



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ASFALTO DE ALTO MÓDULO MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO E SUA INFLUÊNCIA EM MISTURA ASFÁLTICA MORNA

Andressa Zampieri Rosa¹; Gustavo Oliveira Couto²; Jesner Sereni Ildefonso³; Thayná Yamamoto Fávero⁴; Gabriela do Prado Ferreira⁵; Fabrício de França Fernandes⁶ e Luiz Henrique de Assis Fagundes⁷

RESUMO

O tráfego elevado e intenso gera a demanda por melhores técnicas construtivas e materiais mais resistentes e duráveis, de modo a se ter rodovias com maior vida em serviço. Em se tratando dos materiais, a necessidade por asfaltos que atendam essas características, associada ao desenvolvimento sustentável, instiga pesquisas que investiguem asfaltos de alto módulo e com seu uso dado em temperaturas reduzidas. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi determinar a possibilidade de produzir mistura asfáltica de alto módulo a temperaturas inferiores às convencionais, sem que o seu desempenho reológico e mecânico fosse comprometido. Para tanto, utilizou-se um aditivo de alto módulo no ligante e foi realizada dosagem de projeto para uma mistura morna. Investigou-se o comportamento reológico do ligante por meio da Classificação PG, o ensaio de fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) e a avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS). Também foi analisada a resistência da mistura à deformação permanente por meio do ensaio de Roda de Hamburgo e determinação do módulo de resiliência. Os resultados obtidos revelam que a massa asfáltica apresentou maior resistência à deformação permanente e o ligante demonstrou resultados reológicos satisfatórios, um conjunto que possibilitou uma mistura de alto módulo com desempenho elevado e menor consumo energético devido a usinagem e compactação em temperaturas reduzidas.

PALAVRAS-CHAVE: Performance Grade; Módulo de Resiliência; Roda de Hamburgo; Método Bailey.

ABSTRACT

High and intense traffic generates demand for better construction techniques and more resistant and resistant materials, in order to have highways with a longer service life. When it comes to materials, the need for asphalt that meets these characteristics, associated with sustainable development, encourages research that investigates high modulus asphalt and its use in reduced temperatures. In this context, the objective of this study was to determine the possibility of producing a high modulus asphalt mixture at temperatures lower than conventional ones, without compromising its rheological and mechanical performance. Therefore, a high modulus additive was used in the binder and a design dosage was carried out for a warm mixture. The rheological behavior of the binder is investigated using the PG Classification, Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) and Linear Amplitude Sweep (LAS). The mixture's resistance to permanent deformation was also proven through the Test Double Wheel Tracker and determination of the resilient modulus. The results obtained reveal that the asphalt mixture showed greater resistance to permanent deformation, and the binder demonstrated satisfactory rheological results, a combination that enabled a high modulus mixture with high performance and lower energy consumption due to machining and compaction at reduced temperatures.

KEY WORDS: Performance Grade; Resilient Modulus; Hamburg Wheel Tracker; Method Bailey.

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

² Centro Tecnológico CBAA Asfaltos, ctec-sp@cbaa-asfaltos.com.br; fabricao.fernandes@cbaa-asfaltos.com.br; thayna.favero@cbaa-asfaltos.com.br; gabidopradofc@gmail.com.



INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos são suscetíveis ao desgaste ao longo do tempo, bem como às deformações permanentes e às trincas por fadiga. Diante das demandas por transporte, esse fato tem ocorrido com maior intensidade, haja vista o crescimento da quantidade de veículos trafegando nas rodovias e também devido às cargas mais pesadas por eixo. De acordo com estudo realizado pelo IBGE (2023), o número de caminhões cresceu 9,2% no período de 2016 a 2022, o que exige melhor resposta do revestimento asfáltico, por se tratarem de veículos pesados.

Para que o pavimento suporte às solicitações do tráfego, os materiais constituintes devem possuir boas características e serem resistentes. Dentre as alternativas de seleção de materiais para a construção de um revestimento que seja capaz de resistir a climas mais quentes e tráfego mais intenso está o asfalto de alto módulo. Sua formulação pode ser alcançada por métodos empíricos ou por propriedades baseadas em desempenho (HARITONOV *et al.*, 2013) e sua principal característica é a maior viscosidade e resistência à deformação permanente (CAPITÃO; PICADO-SANTOS, 2006). Geralmente existem três formas de se obter um ligante com essas características: (1) a partir de asfaltos mais duros, com baixa penetração e alto ponto de amolecimento (MA; FU, 2008); (2) utilizando polímeros como modificador (ZHANG, 2017), (3) inserindo agente de alto módulo (MA *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2018).

