



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

www.rapvenacor.com.br



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

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM ASFALTO BORRACHA PRODUZIDAS EM USINA E EM LABORATÓRIO

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

Leonardo Lunkes Wagner¹; Marlova Grazziotin Johnston¹; Gracieli Bordin Colpo²; Lelio Antônio Teixeira Brito¹; Washington Peres Núñez¹; Jorge Augusto Pereira Ceratti¹; & Claudio Renato Castro Dias³

RESUMO

A produção de misturas asfálticas a temperaturas mais baixas que as convencionais, por meio do uso de tecnologias que possibilitam a fabricação de misturas mornas, diminuem o impacto ao meio ambiente através da redução da emissão de gases poluentes e do uso de combustíveis fósseis, além de apresentar melhorias nas condições de trabalho, devido à redução da temperatura de compactação. Somado a isso, novos materiais estão sendo buscados para que possam ajudar a melhorar a durabilidade e as propriedades dos pavimentos, sem descuidar de suas condições intrínsecas. Visando contribuir para o estudo destas misturas e para verificar possíveis diferenças entre os modos de produção, o presente trabalho avalia duas misturas mornas, produzidas em usina e laboratório, com a adição de ligante asfáltico modificado com borracha de pneu e aditivo surfactante. Os corpos de prova da mistura produzida em usina foram extraídos do campo, e a mistura produzida em laboratório foi compactada seguindo a metodologia Marshall. Ensaios laboratoriais para avaliação das misturas quanto aos parâmetros volumétricos, rigidez, sensibilidade à umidade, deformação permanente e fadiga foram realizados. Em geral, pôde-se constatar que as misturas produzidas em ambas as condições apresentaram comportamento semelhante em relação aos parâmetros estudados, apesar de diferenças constatadas nos parâmetros volumétricos.

PALAVRAS-CHAVE: misturas asfálticas mornas; asfalto borracha; aditivo surfactante; desempenho.

ABSTRACT

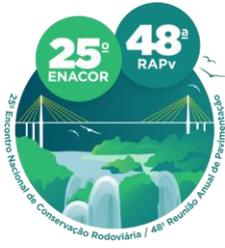
The production of asphalt mixtures at lower temperatures than conventional methods, using technologies that allow for the manufacturing of warm mixes, reduces environmental impact by lowering the emission of polluting gases and the use of fossil fuels. Additionally, it improves working conditions due to the reduced compaction temperature. Furthermore, new materials are being sought to enhance the durability and properties of pavements while considering their intrinsic conditions. With the aim of contributing to the study of these mixtures and examining potential differences in production methods, this study evaluates two warm mixes produced in an asphalt plant and a laboratory, incorporating rubber-modified asphalt binder and a surfactant additive. The test specimens for the plant-produced mixture were extracted from the field, while the laboratory-produced mixture was compacted following the Marshall methodology. Laboratory tests were conducted to evaluate volumetric properties, stiffness, moisture susceptibility, permanent deformation, and fatigue. Overall, it was observed that the mixes produced under both conditions exhibited similar mechanical behavior despite differences in volumetric properties. These findings demonstrate the feasibility of producing warm asphalt mixtures with rubber-modified asphalt and surfactant additives. The study contributes to the understanding of these mixtures and provides insights into their performance in different production settings. The results suggest that warm mixtures can be a viable alternative to conventional hot mixtures, offering environmental benefits and improved work environment conditions while maintaining satisfactory mechanical properties.

KEY WORDS: warm mix asphalt; rubber-modified asphalt; surfactant additive; performance.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e-mail: leonardo.lunkes@ufrgs.br; marlova.johnston@ufrgs.br; gracieli.colpo@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br; washington.nunez@ufrgs.br; jorge.ceratti@ufrgs.br

² Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, e-mail: gracieli.colpo@ufrgs.br.

