, M. W. D., Lucena, L. C. D. F. L., & Cavalcante, E. H. (2018). Rheological evaluation of binder modified with Micronized Polyethylene Terephthalate (PET). *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(1).

Silva, J. A. A. (2015). *Utilização do politereftalato de etileno (PET) em misturas asfálticas*. Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

Souza, M.V. R. (2010). *Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, DF, Brasília, Brasil.

Sulyman, M., Haponiuk, J., & Formela, K. (2016). Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(2), 100-108.

Takallou, B. H., & Sainton A. (1992) .Advances in technology of asphalt paving material containing used tired rubber. *Transportation Research Record*. Washington, n.1339.

Tabatabaee, N., Sabouri, M., Tabatabaee, H., & Teymourpour, P. (2009). Evaluation of performance grading parameters for crumb rubber modied asphalt binders and mixtures. *In: Proceedings of 7th international RILEM symposium on advanced testing and characterization of bituminous materials (Vol. 1)*.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Adriano Lopes Gualberto Filho – 20 %

Daniel Beserra Costa – 10 %

Damares de Sá Ramalho Neta – 20 %

Giovanna Feitosa de Lima – 10 %

Larissa Santana Batista – 10 %

Nayla Kelly Antunes de Oliveira – 30 %