Brosseau (2006) assinala que ao utilizar ligantes com maior consistência, obtêm-se pavimentos com características mecânicas superiores, conferindo elevado módulo de deformabilidade à mistura asfáltica (VILLELA, 2012). Xiao *et al.* (2019) adicionaram dois tipos de agentes de alto módulo ao asfalto virgem e ao asfalto modificado com SBS e estudaram o desempenho do ligante modificado e da mistura asfáltica. Eles relataram que o desempenho do asfalto e da mistura asfáltica em alta temperatura melhorou após a adição de um agente de alto módulo, mas seu desempenho em baixa temperatura diminuiu ligeiramente. Usando testes de varredura de frequência, Geng *et al.* (2013) e Wang *et al.* (2017) relataram que o ligante asfáltico de alto módulo tem maior módulo complexo e menor ângulo de fase do que o asfalto convencional. Também apresentaram menor recuperação elástica do que o modificado por SBS. Usando testes de varredura de temperatura, descobriu-se que os ligantes de alto módulo têm deformação permanente $G^*/\sin\delta$ mais alto do que o asfalto base (LIANG, 2016).

Ao passo em que se tem uma demanda por pavimentos mais resistentes, gerado pelo aumento de veículos, este fato ocasiona preocupações relacionadas ao meio ambiente, devido à emissão de carbono geradas tanto pelo veículos, quanto pela produção de asfaltos. Nas últimas décadas, esforços em pesquisas no setor de materiais rodoviários têm sido feitos por estudiosos e pela indústria para desenvolver alternativas sustentáveis e econômicas à produção tradicional e consolidada de concretos asfálticos. Neste sentido, uma possibilidade potencialmente mais barata e mais sustentável é asfalto morno (*Warm Mix Asphalt* - WMA) (ALMEIDA-COSTA; BENTA, 2016), que é produzido em temperaturas mais baixas em relação ao tradicional a quente.

A redução da temperatura leva a uma diminuição de gases de combustão, partículas de poeira, carbono orgânico total, compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (RUBIO *et al.*, 2012). Hamzah *et al.* (2010) produziram uma mistura a quente cerca de 15 °C inferior à mistura convencional, adicionando 4% de um aditivo orgânico. Através desta modificação, houve diminuição de 12% na energia de aquecimento e nas emissões de CO₂. Misturas mornas podem ser produzidas em temperaturas 40 °C mais baixas que o normal, consumindo de 20% a 35% menos combustível durante o aquecimento dos componentes (BENTA *et al.*, 2015).



Portanto, este estudo teve por objetivo investigar o impacto do agente de alto módulo nas propriedades reológicas e mecânicas do ligante e sua influência no desempenho da mistura asfáltica morna. Para alcançar estes objetivos, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) PRO W foi selecionado como asfalto base e para ser modificado com um agente de alto módulo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo utilizou agregados pétreos (rocha granítica) nas granulometrias de brita, pedrisco e pó de pedra, além do ligante modificado em laboratório. A investigação tem como base a norma AFENOR P98-140, mas para a caracterização dos ligantes foram utilizadas as normas apresentadas na Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) N° 897 de 18 de Novembro de 2022 e métodos de ensaios do DNIT na caracterização dos agregados.

Para os agregados, foram realizadas granulometria e ensaios físicos dos materiais provenientes da Pedreira Riuma localizada em São Paulo/SP. O ligante utilizado na investigação foi o CAP PRO W da refinaria REVAP disponibilizado pela distribuidora, sendo utilizado para formulação o aditivo HONEYWELL TITAN®, que é um polímero à base de polietileno, utilizado para melhorar o desempenho do ligante asfáltico estando ou não sob modificação de polímero.

Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico da distribuidora CBAA (CTEC) e no laboratório do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). A formulação foi realizada em laboratório, no misturador mecânico modelo FISATON 713D, com temperatura constante de 160 °C e 300 rpm até sua completa incorporação, que durou 1 hora. Inicialmente o ligante foi pré-aquecido até 160°C por 30 min, na sequência, foi adicionado o aditivo e não foi identificada nenhuma alteração significativa no volume ou na temperatura da amostra, que permaneceu por mais 30 min no misturador. Posteriormente foram realizados ensaios de especificação de material (penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, viscosidade, ductilidade e variações pós RTFOT) conforme determinação de limites estabelecidos internamente na CBAA, devido à ausência de uma especificação para o produto no Brasil.