³ ECORODOVIAS, e-mail: claudio.Dias@ecorodovias.com.br



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Os afundamentos plásticos nas trilhas de roda e o trincamento são defeitos recorrentes nos revestimentos asfálticos ocasionados, na maioria dos casos, pelo elevado volume de tráfego e por temperaturas superiores em determinados períodos do ano. As especificações inadequadas dos materiais constituintes das misturas, também, podem contribuir no surgimento desses defeitos. Isso causa preocupação com a durabilidade das estruturas dos pavimentos, exigindo a utilização de materiais modificados para compor as misturas asfálticas.

Devido ao aumento do volume de tráfego e das cargas por eixo dos caminhões, tem-se percebido um aumento das deformações permanentes e afundamentos plásticos, advindos exclusivamente da camada de revestimento asfáltico (Medina e Mota, 2015). Esta patologia reduz a vida útil do pavimento, o conforto e a segurança do usuário e aumenta os custos operacionais dos veículos.

A deformação permanente é um processo que ocorre de forma simultânea, envolvendo deformações viscosas do ligante e plásticas da estrutura mineral da mistura asfáltica (Joliet e Mallot, 2000). Neste caso tanto o ligante, considerando a consistência e a reologia, quanto o agregado, com as forças de fricção interna entre suas partículas, exercem importante papel no desempenho das misturas asfálticas.

O asfalto borracha (AB) é um ligante asfáltico que resiste bem a temperatura ambiente e até superiores, mantendo suas propriedades elásticas. Esse comportamento é atribuído à estruturação reticulada das moléculas da borracha (Lo Presti, 2013).

As baixas temperaturas, no período de inverno, limitam os trabalhos de pavimentação devido ao resfriamento acelerado da mistura asfáltica, tornando necessário estudos onde a incorporação de um agente surfactante no ligante asfáltico, permita a redução da temperatura na usinagem e na compactação, garantindo qualidade na aplicação da mistura. A redução de temperatura na usinagem e compactação causam um impacto positivo na diminuição da poluição ambiental e no consumo de energia.

Segundo Mahmoud e Bahia (2004) as propriedades mecânicas da mistura asfáltica, expressas por meio de ensaios laboratoriais, representam seu desempenho no campo. Assim, este trabalho apresenta uma análise de desempenho em laboratório de duas misturas asfálticas, uma produzida em usina e outra em laboratório, com ligante modificado por borracha, empregando temperaturas intermediárias no processo de compactação.

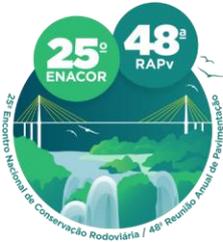
Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o comportamento de duas misturas asfálticas mornas, verificando possíveis diferenças entre os modos de produção, uma produzida em laboratório e outra em usina, com a adição de ligante asfáltico modificado com borracha de pneu e aditivo surfactante

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Asfalto Borracha

A mistura asfáltica que utiliza ligante asfáltico modificado por pó de borracha de pneus inservíveis é comumente denominada de mistura com asfalto borracha. Esta mistura asfáltica vem sendo pesquisada para ajudar a conter o trincamento dos revestimentos asfálticos em rodovias desde os anos 1970. Nos últimos anos as pesquisas se intensificaram sendo possível verificar melhoria no seu desempenho.

Estudos realizados por Specht (2004) identificaram que a adição de borracha no ligante asfáltico indicava uma tendência a reduzir o ângulo de fase, de modo a incrementar a parcela elástica e



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

www.rapvenacor.com.br



aumentar o valor do módulo cisalhante (G^*), melhorando as características de resistência à deformação permanente do ligante. Essas taxas de incremento tendem a ser maiores para os teores de borracha mais elevados.

Núñez et al. (2006) apresentaram os resultados de pesquisa em que se compararam os desempenhos de recapeamentos em concretos asfálticos com ligante convencional (CAP 50/70) e asfalto borracha, como camadas antirreflexão de trincas, solicitados pelo simulador de tráfego em operação no LAPAV/UFRGS. Os autores concluíram que o emprego de asfalto borracha aumentou em cinco vezes a vida útil do recapeamento, em termos de reflexão de trincas.

