

19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48^a Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS COM BORRACHA E POLÍMERO SBS: PROPRIEDADES REOLÓGICAS E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DA MISTURA

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Andressa Zampieri Rosa¹; Gustavo Oliveira Couto²; Jesner Sereni Ildefonso³; Fabricio de França Fernandes⁴; Thiago Henrique Borsato⁵ & Luiz Henrique de Assis Fagundes⁶

RESUMO

A utilização de ligantes asfálticos modificados se configura em uma solução cada vez mais usual nas obras de pavimentação, principalmente naquelas projetadas para suportar volumes de tráfego mais elevados. Dentre essas misturas asfálticas, as modificadas tendem a apresentar um incremento nas propriedades e consequente maximização no desempenho ao longo de sua vida útil. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de três ligantes asfálticos distintos: o CAP convencional 50/70, o AMB 8 formulado em laboratório com 15% de pó de pneu e o AMP 60/85-E modificado com 3,5% de SBS. Para a análise, empregou-se a avaliação do grau de desempenho por meio da Classificação PG, o ensaio de fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR), a avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS) e, por fim, o teste roda de Hamburgo em misturas asfálticas compactadas (DWT *Test*) usando corpos de prova com teor de 5,5% para todos os ligantes. Com os referidos ensaios efetuados e realizando uma análise crítica dos resultados, constatou-se que os dois asfaltos modificados testados apresentaram melhor desempenho que o convencional, sendo que o ligante AMB (borracha) alcançou maior resposta elástica, maior resistência à deformação permanente, maior resistência à fadiga e menor afundamento no ensaio roda de Hamburgo dentre as três misturas.

PALAVRAS-CHAVE: Reologia; Fadiga; Roda de Hamburgo; Cisalhamento.

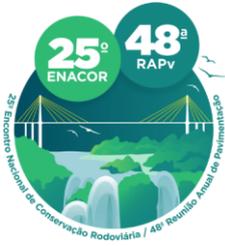
ABSTRACT

The use of modified asphalt binders is an increasingly common solution in paving works, especially in those designed to withstand higher traffic volumes, since modified asphalt mixes tend to increase properties and consequently maximize performance throughout its useful life. In this context, the present work had as objective to evaluate the performance of three different asphalt mixtures: the conventional CAP 50/70, the AMB 8 formulated in the laboratory with 15% of tire dust and the AMP 60/85-E modified with 3,5% SBS. For the analysis, the evaluation of the degree of performance through the PG Classification, the test of creep and recovery of asphalt binder determined under multiple stresses (MSCR), the evaluation of the resistance to fatigue of asphalt binders using linear amplitude sweep was used (LAS) and, finally, the Hamburg wheel test on compacted asphalt mixtures (DWT *Test*) using specimens with a content of 5.5% for all binders. With the referred tests carried out and carrying out a critical analysis of the results, it was verified that the two modified asphalts tested presented better performance than the conventional one, and the AMB binder (rubber) achieved a greater elastic response, greater resistance to permanent deformation, greater resistance fatigue and lower sinking in the Hamburg wheel test among the three mixtures.

KEY WORDS: Rheology; Fatigue; Hamburg wheel tracker; Shear.

¹ Universidade Estadual de Maringá (UEM), andressazrosa@hotmail.com; jsildefonso@uem.br; luizfagundes5@gmail.com; thiagohborsato@gmail.com

² Centro Tecnológico CBAA Asfaltos, ctec-sp@cbaa-asfaltos.com.br; fabricio.fernandes@cbaa-asfaltos.com.br



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A modificação de ligantes asfálticos tem sido uma das técnicas comuns para superar os problemas relacionados ao aumento no volume de tráfego mais pesado nas vias. Além disso, há uma tendência em construir pavimentos mais delgados, devido aos custos altos de operação, falta de recursos e aumento do custo do ligante, causando o surgimento de defeitos precoces no pavimento, diminuindo sua vida útil (KOK e COLAK, 2011). Para tanto, o uso de ligantes modificados por polímeros tem sido uma das soluções para sanar esses problemas. Estudos evidenciam o incremento nas propriedades e desempenho das misturas asfálticas modificadas, apesar do custo mais elevado, os benefícios a longo prazo e a possibilidade da construção de camadas mais finas compensam o custo total (ZHOU et al., 2019).

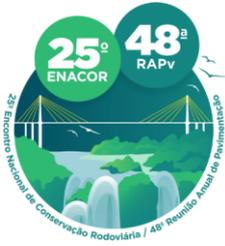
Uma das propriedades melhoradas advinda do asfalto modificado é a resistência à fadiga, que consequentemente proporciona menos manutenção ao pavimento. Dessa forma, análises intrínsecas do material betuminoso e simulações de tráfego na mistura, estão se desenvolvendo para aprimorar as técnicas em busca de melhores desempenhos. Kocak e Kutay (2021) trabalharam com a modificação de ligante com o uso de borracha desvulcanizada em diversas porcentagens, e obtiveram como resultado a melhora no grau de desempenho da mistura às variações de temperaturas e resistência à trinca por fadiga, por meio de varredura de amplitude linear (LAS) e teste de fluência e recuperação de tensão múltipla (MSCR), proporcionando prolongamento da vida útil do material betuminoso.