Agregados

Para análise física dos agregados, foram realizados os ensaios de caracterização conforme expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos agregados

Ensaio	Norma	Unidade	Resultado
Equivalente de areia – Pó de brita	DNER ME 054	%	77,33
Desgaste Los Angeles	DNER ME 035	%	25
Índice de forma pelo paquímetro	ABNT NBR 7809	-	1,32
Sanidade	DNER ME 089	%	0,08
Densidade real – Pó de brita	DNIT 411	-	2,638
Densidade aparente – Pó de brita	DNIT 411	-	2,677
Densidade aparente – Brita 1/2	DNIT 413	-	2,532
Densidade real – Brita 1/2	DNIT 413	-	2,58
Densidade aparente – Pedrisco	DNIT 413	-	2,472
Densidade real – Pedrisco	DNIT 413	-	2,501



Conforme apresentado na Tabela 1, o agregado em questão apresentou características específicas que o tornam adequado para o uso em pavimentação. Em relação à composição granulométrica adotada para a mistura de alto módulo, utilizou-se uma distribuição contínua por meio do método *Bailey* de condição graúda. Dessa forma, a mistura é composta por 35,04% de brita, 34,71% de pedrisco e 30,25% de pó de pedra.

Ligante

Para a caracterização do ligante asfáltico morno proveniente da refinaria, executou-se a análise amparada nos parâmetros apresentados na Resolução ANP N° 897, a qual apresenta os ensaios e especifica os limites a serem atendidos. Para o material modificado, os limites foram estabelecidos por normativa interna da própria distribuidora e os ensaios realizados foram os mesmos feitos com o ligante base. Na Tabela 2 estão destacados os ensaios juntamente com os resultados obtidos.

Tabela 2. Caracterização do ligante base e modificado com agente de alto módulo

Ensaio	Método	CAP PRO W		CAP Alto Módulo	
		Resultado	Limite	Resultado	Limite
Penetração a 25 °C, 100 g, 5 s, (0,1mm)	6576:2007	30	30-45	16	10 - 25
Ponto de Amolecimento, mín. (°C)	6560:2016	53,5	52	71,3	61
Ponto de Fulgor - Vaso Aberto Cleveland, mín. (°C)	11341:2014	314	235	310	235
Viscosidade Brookfield a 135 °C, spindle 21, 20 rpm, (cP)	15184:2004	537,5	374	597,5	500 - 2500
Viscosidade Brookfield a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx. (cP)	15184:2004	239	203	291	300
Viscosidade Brookfield a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx. (cP)	15184:2004	88	76-285	104,5	145
Ductilidade a 25 °C	6293:2015	100	60	100	10
Estabilidade à estocagem (°C)	6570:2016	2,05	-	-	-
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 minutos					
Varição de Massa, máx., (% massa)	15235:2009	0,5	-0,245	-0,3	0,5
Varição do Ponto de Amolecimento - P.A., máx., (°C)	6560:2016	8,0	6,7	3,6	8,0
Porcentagem de Penetração Orig, mín. (%)	6576:2007	60	60	61,9	55
Ductilidade a 25 °C	6293:2015	84,5	10	17,5	10

Com base nos valores recomendados nas normas, o material encontra-se com resultados dentro do exposto na resolução ANP 897 de novembro de 2022 para o CAP 30/45. Entretanto o CAP Alto Módulo 10-25 não possui uma especificação brasileira que limite o produto, desta forma, a especificação adotada foi de acordo com os controles de qualidade do produto desenvolvido e com referências de certificados já utilizados por outras distribuidoras do Brasil.

Ensaos reológicos no ligante e análise mecânica da mistura

Dando sequência aos procedimentos, foram realizados ensaios reológicos no ligante modificado e no ligante base, seguido da dosagem da mistura e análise da massa asfáltica dosada com o CAP de alto módulo. As metodologias dos ensaios realizados estão apresentadas a seguir:



Classificação PG (*Performance Grade*)

O ensaio de Performance Grade foi feito conforme as normas AASHTO T 315 e ASTM D7643, em um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico com geometria de 25 mm. Conforme estabelecido pela norma, a temperatura do ensaio possui um acréscimo de 6 °C contínuos, sendo a temperatura inicial pré-determinada de 58 °C. Com esse ensaio encontra-se o valor de $G^*/\text{sen}\delta$, devendo ser o mais próximo de 1,00 kPa (para condição virgem), entretanto ao atingir um valor menor é apontada a “falha”, considerando-se, então, a temperatura anterior como PG. Esse ensaio foi realizado após o envelhecimento pela estufa RTFOT com base na norma ABNT NBR 15235 e a análise foi realizada considerando o valor de falha de 2,2 kPa (para condição envelhecido).

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

Com o resultado obtido na avaliação de PG foi realizado o ensaio MSCR na temperatura encontrada anteriormente, com geometria de 25 mm. Este método, regido pela Norma AASHTO M 332, 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. A mostra passou por ciclos de 1 s de tensão e fluência e 9 s de recuperação (tensão nula) e foram realizados 30 ciclos, sendo 20 com tensão de 100 Pa e 10 com tensão de 3200 Pa. Através dos valores de $J_{nr,diff}$ a 3200 Pa, foi possível especificar o tipo de desempenho no qual a amostra terá em relação ao nível de tráfego: “S” (*Standard*), “H” (*Heavy*), “V” (*Very Heavy*) e “E” (*Extremely Heavy*).