O trabalho de Rust e Akhalwaya (2018) apresenta uma revisão sobre as pesquisas realizadas pelo Council of Scientific and Industrial Research (CSIR) sobre o retardamento na reflexão de trincas quando é usado revestimento com asfalto borracha. Neste trabalho fica claro a indicação de um desempenho superior de um Asfalto Borracha, informando a decisão do California Department of Transport (Caltrans) sobre a possibilidade de diminuir pela metade a espessura da camada de um revestimento tipo gap graded, quando usado asfalto borracha. Neste mesmo trabalho, também, são apresentadas melhorias quanto à resistência à deformação permanente quando usado asfalto borracha.

Temperatura de Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com a temperatura em que são usinadas, havendo, portanto, misturas asfálticas a quente, misturas asfálticas mornas, misturas asfálticas semi-mornas e misturas asfálticas a frio (Motta, 2011).

As temperaturas de usinagem das misturas asfálticas quentes são bastante elevadas, em torno de 150°C a 180°C, variando de acordo com a viscosidade do ligante utilizado (Balbo, 2007).

A temperatura de produção e compactação de misturas asfálticas que utilizam asfalto modificado com borracha são mais elevadas que aquelas utilizadas na produção de asfaltos convencionais, pois a borracha aumenta a viscosidade do ligante e reduz sua trabalhabilidade. Conseqüentemente, é necessário maior consumo de energia e maior emissão de gases para produção desse tipo de mistura, comprometendo o meio ambiente.

As misturas mornas e semimornas são produzidas, geralmente, com aquecimento parcial dos agregados. Em temperaturas abaixo de 100°C são classificadas como semimornas, acima dessa temperatura são classificadas como mornas (D'Angelo et al., 2008).

Para a produção destas misturas, diversas técnicas foram desenvolvidas na Europa e Estados Unidos, podendo destacar-se as técnicas com mudanças no processo de produção para formação de espuma de asfalto, mistura sequencial, emprego de aditivos químicos, aditivos sintéticos e ceras (NCHRP, 2011).

Além dos benefícios ambientais, as temperaturas reduzidas podem trazer benefícios ao desempenho dos materiais, fornecendo tempo adicional para a compactação da mistura, permitindo uma melhor compactação mesmo em locais de clima mais frio e reduzindo o envelhecimento do ligante, visto que este pode ter seu processo de oxidação acelerado a altas temperaturas (NCHRP, 2011).

Para que seu uso seja justificado, as misturas asfálticas mornas (Warm Mix Asphalt - WMA) devem ter resistência, durabilidade e características de desempenho semelhantes às misturas asfálticas a quente, utilizando temperaturas de produção substancialmente reduzidas (Mocelin, 2015).

De acordo com Johnston et al. (2015), comparando o desempenho em laboratório de misturas quentes e mornas utilizando ligante convencional, concluiu-se que o comportamento à fadiga das misturas é semelhante.



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

www.rapvenacor.com.br



As misturas mornas com asfalto borracha do tipo gap graded, obtidas com aditivo surfactante, mostraram-se suscetíveis à adição de cal, sendo a cal calcítica mais benéfica do que a dolomítica, com aumento da resistência à deformação permanente (Barros, 2017).

Misturas produzidas com ligantes modificados com borracha apresentam uma menor perda de rigidez sob temperatura elevada, sendo menos suscetíveis a susceptibilidade térmica (MORILHA JUNIOR, 2004). Somado a isso, a utilização de asfalto borracha em misturas, deixam-nas mais flexíveis mesmo após o envelhecimento a que ficam submetidas durante a produção, espalhamento e compactação (FONTES, 2009).

Os resultados de módulo dinâmico apresentados por Mocelin (2018) mostram que as misturas mornas, em geral, apresentam menor rigidez, devido à menor exposição dos ligantes às altas temperaturas durante a mistura e compactação e à presença do aditivo surfactante. Nas frequências intermediárias, nas quais normalmente são realizados os ensaios de fadiga, a variação do módulo não foi significativa. Ainda de acordo com o autor, as misturas com asfalto borracha do tipo gap graded, com adição de cal calcítica, perdem mais integridade para um mesmo valor de dano, quando comparadas às outras misturas, o que pode ser atribuído ao seu esqueleto mineral descontínuo. Além disso, a mistura morna apresenta menor tolerância ao dano e, como as misturas analisadas no estudo possuem mesma granulometria e teor de ligante, esta diferença pode ser atribuída ao aditivo surfactante.