Na pesquisa realizada por Wang, Cheng e Xio (2017) em que foi utilizada borracha triturada adicionada ao ligante, obtiveram bom desempenho em baixas temperaturas, resistência à fadiga e na propriedade anti envelhecimento. Já Tan et al. (2013), constataram que o pó de borracha como modificador de ligante proporcionou um aumento significativo na razão elástica e diminuição na rigidez e fluência, além disso, testes foram realizados com acréscimo de SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) o que aumentou a razão elástica.

No estudo realizado por Duarte e Faxina (2021), com o objetivo de investigar as propriedades reológicas em alta temperatura de ligantes asfálticos modificados com polietileno de baixa densidade reciclado e borracha triturada, constatou-se que os modificadores aumentaram o parâmetro Superpave e, consequentemente, o PG (Grau de Desempenho) das amostras, bem como melhorou com sucesso o desempenho de alta temperatura dos ligantes, conforme resultado indicado pelo teste MSCR. Na mesma vertente, Wang et al. (2016) constataram, em sua pesquisa, que o asfalto modificado com SBS apresentou melhor resistência ao envelhecimento do que o asfalto convencional. No entanto, o desempenho do asfalto modificado diminuiu com a degradação do SBS no processo de envelhecimento.

Na análise realizada por Mota et al. (2021) em sete ligantes asfálticos (2 puros, 3 modificados por polímero e 2 ligantes asfalto-borracha) e misturas asfálticas com diferentes graduações (densas de 19 mm e graduadas de 12,5 mm), evidenciou que o comportamento em relação à deformação permanente dos ligantes asfálticos, modificados com polímeros e asfalto-borracha apresentam melhor resistência do que os ligantes puros. No entanto, as misturas asfálticas *Gap-Graded* apresentaram valores semelhantes de profundidade de deformação, independente do tipo de ligante asfáltico utilizado em sua composição, o que indica que a gradação da mistura descontínua teve mais influência nos resultados do que a reologia do ligante.

Ainda, Ahmed et al. (2020) avaliou as características dos ligantes asfálticos com borracha por meio do teste MSCR, no qual os resultados mostraram uma melhoria significativa nas propriedades



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



reológicas dos ligantes em relação ao nível de resistência ao tráfego, que aumentou de “Pesado” para o nível “Extremo” com a inserção do modificador.

Kok e Çolak (2011) realizaram testes de reologia de cisalhamento dinâmico em ligante modificado com SBS, borracha e convencional, nos quais os resultados dos testes reológicos e mecânicos tornaram evidente que a modificação da borracha triturada exibiu um desempenho superior em relação às propriedades do ligante convencional e da mistura com SBS. Eles salientaram que o uso de borracha triturada é preferível em relação à modificação com SBS visto que pode fornecer uma significativa redução de custos devido ao alto preço do SBS e também evitará o acúmulo dos resíduos de borracha no meio ambiente.

Em uma investigação realizada por Huang et al. (2021) acerca do desempenho de misturas permeáveis com ligante asfáltico convencional, modificado com SBS e outro com borracha triturada, apresentou, através do ensaio de Roda de Hamburgo, que a mistura com o ligante convencional teve um afundamento 11 mm. Já a amostra com 4% SBS e 20% de borracha teve o afundamento de 2,2 mm. Além disso, os autores citam que a combinação dos dois modificadores é benéfica visto que o SBS contribui para a melhora da propriedade viscoelástica e a borracha resiste mais às deformações.

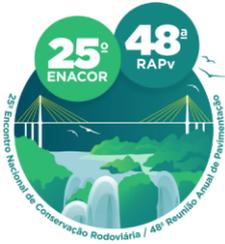
Já Rath et al. (2021) obtiveram resultados satisfatórios no ensaio Roda de Hamburgo para medir a resistência à deformação permanente com a modificação do ligante com borracha que diminuiu de 20 mm no material convencional, pra 5 mm no modificado. Segundo Zhou et al. (2019) o uso combinado de diferentes modificadores pode preservar as vantagens de um único modificador e diminuir as desvantagens, além de melhorar significativamente o desempenho de misturas asfálticas em vários aspectos.

Diante dos resultados encontrados por outros trabalhos e visando desenvolver um produto com um bom desempenho, o objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento das misturas asfálticas por meio de testes em laboratório, com pó de borracha e polímero SBS, além do CAP convencional 50/70, contendo agregados da região norte do Brasil. Dessa forma, as amostras foram desenvolvidas pelo Centro Tecnológico da distribuidora de Asfaltos CBAA Asfaltos LTDA objetivando ter controle total sobre o processo de produção e visando um produto com melhores qualidades. Também corroborar com pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de ligantes modificados e análise do comportamento desse material no que tange à deformação permanente e vida de fadiga.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo foram utilizados agregados pétreos brita e pó de pedra, cal e os ligantes modificados no laboratório para pesquisa de desempenho. Para os agregados, foram realizadas granulometria e ensaios físicos de materiais provenientes de Xinguará – PA (origem granítica). O CAP 50/70 foi disponibilizado pela distribuidora, sendo utilizado para formulação do ligante AMB 8 formulado em laboratório com 15% de pó de pneu (com granulometria 94% passante na peneira #30) e o AMP 60/85-E modificado com 3,5% do polímero SBS. Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico da distribuidora CBAA.