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

O ensaio foi realizado com a amostra envelhecida e moldada na geometria de 8 mm, com temperatura constante de 19 °C, de acordo com a norma DNIT 439/2022 – ME. Através deste ensaio, realizado no *Dynamic Shaer Rheometer* (DSR), foi possível determinar a resistência à fadiga do material, por meio da aplicação de carregamentos cíclicos para cisalhamento com amplitudes linearmente crescentes. Com esse ensaio obteve-se os valores de módulo de fadiga, sendo A indicando a integridade da amostra em função da variação do dano acumulado e B representando a sensibilidade do material ao nível de deformação aplicado.

Projeto de mistura

Para o projeto de mistura foi adotado o procedimento de dosagem pelo método *Superpave*. A partir do corpo de prova dosado no teor ótimo, foram avaliadas as propriedades: Massa específica aparente e massa específica máxima teórica (Rice test) - ABNT NBR 15619; Propriedades volumétricas: volume de vazios (VV) - DNIT 449 - PRO, vazios no agregado mineral (VAM) - DNIT 449 – PRO; relação betume vazios (RBV) - DNIT 449 – PRO e Adesividade – DNER ME 078; Propriedades mecânicas: estabilidade e fluência - DNIT 447 - ME; Determinação da resistência à tração por compressão diametral - DNIT 136 – ME e resistência ao dano por umidade induzida (DUI) – DNIT 180 – ME.

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

Uma das maneiras de compreender o desempenho da mistura sob a ação do tráfego e do clima ao longo do tempo e assim investigar a resistência à deformação permanente, é por meio do ensaio de DWT *test*, regido pela norma AASHTO T 324. Para tanto, foram moldados dois corpos de prova de



150 mm de diâmetro interno e 60 mm de altura com 7% volume de vazios, sendo a compactação feita no compactador giratório Superpave. Iniciou-se o ensaio com o condicionamento das amostras por 45 min na temperatura do ensaio a 50 °C e o teste foi realizado em 10 mil ciclos, ou 20 mil passadas. A carga aplicada pelo equipamento foi de 703 N no centro da amostra em uma velocidade de 26 ciclos/min. O resultado da resistência à deformação permanente foi obtido por meio da medida do afundamento do cilindro de amostra após os ciclos.

Determinação do módulo de resiliência

A partir do ensaio de módulo de resiliência foi possível simular as condições físicas e os estados de tensão que a mistura será submetida devido ao tráfego. Seguindo o preconizado na norma DNIT 135– ME, os corpos de prova foram condicionados em temperatura de 25 °C para a realização do ensaio. No corpo de prova foram aplicadas tensões de forma repetida, com tensão de confinamento nula. Foi controlado o pulso, duração e frequência de aplicação de carga em cinco sequências de 50 ciclos cada, onde a tensão principal (MPa) foi variável em cada ciclo de 0,1 a 0,5, com aumento gradual de 0,1 MPa por ciclo. O resultado foi determinado a partir da curva de deslocamento em função do tempo.

RESULTADOS

A seguir serão detalhados os resultados obtidos para a formulação em questão, conforme os ensaios descritos anteriormente em relação à avaliação do ligante e da mistura.

Classificação PG

Com base nos valores obtidos no ensaio de cisalhamento dinâmico (conforme Tabela 3), foi possível realizar a leitura do módulo complexo de cisalhamento (G^*) por temperatura e do ângulo de fase, que decresceram 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 e foi considerado o valor de 2,2 kPa como critério de falha.

Tabela 3. Resultados classificação PG (Alto módulo)

Freq. Ang. (Rad/s)	Temp. (°C)	Tensão osc. (Pa)	Deformação %	Ângulo de fase	G^* kPa	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Passou/ Falhou
10	58	1,94	2,2	68,1	87,0	93,5	Passou
10	64	1,97	5,3	71,8	37,2	39,2	Passou
10	70	1,66	10,1	74,9	16,3	16,9	Passou
10	76	0,75	10,1	77,4	7,43	7,61	Passou
10	82	0,36	10,1	79,6	3,52	3,58	Passou
10	88	0,17	10,1	81,5	1,73	1,75	Falhou

Para as amostras ensaiadas, o PG encontrado foi de 82, com um G^* igual a 3,52 kPa para o ligante modificado. Por meio do teste foi possível correlacionar a leitura do parâmetro G^* em diferentes temperaturas e comparar com os valores obtidos na amostra do CAP PRO W, conforme a Figura 1.