Fransqui. et al. (2018) apresentam um estudo com mistura morna utilizando asfalto modificado com borracha (140°C – 170°C) e agregados com elevada porosidade. A mistura morna foi obtida utilizando um aditivo químico e os resultados foram comparados com a mistura de asfalto borracha base, obtida com o mesmo tipo de agregado e produzida a elevadas temperaturas (180°C). Os resultados mostraram que a mistura produzida a temperatura mais baixa, acima de 140°C, manteve o desempenho mecânico exigido pelas especificações.

MATERIAIS E METODOS

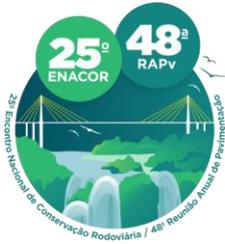
A avaliação das misturas de asfalto borracha morno, mistura A e mistura B, apresentadas neste trabalho, foi realizada por meio da análise dos resultados de ensaios laboratoriais executados em um Laboratório de Pavimentação de uma Universidade, com o intuito de verificar os parâmetros de desempenho de ambas. A mistura A foi fornecida por uma empresa concessionária, que estava utilizando a mistura em uma obra. A mistura A foi produzida em usina de asfalto e corpos de prova extraídos de campo. A mistura B foi produzida em laboratório, com corpos de prova compactados conforme metodologia Marshall e compactador giratório.

Caracterização dos agregados minerais

Os agregados minerais de origem granítica, utilizados nesta pesquisa, são provenientes da pedra SBS BR 293, localizada em Capão do Leão, no Rio Grande do Sul. As propriedades dos agregados estão apresentadas na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1. Ensaios de aceitação dos agregados utilizados no estudo.

Propriedade	Método	Especificação DNIT	Resultados		
			3/4"	3/8"	Pó de pedra
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	> 0,5	3,12	0,6	
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97	≥ 55%			77%



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

www.rapvenacor.com.br



Propriedade	Método	Especificação DNIT	Resultados		
			3/4"	3/8"	Pó de pedra
Adesividade à Ligante Betuminoso	DNER-ME 078/94	Satisfatório	Satisfatório		
Desgaste à Abrasão	DNER-ME 035/98	≤ 50%	23,80%	29,96%	
Durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio	DNER-ME 089/94	≤ 12%		6,1	

Tabela 2. Características dos agregados utilizados no estudo.

Propriedade	Método	Resultados		
		3/4"	3/8"	Pó de pedra
Massa Esp. Real- Agregado Graúdo (g/cm ³)	DNER-ME 081/98	2,645	2,620	-
Massa Esp. Real- Agregado Miúdo (g/cm ³)	DNER-ME 084/95	-	-	1,880
Massa Esp. Aparente do Grão (g/cm ³)	DNER-ME 081/98	2,576	2,492	-
Absorção (%)	DNER-ME 081/98	1,01	1,89	-

A dosagem das misturas foi executada atendendo a norma DNIT 112/2009-ES - Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico com asfalto borracha, via úmida, tipo “Terminal Blending” – Especificação de Serviço, visando a faixa B do DNIT.

A composição granulométrica das misturas asfálticas com asfalto borracha, utilizadas neste estudo, é composta por 45% de brita 3/4", 15% de brita 3/8", 38% de pó de pedra e 2% de cal. As duas misturas são similares apresentando uma pequena diferença na distribuição dos agregados devido aos períodos diferentes em que os materiais foram coletados, conforme apresentado na Figura 1.