Vale ressaltar que as nomenclaturas utilizada para as amostras seguem especificação conforme a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e acrescentando o “M” que significa “Modificado”, portanto, para o ligante modificado com borracha a terminologia será AMB 8, devido a ideia da correlação da viscosidade com o teor de borracha utilizado para o produto em estudo.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



As formulações foram feitas em laboratório, no misturador de alto cisalhamento em temperatura média de 170 °C, em velocidade de 3600 Rpm por 4 horas para o Asfalto borracha e em 180 °C, durante 3 horas na mesma velocidade para o ligante modificado com SBS. A variação de temperatura entre os dois materiais se deu devido a viscosidade apresentada em diferentes temperaturas. Para uma melhor incorporação foi utilizado o aditivo reticulante para o modificado por polímero, enquanto para o borracha, foi utilizado o aditivo melhorador de estabilidade. Em relação ao processo de modificação, inicialmente o ligante foi pré-aquecido até 170°C. Na sequência, para o ligante que recebeu o SBS foi adicionado insumo aromático, e no que recebeu a borracha um melhorador de incorporação. Com a estabilização da temperatura e da rotação do misturador (Silverson L5M-A), foi adicionado o SBS e a borracha em cada ligante aos poucos. Após permanecer no misturador por aproximadamente 4 horas foi adicionado reticulante apenas no AMP. Posteriormente foram realizados ensaios de especificação de material conforme determinação da ANP. Na Figura 1 é apresentada a sequência de processos realizados.

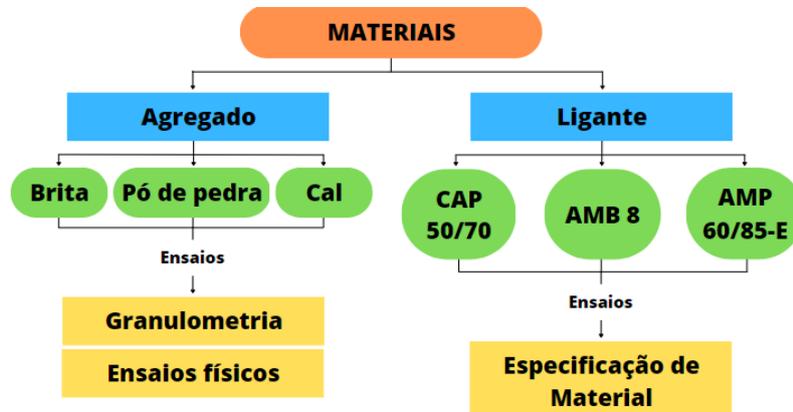


Figura 1. Fluxograma da análise dos materiais

Para análise física dos agregados, foram realizados os ensaios de caracterização, conforme expressos no Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização dos agregados

| Ensaio | Material | Norma | Especificação | Resultado |
|--|-------------|--------------------|-------------------|--------------|
| Equivalente de Areia | Pó de pedra | DNER ME 054 / 97 | Mínimo 55,0% | 76,70 |
| Desgaste Los Angeles | Brita 1 | DNER ME 038 / 98 | Máximo 50,0% | 22,07 |
| Índice de Forma pelo Paquímetro | Brita 1 | NBR 7809:2019 | Mínimo 0,5 | 1,50 |
| Durabilidade pelo emprego de Solução de Sulfato de Sódio | Brita 1 | DNER ME 038 / 98 | Máximo 12,0% | 0,26 |
| Densidade Relativa Real | Pó de pedra | DNIT 411/2021 - ME | - | 2,635 |
| Densidade Relativa Aparente | Pó de pedra | DNIT 411/2021 - ME | - | 2,665 |
| Massa específica real | Pó de pedra | DNIT 411/2021 - ME | g/cm ³ | 2,627 |
| Massa específica aparente - Pó de Pedra | Pó de pedra | DNIT 411/2021 - ME | g/cm ³ | 2,658 |
| Absorção - Pó de Pedra | Pó de pedra | DNIT 411/2021 - ME | % | 1,16 |
| Densidade Aparente - Agregado Graúdo | Brita 0 | DNIT 413/2021 - ME | - | 2,325 |
| Densidade Real - Agregado Graúdo | Brita 0 | DNIT 413/2021 - ME | - | 2,463 |
| Absorção - Agregado Graúdo | Brita 0 | DNIT 413/2021 - ME | % | 2,40 |



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

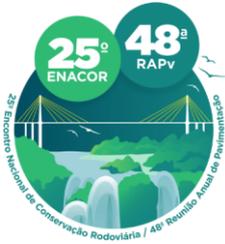


| | | | | |
|--------------------------------------|---------|--------------------|---|--------------|
| Densidade Aparente - Agregado Graúdo | Brita 1 | DNIT 413/2021 - ME | - | 2,480 |
| Densidade Real - Agregado Graúdo | Brita 1 | DNIT 413/2021 - ME | - | 2,517 |
| Absorção - Agregado Graúdo | Brita 1 | DNIT 413/2021 - ME | % | 0,59 |

Conforme o Quadro 1, o agregado em questão apresentou características específicas que o tornam adequado para uso em pavimentos rodoviários. Com um equivalente de areia de 76,7%, indicou que a quantidade de partículas finas na amostra é relativamente baixa, o que é desejável para garantir uma boa compactação e estabilidade da mistura asfáltica. Além disso, com uma abrasão Los Angeles de 22,07%, indicou que o agregado possui boa resistência ao desgaste causado pelo tráfego e pelo atrito. Além dos ensaios expostos, foi realizada a granulometria individual dos materiais, conforme o DNER ME – 083/98, e a composição granulométrica para Faixa C DNIT. A proporção utilizada foi de 39% de pó de pedra, 40% de brita 0, 20% de brita 1 e 1% de cal hidratada CH-1. A caracterização dos ligantes utilizados na pesquisa foi baseada na Resolução ANP Nº 897, de 18 de novembro de 2022, a qual especifica os limites e os ensaios a serem realizados com as normas vigentes e os respectivos limites de acordo com o tipo de ligante. Na Tabela 1 estão destacados os ensaios realizados juntamente com os resultados obtidos.