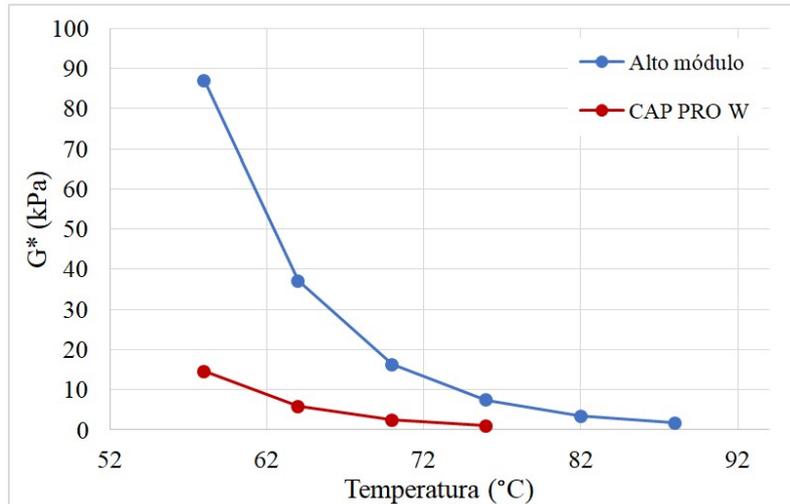


Figura 1. Variação de G^* em função da temperatura

Outro ponto de análise foi a variação do parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ (Figura 2), representando a deformação permanente, logo quanto maior essa relação, maior será a resistência à deformação permanente.

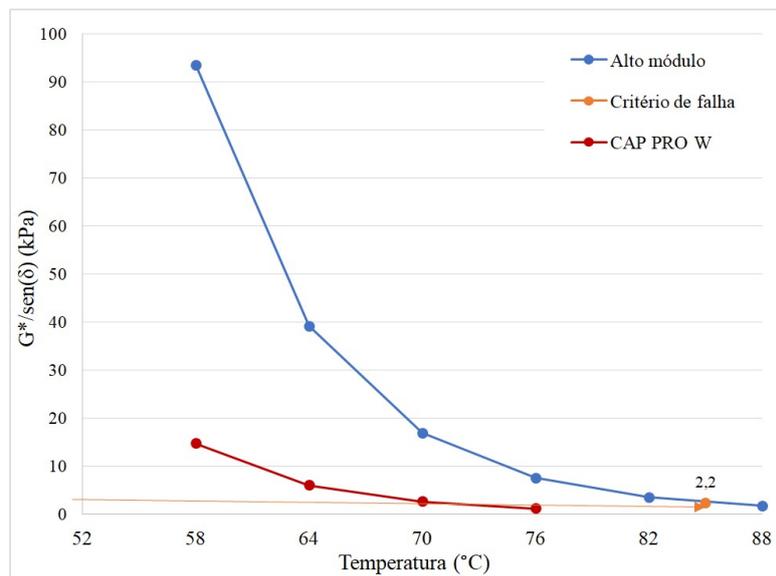


Figura 2. Percentual de alteração de $G^*/\text{sen}(\delta)$

Nas Figuras 1 e 2, os gráficos relacionam a taxa de cisalhamento pela temperatura, indicando elevadas respostas às aplicações de cargas, em temperaturas em que asfaltos convencionais não desempenhariam. As amostras apresentaram rigidez elevada, representadas na leitura do G^* e dinâmica ($G^*/\text{sen}(\delta)$) mantendo padrões próximos, indicando as respostas viscoelásticas, mesmo em função de variações da frequência de aplicação de carga. Além dessas correlações, também foi investigado o percentual de alteração do ângulo de fase, apresentado na Figura 3.

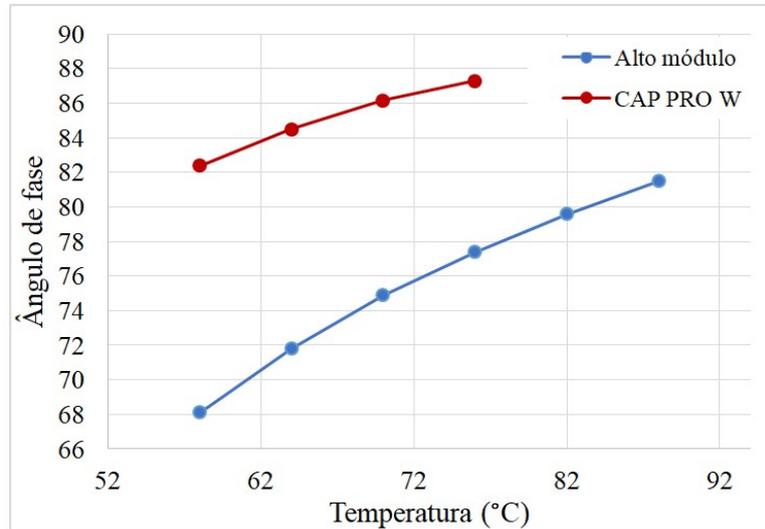


Figura 3. Variação do ângulo de fase em função da temperatura

Na figura 3, o ângulo de fase apresenta, nas temperaturas mais baixas, um comportamento plástico e solidez mais evidentes, conforme a temperatura se eleva, as dissipações de energia no sistema são maiores, mesmo assim, ainda indicam certo comportamento de rigidez, resultando, em uma baixa tendência à deformação permanente.