Composição Granulométrica - Faixa B DNIT - 112/2009 ES

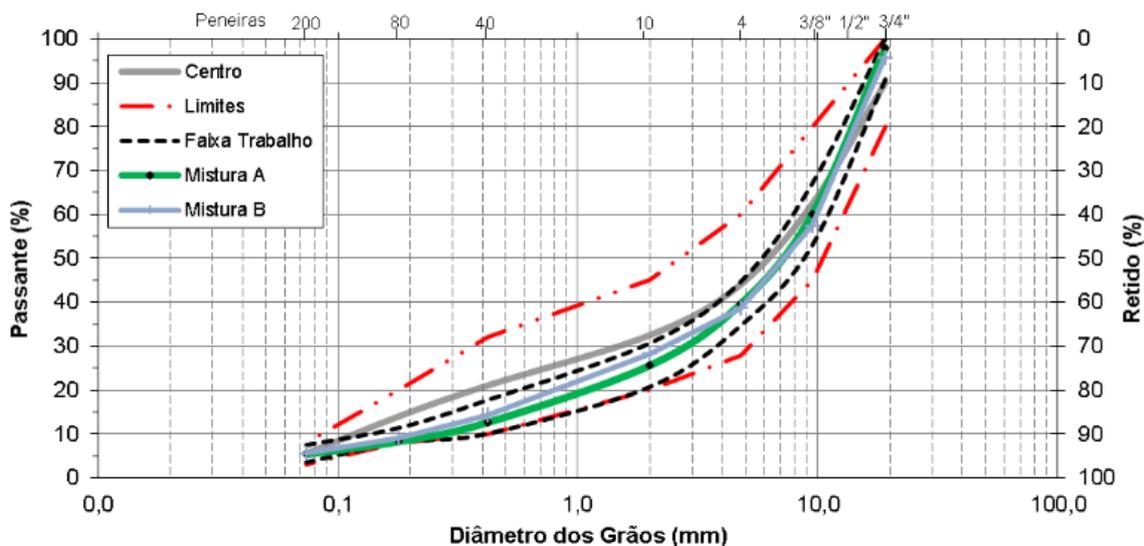
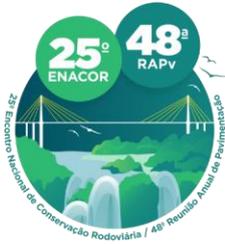


Figura 1: Composição granulométrica das misturas asfálticas.



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

www.rapvenacor.com.br



Caracterização do Ligante Asfáltico Modificado com Borracha e Aditivo Evotherm

O ligante asfáltico modificado com borracha utilizado para a execução das misturas foi o ECOFLEX B 3G, produzido pela GRECA Asfaltos. Este ligante, segundo certificado do produto, possui aditivo surfactante EVOTHERM com percentual de 0,4% em peso do ligante. A caracterização do ligante ECOFLEX B 3G antes e após envelhecimento no RTFOT é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização do ligante ECOFLEX B 3G antes e após envelhecimento.

Propriedade	Método	Limites ANP n°39/2008	Resultados ECOFLEX B 3G
Densidade (g/cm ³)	NBR 6296	-	1,018
Ponto de Amolecimento (°C)	NBR6560	50 min.	55
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576	30 -70	45,2
Recuperação elástica a 25°C, 10 cm, mín. (%)	NBR15086	50 min.	73,7
Viscosidade Brookfield 175°C (cP)	NBR15184	800 - 2000	1968
Após RTFOT			
Varição do PA, °C, máx.	NBR 6560	10	5
Porcentagem de penetração original, mín.	NBR 6576	55	84
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín. penetração original, mín.	NBR15086	100	119

Temperatura dos Materiais Utilizados nas Dosagens

De acordo com GRECA Asfaltos (2010), o ECOFLEX B 3G é uma nova geração de asfaltos modificados por borracha, que foi criado para permitir a usinagem de misturas asfálticas com asfalto borracha em temperaturas inferiores às anteriormente utilizadas; chegando aos mesmos parâmetros dos cimentos asfálticos tradicionais (CAP 50/70 e CAP 30/45), sem comprometer as grandezas físicas e volumétricas das misturas produzidas com este tipo de ligante.

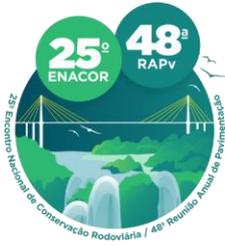
As misturas asfálticas mornas com ligante modificado por borracha, apresentadas neste artigo, foram executadas com o ligante ECOFLEX B 3G. A Tabela 4 apresenta as temperaturas utilizadas normalmente em misturas asfálticas a quente com ligante modificado por borracha ECOFLEX B (Greca Asfaltos, 2010) e as temperaturas utilizadas nas misturas estudadas.