Tabela 1. Caracterização dos ligantes

| Ensaio | Método | CAP 50/70 | | AMB 8 | | AMP 60/85-E | |
|---|------------|-----------|--------------|-----------|----------|-------------|--------|
| | ABNT-NBR | Resultado | Limite | Resultado | Limite | Resultado | Limite |
| Penetração a 25 °C, 100 g, 5 s, (0,1mm) | 6576:2007 | 43,0 | 50-70 | 30,8 | 30-70 | 47,7 | 40-70 |
| Ponto de Amolecimento, mín. (°C) | 6560:2016 | 43,0 | 46,0 | 56,1 | 50,0 | 67,2 | 60,0 |
| Ponto de Fulgor - Vaso Aberto Cleveland, mín. (°C) | 11341:2014 | 310,1 | 235 | 312,0 | 235,0 | 311,5 | 235,0 |
| Viscosidade Brookfield a 135 °C, spindle 21, 20 rpm, máx. (cP) | 15184:2021 | 367,5 | 274,0 | - | - | 975,0 | 3000,0 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx. (cP) | 15184:2021 | 183,0 | 112,0 | - | - | 521,0 | 2000,0 |
| Viscosidade Brookfield a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx. (cP) | 15184:2021 | 72,0 | 57-285 | - | - | 199,0 | 1000,0 |
| Viscosidade Brookfield a 175 °C, spindle 3, 20 rpm, máx. (cP) | - | - | - | 1080,0 | 800-2000 | - | - |
| Ensaio de Separação de Fase, máx. (°C) | 15166:2004 | - | - | 7,4 | 9,0 | 1,9 | 5,0 |
| Recuperação Elástica 25 °C, 10 cm, mín. (%) | 15086:2022 | - | - | 80,0 | 50,0 | 86,0 | 85,0 |
| Ductilidade a 25 °C | 6293:2015 | 100,0 | 60,0 | - | - | - | - |
| Efeito do Calor e do Ar - RTFOT, a 163 °C, 85 minutos, conforme ABNT NBR 15235:2009 | | | | | | | |
| Varição de Massa, máx., (% massa) | 15235:2009 | -0,1 | (-0,5 a 0,5) | 0,0 | 1,0 | -0,3 | 1,0 |



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



| | | | | | | | |
|---|------------|------|------|-------|-------|------|----------|
| Variação do Ponto de Amolecimento - P.A., máx., (°C) | 6560:2016 | 12,2 | 8,0 | 8,7 | 10,0 | 2,4 | (-5 a 7) |
| Percentagem de Penetração Original, mín. (%) | 6576:2007 | 44,0 | 55,0 | 84,4 | 55,0 | 74,1 | 60,0 |
| Percentagem de Recuperação Elástica Original a 25 °C, mín., (%) | 15086:2022 | - | - | 108,1 | 100,0 | 86,3 | 80,0 |

A partir dos resultados obtidos e os valores de referência das normas, os materiais AMB e AMP encontram-se dentro das especificações, porém os valores de penetração e ponto de amolecimento não foram atingidos no CAP convencional, o que não afetou as modificações e deu-se a continuidade da pesquisa buscando comparar a melhora no desempenho com o acréscimo dos modificadores.

Na Figura 3 está apresentado o fluxograma com os ensaios realizados nessa pesquisa. Com os ligantes, foram realizados ensaios de classificação de desempenho de acordo com a temperatura, fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) e avaliação da resistência à fadiga utilizando varredura de amplitude linear (LAS). Também foram moldados corpos de prova, de mistura, pelo método Superpave, com teor de 5,5 % para todos os ligantes para realização do teste de roda de Hamburgo (DWT). Vale ressaltar que o teor escolhido foi para fins de comparação das misturas, levando em consideração os mesmos critérios.

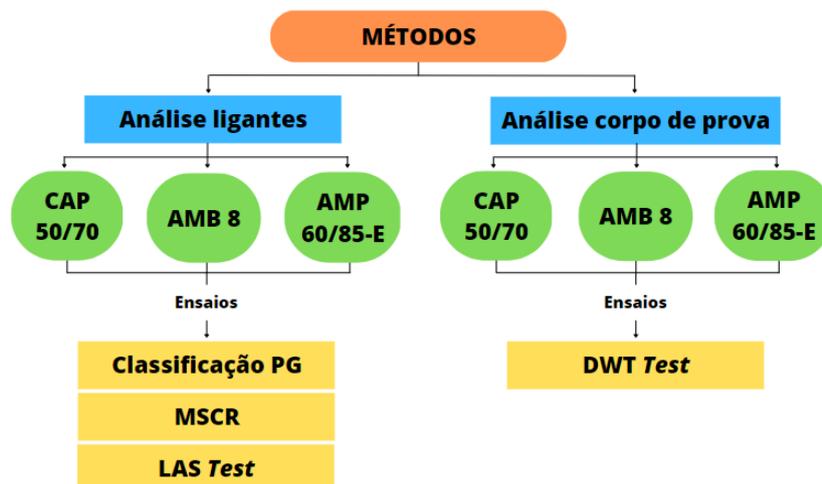
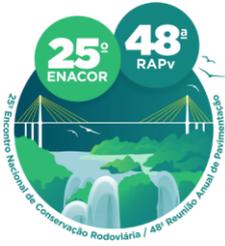