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

Para a avaliação da deformação permanente por meio do ensaio MSCR, foram analisados o percentual de recuperação (R) e compliância não recuperável (J_{nr}) dos ligantes e os resultados estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de recuperação e compliância não recuperável para a formulação

Parâmetro	Alto módulo	PRO W
Temperatura de teste	82,00	70,00
Recuperações a 100 Pa (R, %)	23,86	1,06
Recuperações a 3200 Pa (R, %)	2,33	-0,01
Rdiff - Diferença média entre as recuperações em 100 Pa e 3200 Pa (%)	90,22	100,95
Compliâncias a 100 Pa (J_{nr} , kPa^{-1})	1,66	3,82
Compliâncias a 3200 Pa (J_{nr} , kPa^{-1})	3,22	4,15
$J_{nr}diff$ - Diferença média percentual entre as compliâncias não recuperáveis em 100 Pa e 3200 Pa	94,43	8,85

A observação das recuperações em diferentes tensões, nomeadamente a 100 Pa e 3200 Pa, indica uma notável diferença, evidenciada pela grande disparidade entre os valores de recuperação (23,86% e 2,33%, respectivamente) e pelo índice de diferença média percentual entre essas recuperações (90,22%). Tal disparidade sugere uma significativa dependência do comportamento de recuperação em relação à tensão aplicada. Além disso, a análise das compliâncias não recuperáveis, expressas em 100 Pa e 3200 Pa, juntamente com o índice de diferença média percentual entre elas (94,43%), destaca a sensibilidade do ligante asfáltico à variação de tensão e



sua capacidade de recuperação. Para a amostra analisada, os resultados são esperados, uma vez que não foi adotada a implementação de polímeros SBS para dar essa caracterização de recuperação elástica em maiores tensões aplicadas, entretanto, indica altas resistências ao cisalhamento em altas temperaturas, mesmo com o ligante apresentando condições fluidas.

A classificação, portanto, do ligante, sob as condições de PG 82, foi de tráfico médio (“S” *Standard*), entretanto, pode apresentar resistências a tráfegos mais intensos em condições de menores temperaturas.

Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear – LAS

O ensaio simulou a fadiga no ligante de forma acelerada, por meio do princípio do dano contínuo viscoelástico. Para o CAP PRO W os valores de Fadiga A e B foram respectivamente 2571225 e 3,31, já para o CAP Alto módulo 2872894 e 3,16. A junção dos valores de Fadiga A e B são constantes calculadas que se referem ao momento em que as tensões ocorridas se tornarão o ponto de fadiga após a sua aplicação. Os valores encontrados estão próximos, entretanto, o material de alto módulo possui uma vantagem na sua resistência a fadiga, representado na Figura 4 por meio da análise de número de ciclos em função da amplitude de deformação.

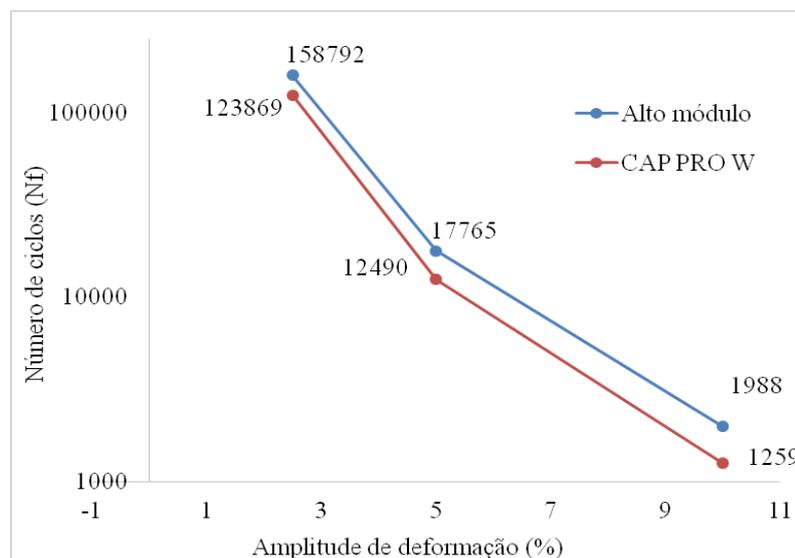


Figura 4. Parâmetro de fadiga

Com a análise do número de ciclos em função da amplitude de deformação, foi possível analisar a resistência da amostra, em que, com a redução no número de ciclos, houve aumento da amplitude de deformação, demonstrando o comportamento de fadiga. Maior amplitude de número de ciclos representa uma maior resistência à fadiga, portanto o ligante modificado obteve melhores resultados, suportando maior quantidade de ciclos.