Figura 3. Fluxograma dos métodos utilizados na pesquisa

Classificação PG (*Performance Grade*)

Nessa classificação, a amostra foi coletada, pré-aquecida em estufa e moldada para utilização na geometria de 25 mm por meio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico. Os ligantes foram analisados em faixas de temperatura de 6 °C em 6 °C. Foi pré-determinada a temperatura inicial de ensaio de 58 °C para o CAP 50/70 e de 64 °C para o AMB-08 e o AMP-60/85-E. As temperaturas de graduação são contínuas, portanto, o software apontou como temperatura de falha quando o resultado de G^* foi menor que 1,00 kPa e a classificação determinada de PG foi a última temperatura anterior a falha. A avaliação de desempenho consistiu nos valores da leitura do G^* por temperatura e do ângulo de fase por meio da norma ASTM D7643 (ASTM, 2016).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas – MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*)

Para este ensaio, foi necessário realizar o envelhecimento da amostra em estufa RTFOT, de acordo com a norma ABNT NBR 15235. Após o envelhecimento, a amostra foi coletada e moldada na geometria de 25 mm, então foi condicionada a uma nova leitura de PG para determinação de temperatura de realização do ensaio de MSCR.

Este método, regido pela Norma DNIT 423/2020 – ME, determinou o percentual de recuperação e compliância não recuperável do ligante asfáltico através do ensaio de fluência e recuperação executado a tensões de 100 Pa e 3200 Pa. O ensaio foi realizado em um reômetro de cisalhamento dinâmico e os resultados foram determinados pela média percentual de deformação recuperável e não-recuperável da amostra asfáltica, por meios de ciclos de fluência de tensão constante de 1s de duração seguida por uma recuperação de tensão nula de 9s de duração. Foram executados 20 ciclos no nível de estresse de 100 Pa seguidos por 10 ciclos no nível de estresse de 3200 Pa para um total de 30 ciclos.

De acordo com a norma AASHTO M332:2020, foi possível determinar o desempenho nos níveis de tráfego para as amostras em *Standard Traffic* “S”, *Heavy Traffic* “H”, *Very Heavy Traffic* “V” e *Extremely Heavy Traffic* “E”, de acordo com os resultados obtidos na avaliação da compliância não recuperável a 3200 Pa e um Jnr diff de no máximo 75% nas condições de temperatura de tensão aplicadas na amostra.

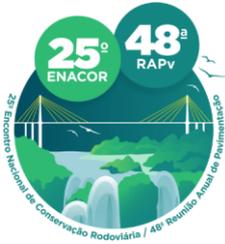
Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear - LAS (*Linear Amplitude Sweep*)

De acordo com a norma DNIT 439/2022 – ME, o ensaio foi realizado por meio do *Dynamic Shaer Rheometer* (DSR), e determinou a resistência à fadiga do ligante asfáltico, através do emprego de carregamento cíclico de cisalhamento com amplitudes linearmente crescentes. O ensaio foi realizado a 19° C e o ligante estava previamente envelhecido e moldado na geometria de 8 mm. Após os ciclos (promovendo dano acelerado por fadiga), por meio das propriedades reológicas e resultados de varredura alcançada, utilizou-se a Mecânica do Dano Contínuo Viscoelástico para calcular a resistência à fadiga do ligante. Os valores de modelo de fadiga A e B indicaram a integridade do ligante em função da variação do dano acumulado e a sensibilidade do material ao nível de deformação, respectivamente.

Teste roda de Hamburgo em misturas asfálticas compactadas - DWT Test (*Double Wheel Tracker*)

Por meio da norma AASHTO T324, o DWT Test demonstrou o desempenho das misturas asfálticas sob a ação do tráfego e clima ao longo do tempo. Foram preparados dois corpos de prova para cada leitura de desempenho, todos com o mesmo agregado e mesma granulometria. As amostras foram compactadas no compactador giratório Superpave com o molde cilíndrico de diâmetro interno de 150 mm e altura final de 60 mm, além disso, todos os corpos de prova tiveram de ser compactados de modo que ficassem com 7% de volume de vazios para início dos ensaios.

Os corpos de prova foram colocados nos moldes de ensaio do equipamento e iniciado o teste. As amostras foram submetidas aos mesmos parâmetros para melhor avaliação comparativa, com 7.000 ciclos, velocidade de 26 ciclos/min, condicionamento de 45 min e temperatura de ensaio 50 °C. A



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



aplicação de carga nos corpos de prova nesse sistema foi de 703 N no centro das amostras. A resistência à deformação permanente foi avaliada pela medição do afundamento do cilindro de amostra após os ciclos.

RESULTADOS

A seguir serão detalhados os resultados encontrados para as formulações estudadas conforme a realização dos ensaios descritos anteriormente.

Classificação PG (*Performance Grade*)

A partir dos valores obtidos no ensaio de cisalhamento dinâmico para os três ligantes (conforme Tabela 2), foi possível realizar a leitura do módulo complexo de cisalhamento (G^*) por temperatura e do ângulo de fase ($G^*/\text{sen}(\delta)$), que diminuíram na medida em que a temperatura aumentou. O percentual de deformação e a frequência angular foram contínuos em 10% e 10 rad/s, respectivamente, para todas as temperaturas.