Dosagem do corpo de prova e avaliação das propriedades

A dosagem foi realizada pelo método *Superpave*, e por se tratar de uma mistura morna, o agregado estava na temperatura de 120 °C, o ligante 153 °C e a compactação foi feita no compactador giratório a 120 °C. Os resultados encontrados foram de 5,03 % para o teor ótimo de ligante,



volume de vazios igual a 4 %, relação betume/vazios 75,44 %, estabilidade 13,25 kN, Fluência 5,22 mm, resistência à tração por compressão diametral 2,77 MPa, resistência ao dano por umidade induzida 95,06 % e adesividade satisfatória.

Teste roda de Hamburgo em misturas asfálticas compactadas – DWT

Para avaliar a capacidade de resistência à deformação permanente da mistura, realizou-se o teste roda de Hamburgo a temperatura de 50 °C. Na Figura 5 é possível observar a variação de ciclos em função da amplitude de deformação até o rompimento do corpo de prova.

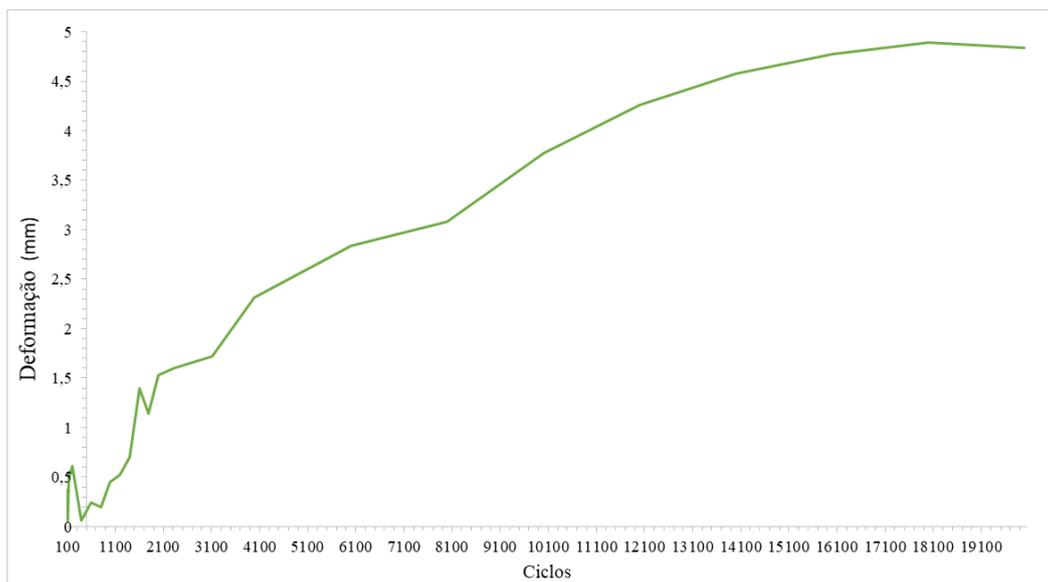


Figura 5. Variação de ciclos na ruptura em função da amplitude de deformação

Ao verificar o resultado obtido no ensaio, após os efeitos de deformação a profundidade final do acúmulo de deformações foi de 4,84 mm, o que corresponde a 8,06% da altura inicial do corpo de prova, sendo assim, o ligante e o método de dosagem adotado proporcionaram baixa deformação permanente, correspondendo com o levantamento reológico somado à escolha de faixa granulométrica graúda.

Determinação do módulo de resiliência

A fim de se obter a capacidade de recuperação elástica da massa asfáltica, realizou-se o ensaio de determinação do módulo de resiliência, adotando resistência à tração de 2,77 MPa. O resultado obtido foi de 52247 MPa em média, pela análise de três corpos de prova, com coeficiente de *Poisson* igual a 0,30, o que indica uma rigidez elevada, que é proporcionada tanto pelo ligante de alto desempenho quanto a escolha de agregados de maior graduação. Além da rigidez, o material também exibiu recuperação em resposta à carga aplicada. Este resultado, em conjunto com a baixa deformação permanente pela Roda de Hamburgo, sugere que o conjunto possui capacidade de suportar o tráfego e resistir à deformação de cargas.