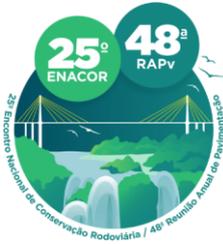
Tabela 2 Resultados classificação PG

| Ligante | Freq. Ang. (Rad/s) | Temp. (°C) | Tensão osc. (Pa) | Deformação (%) | Ângulo de fase | G^* (kPa) | $G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa) | Passou/Falhou |
|---------------|--------------------|------------|------------------|----------------|----------------|-------------|--------------------------------|---------------|
| AMB 8 | 10 | 64 | 0,14 | 1,9 | 65,4 | 7,45 | 8,20 | Passou |
| | 10 | 70 | 0,49 | 12,1 | 70,4 | 4,00 | 4,25 | Passou |
| | 10 | 76 | 0,27 | 12,2 | 74,2 | 2,25 | 2,34 | Passou |
| | 10 | 82 | 0,16 | 12,1 | 76,7 | 1,28 | 1,31 | Passou |
| | 10 | 88 | 0,09 | 12,1 | 78,0 | 0,78 | 0,79 | Falhou |
| AMP 60/85 - E | 10 | 64 | 0,34 | 11,9 | 76,9 | 2,84 | 2,92 | Passou |
| | 10 | 70 | 0,17 | 12,0 | 78,8 | 1,43 | 1,45 | Passou |
| | 10 | 76 | 0,09 | 12,1 | 80,9 | 0,72 | 0,73 | Falhou |
| CAP 50/70 | 10 | 58 | 0,40 | 14,4 | 87,7 | 2,76 | 2,76 | Passou |
| | 10 | 64 | 0,17 | 11,9 | 87,4 | 1,41 | 1,41 | Passou |
| | 10 | 70 | 0,09 | 12,3 | 86,1 | 0,71 | 0,71 | Falhou |

Nos materiais em questão, o PG foi de 82 para o AMB 8, 70 para o AMP 60/85 – E e 64 para o ligante convencional, demonstrando que o primeiro possui elevado desempenho em uma maior variação de temperatura em relação aos demais. Para a análise de G^*/sen que traduz os resultados por meio do ângulo de fase durante o processo de cisalhamento, o ligante com borracha obteve melhor resultado, proporcionando maior resistência à deformação permanente, levando em consideração as faixas de temperatura que o asfalto exibe um desempenho adequado.

Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas – MSCR

No ensaio MSCR, para avaliação da deformação permanente, foram medidos o percentual de recuperação (R) e compliância não recuperável (Jnr) dos ligantes e os resultados estão expressos na Tabela 3.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 3. Valores de recuperação e compliância não recuperável para as formulações

| | AMB 8 | AMP 60/85-E | CAP 50/70 |
|--|--------|-------------|-----------|
| Temperatura de teste | 82,00 | 70,00 | 64,00 |
| Recuperações a 100 Pa (R, %) | 52,18 | 22,25 | 1,39 |
| Recuperações a 3200 Pa (R, %) | 6,37 | 11,57 | 0,12 |
| Rdiff - Diferença media percentual entre as recuperações em 100 Pa e 3200 Pa | 87,79 | 48,02 | 91,16 |
| Compliâncias a 100 Pa (Jnr, kPa-1) | 1,09 | 2,08 | 3,79 |
| Compliâncias a 3200 Pa (Jnr, kPa-1) | 3,96 | 2,71 | 4,18 |
| Jnr diff - Diferença media percentual entre as compliâncias não recuperáveis em 100 Pa e 3200 Pa | 262,92 | 30,25 | 10,33 |

De acordo com os valores evidenciados na Tabela 3, os asfaltos modificados apresentaram desempenho maior que o convencional, e destacando o asfalto AMB com maior recuperação a aplicação de carga de 100 Pa, obtendo 52,18% de recuperação, indicando maior resposta elástica entre os três. Para tensão de 3200 Pa, à primeira vista, o valor de recuperação do AMP 60/85-E foi o melhor, porém, vale ressaltar que a temperatura em análise deste era 70 °C, logo na mesma temperatura, o ligante AMB 8 possivelmente teria desempenho igual ou superior aos demais. Em relação ao parâmetro *Jnr*, o ligante AMB 8 resistiu mais à deformação permanente (1,09 kPa-1) e o CAP 50/70 perdeu suas propriedades com mais facilidade (3,79 kPa-1). A mesma análise feita para as recuperações é válida para as compliâncias, no que diz respeito às temperaturas de ensaio para cada material.

Analisando os valores de *Jnr*3,2 e *Jnr*diff, e considerando a norma AASHTO M332, foi possível classificar quanto ao desempenho no nível de tráfego. Dessa forma, as três amostras puderam ser classificadas em *Standard Traffic* "S", porém a amostra AMB teve o limite de *Jnr*diff superior a 75% o que pode ser relacionado à leitura da borracha em suspensão na amostra.

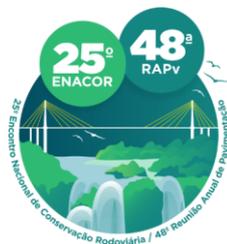
Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear - LAS (*Linear Amplitude Sweep*)

Este ensaio buscou simular a fadiga no ligante de forma acelerada utilizando o princípio de dano contínuo viscoelástico. Na Tabela 4 estão contidos os valores encontrados na varredura.