Relacionar os dois ensaios é de grande valia para uma análise abrangente do desempenho dos materiais adotados para o experimento. Enquanto o módulo de resiliência destaca a capacidade da



recuperação à forma original, a deformação permanente apresenta os limites do material em condições de tráfego prolongado.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de uma mistura asfáltica de alto módulo utilizando ligante modificado de alto módulo e compactado em menores temperaturas que o convencional. Os resultados apresentados destacam o promissor desempenho do ligante de alto módulo e a possibilidade de trabalhá-lo na modalidade de mistura morna, mantendo a viscosidade próxima à de um ligante convencional, o que auxilia o processo de usinagem, porém, garantindo as propriedades de um ligante alto módulo com consumo de energia reduzido.

Referente às análises do comportamento reológico, o ligante se mostrou com bom desempenho, com maior resistência à fadiga e deformação permanente se comparado ao não modificado, o que proporciona pavimentos ainda mais resistentes ao tráfego e às condições climáticas. Em relação aos resultados do ensaio de roda de Hamburgo e módulo de resiliência, a mistura indicou boa capacidade de suporte de carga, por meio do ensaio de módulo, e a baixa deformação plástica (representada pelo ensaio de DWT) oferece a avaliação ao longo da vida útil.

Por fim, este estudo possibilita a investigação sobre a viabilidade de desenvolver vias de desempenho elevado garantindo menor consumo energético. Para que isso aconteça, todos os materiais devem manter um controle de processo detalhado, uma vez que os produtos apresentam características únicas. Em relação às limitações apresentadas, estas se dão na validade dos resultados, somente para as condições avaliadas nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- AASHTO T315-10 – Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). 2010.
- ASTM D7643 - Standard Practice for Determining the Continuous Grading Temperatures and Continuous Grades for PG Graded Asphalt Binders. 2016.
- AFNOR P98-140 – Enrobés Hydrocarbonés – Couches d'assises: Enrobé à Module Élevé (EME). 1999.
- ALMEIDA-COSTA, Ana; BENTA, Agostinho. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2308-2317, 2016.
- BENTA, Agostinho et al. Design and performance of a warm high-modulus asphalt concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 55-65, 2015.
- BROSSEAUD, Yves. Les enrobés à module élevé (EME): Bilan de l'expérience française et transfert de technologie. **7° Congrès National de la Route**, 2006.
- CAPITÃO, Silvino Dias; PICADO-SANTOS, Luís. Assessing permanent deformation resistance of high modulus asphalt mixtures. **Journal of transportation engineering**, v. 132, n. 5, p. 394-401, 2006.
- DNER 054/1997 – ME: Equivalente de areia – Método de ensaio. 1997.
- DNIT 446/2024 – ME: Agregados – Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio – Método de ensaio



- DNIT 411/2021 – ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. 2021.
- 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.
- DNIT 447/2024 – ME: Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio. 2024.
- DNIT 136/2018 – ME: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. 2018
- GENG, Han; CLOPOTEL, Cristian S.; BAHIA, Hussain U. Effects of high modulus asphalt binders on performance of typical asphalt pavement structures. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 207-213, 2013.
- HAMZAH, Meor Othman; JAMSHIDI, Ali; SHAHADAN, Zulkurnain. Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO2 emission in the asphalt industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 18, p. 1859-1865, 2010.
- HARITONOV, Viktors et al. Development of high performance asphalt concrete using low quality aggregates. **CIVIL ENGINEERING'13**, v. 100, p. 197, 2013.
- LIANG, Ming et al. Effects of SBS configuration on performance of high modulus bitumen based on dynamic mechanical analysis. **Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske**, v. 65, n. 7-8, p. 379-384, 2016.
- MA, F.; FU, Z. Application of hard asphalt and high modulus asphalt concrete in France. **Journal of China & Foreign Highway**, v. 28, n. 6, p. 221-223, 2008.
- MA, Tao et al. Laboratory performance characteristics of high modulus asphalt mixture with high-content RAP. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 975-982, 2015.
- NBR 16974/2022: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. 1998.
- NBR 12583/2017 - Determinação da adesividade ao ligante betuminoso. 2017.
- NBR 15617/2015 – ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. 2015.
- NBR 11341: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso Cleveland. 2014.
- NBR 15184: Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. 2021.
- NBR 15235: Materiais asfálticos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. 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. 2016.
- NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. 2007.
- NBR 7809: Agregado miúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. 2019.
- RUBIO, M. C. et al. Warm Mix Asphalt: an Overview *Journal of Cleaner Production*, 24. 2012.
- VILLELA, Assis Rodrigues Abbud. Estudo de camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego muito pesado. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- WANG, Chao et al. Experimental study on rheological characteristics and performance of high modulus asphalt binder with different modifiers. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 26-36, 2017.
- XIAO, Feipeng et al. Impacts of high modulus agent and anti-rutting agent on performances of airfield asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 1-9, 2019.
- ZHANG, Ran et al. High temperature performance of SBS modified bio-asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 99-105, 2017.