Tabela 4. Resultado do teste

| | AMB | 60/85 | 50/70 |
|--------------------|---------|-------|--------|
| Temperatura | 19 | 19 | 19 |
| Modelo de fadiga A | 9816000 | 78500 | 229300 |
| Modelo de fadiga B | 4,352 | 3,452 | 3,241 |
| Alpha | 2,176 | 1,726 | 1,620 |

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, o CAP convencional obteve resultados inferiores aos outros em todos os níveis avaliados. O ligante AMB atingiu melhor desempenho submetido à aplicação de cargas variáveis, obtendo melhor capacidade de resistir a deformações permanentes ou danos estruturais. A Figura 4 apresenta os valores de deformação permanente correlacionados à vida de fadiga (*Nf*) de cada amostra.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

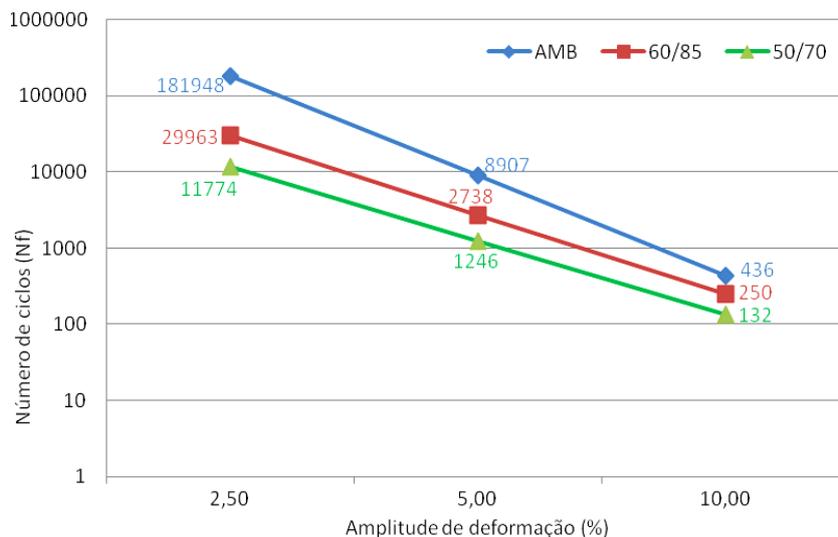


Figura 4. Parâmetro de fadiga

Para análise da curva de fadiga, comparando as amostras, o ligante AMB apresentou melhoria na vida de fadiga em relação aos outros dois. O material modificado com SBS se desempenhou melhor que o CAP convencional, resistindo mais que o 50/70 e menos que o AMB às deformações aplicadas.

Teste roda de Hamburgo em misturas asfálticas compactadas - DWT (*Test Double Wheel Tracker*)

Os resultados obtidos no ensaio de DWT com os diferentes ligantes estão expressos na Figura 5. Cabe ressaltar que a temperatura escolhida para os testes foi de 50°C para que o CAP 50/70 não rompesse antes dos 7 mil ciclos.

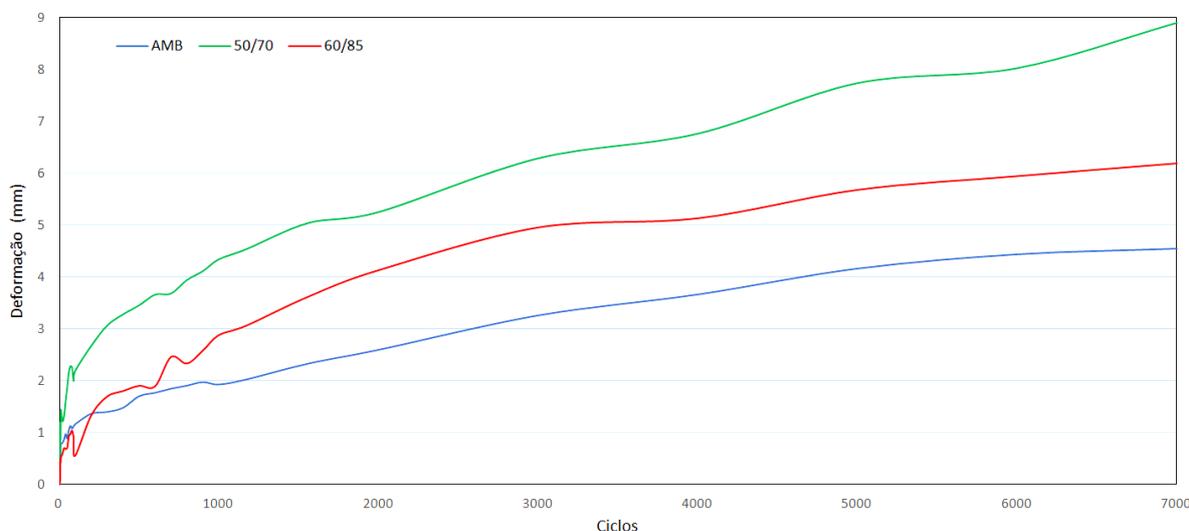
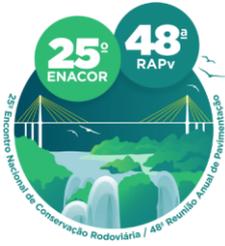


Figura 5. Variação de ciclos na ruptura em função da amplitude de deformação

Ao verificar os resultados obtidos neste ensaio, após os efeitos de deformação permanente, a profundidade final do acúmulo de deformações foi de 4,54 mm para o AMB, 8,89 mm para o CAP



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



50/70 e 6,18 mm para o AMP 60/85-E, dessa forma, a formulação com borracha resistiu mais a temperatura e carga, seguido da formulação com polímero SBS e por último CAP convencional.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar e comparar o desempenho de três ligantes: convencional, modificado com pó de borracha e modificado por polímero em laboratório. Por meio dos ensaios de caracterização inicial segundo a ANP os materiais obtiveram resultados dentro dos limites exceto o convencional.

Referente às análises do comportamento reológico, o ligante AMB alcançou maior grau de desempenho em relação à temperatura (PG 82) e menor valor de $G^*/\sin(\delta)$. Relativo à avaliação de deformação permanente por meio do MSCR os asfaltos modificados apresentaram melhor desempenho que o convencional, se destacando o modificado com borracha obtendo maior resposta elástica e resistência à deformação permanente. No ensaio LAS, os ligantes modificados também apresentaram resultados superiores ao convencional, dentre os três o AMB foi o que mais resistiu a fadiga.

Em relação aos resultados do ensaio roda de Hamburgo, a mistura com CAP convencional acumulou maior afundamento (8,89 mm) e a massa contendo pó de borracha atingiu menor deformação (4,54 mm). A formulação AMB 8, obteve melhor desempenho nas análises de comportamento reológico e deformação de mistura.

Por fim, os resultados obtidos pelo presente estudo, corroboram na compreensão técnico-científica acerca das diferenças entre os materiais estudados, bem como no fortalecimento de banco de dados das pesquisas que utilizam esses materiais. Em relação às limitações apresentadas, estas se dão na validade dos resultados, somente para as condições avaliadas nessa pesquisa. Como sugestão de trabalhos futuros, seria de grande valia fazer o MSCR na temperatura PG de campo, complementando o PG do ligante realizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AASHTO M332-21 - Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. 2021
- AASHTO T324-22 - Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. 2022
- AHMED, Taha et al. Evaluating the Characteristics of Crumb Rubber Modified Asphalt Binders Produced with Local Bitumen: Case of Kuwait. In: International Conference on Transportation and Development 2020. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 170-177.
- ASTM D7643 - Standard Practice for Determining the Continuous Grading Temperatures and Continuous Grades for PG Graded Asphalt Binders. 2016
- DNER 038/1998 – ME: Agregados – análise granulométrica – Método de ensaio. 1998.
- DNER 054/1997 – ME: Equivalente de areia – Método de ensaio. 1997.
- DNIT 411/2021 – ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. 2021.
- DNIT 413/2021 – ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. 2021.
- DNIT 423/2020 – ME: Pavimentação asfáltica. Lama Pavimentação – Ligante asfáltico – Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) – Método de ensaio. 2020.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



DNIT 439/2022– ME: Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio. 2022.

DUARTE, Gabriel Macêdo; FAXINA, Adalberto Leandro. High-temperature rheological properties of asphalt binders modified with recycled low-density polyethylene and crumb rubber. *Construction and Building Materials*, v. 298, p. 123852, 2021.

HUANG, Wentong et al. Performance-guided design of permeable asphalt concrete with modified asphalt binder using crumb rubber and SBS modifier for sponge cities. *Materials*, v. 14, n. 5, p. 1266, 2021.

KOCAK, Salih; KUTAY, M. Emin. Effect of devulcanized rubber modification on the performance grade, fatigue cracking resistance, and rutting resistance of asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 9, p. 04021248, 2021.

Kok, B. V., and H. Colak. “Laboratory comparison of the crumbrubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt.” *Constr. Build. Mater.* 25 (8): 3204–3212. 2011.

KÖK, Baha Vural; ÇOLAK, Hakan. Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 8, p. 3204-3212, 2011.

MOTA, Rafael V. et al. Effect of binder rheology and aggregate gradation on the permanent deformation of asphalt mixtures. *International Journal of Civil Engineering*, v. 19, n. 7, p. 777-787, 2021.

NBR 11341: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2014.

NBR 15086: Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro de cimentos asfálticos modificados por polímeros elastoméricos ou borracha. Rio de Janeiro, 2022.

NBR 15166: Asfalto modificado - Ensaio de separação de fase. Rio de Janeiro, 2004.

NBR 15184: Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2021.

NBR 15235: Materiais asfálticos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2009.

NBR 6293: Ligantes asfálticos – Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 2015.

NBR 6560: Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração Rio de Janeiro, 2007.

NBR 7809: Agregado miúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2019.

RATH, Punyaslok et al. Laboratory and field evaluation of pre-treated dry-process rubber-modified asphalt binders and dense-graded mixtures. *Transportation Research Record*, v. 2675, n. 10, p. 381-394, 2021.

S. Wang, D. Cheng, F. Xiao, Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt, *Constr. Build. Mater.* Vol. 131, p. 101–113 (2017).

WANG, Qiang et al. Weather aging resistance of different rubber modified asphalts. *Construction and Building Materials*, v. 106, p. 443-448, 2016.

WANG, Shifeng; CHENG, Dingxin; XIAO, Feipeng. Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 131, p. 101-113, 2017.

Y. Tan, M. Guo, L. Cao, L. Zhang. Performance optimization of composite modified asphalt sealant based on rheological behavior *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 799–805 (2013).

ZHOU, Jie et al. Evaluation of low temperature performance for SBS/CR compound modified asphalt binders based on fractional viscoelastic model. *Construction and Building Materials*, v. 214, p. 326-336, 2019.