Tabela 4. Temperatura dos materiais – dosagem com asfalto borracha

Material empregado	Asfalto Borracha ECOFLEX B Greca Asfaltos (2010) (°C)	Asfalto Borracha	Asfalto Borracha
		ECOFLEX B 3G Mistura A (°C)	ECOFLEX B 3G Mistura B (°C)
Agregados	180	168	165
Ligante	175	175	175
Compactação	160	155	145

Métodos

Foram realizados diferentes ensaios a fim de comparar o comportamento das duas misturas. O Ensaio de dano por umidade induzida foi realizado de acordo com a norma DNIT 180/2018 – ME (2018) em corpos de prova de misturas asfálticas moldados com volume de vazios igual a 7± 1%.



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

www.rapvenacor.com.br



Neste caso, a análise é realizada pela relação entre as resistências à tração de amostras previamente condicionadas e amostras sem condicionamento. De acordo com Bernucci et al. (2022), para misturas contínuas, o valor mínimo de resistência retida à tração (RRT) obtida no ensaio deve ser de 80%. Conforme a norma DNIT 112/2009 – ES (2009), a razão da resistência à tração por compressão diametral estática antes e após o condicionamento deve ser superior a 70%.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) foi realizado seguindo os procedimentos recomendados pela norma DNIT 136/2018-ME (2018). O ensaio consiste em aplicar uma carga de compressão estática à velocidade constante de 0,8 mm/s, em corpos de provas cilíndricos com dimensões Marshall (Vv de projeto) e temperatura de 25 °C (4 horas de condicionamento em estufa). A carga é aplicada até que haja a ruptura da amostra. Assume-se que esta ruptura ocorre devido os esforços de tração gerados no plano perpendicular à aplicação da carga.

Para a realização do ensaio de módulo de resiliência (MR) foi utilizada a norma DNIT 135/2018 – ME (2018), sendo o MR a relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo corpo de prova (CP). Os CP utilizados para o ensaio de MR foram moldados no teor de projeto e volume de vazios das respectivas misturas asfálticas, com condicionamento de 4 horas em estufa à 25°C. O carregamento aplicado no ensaio foi 15 % do valor da RT, previamente determinada.

A deformação permanente foi analisada através do ensaio uniaxial de carga repetida. O ensaio consiste na aplicação de carregamento cíclico de compressão uniaxial no formato haversine, com frequência de 0,1s de carregamento seguido por 0,9s de repouso e as deformações acumuladas são obtidas através do número de ciclos (NBR 16505, 2016). O ensaio é dividido em três estágios de deformação. O número de ciclos onde o ensaio passa da segunda fase para a terceira fase é referido com Flow Number (FN). O FN é o número do ciclo no qual a taxa de deformação é mínima e no qual o CP começa a entrar na fase de cisalhamento constante.

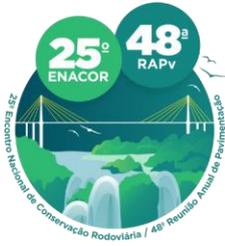
Os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos foram realizados no equipamento IPC Global - modelo CS 7800. Este equipamento e o modo de sua utilização estão descritos em Colpo (2014). Os ensaios foram realizados sob modo de carregamento à deformação controlada, na frequência de 10Hz, com pulso de carga senoidal, de acordo com a norma norte-americana AASHTO T-321-07 (2017), à temperatura de 20°C. A redução em 50% da rigidez inicial da mistura, representada pelo módulo de rigidez à flexão inicial, foi considerada como critério utilizado para término do ensaio. Foram estipulados três diferentes níveis de deformação para os ensaios, e consideradas três amostras ensaiadas para cada nível.

RESULTADOS E ANÁLISES

A avaliação das misturas asfálticas apresentadas neste trabalho foi realizada através da análise dos resultados de ensaios laboratoriais realizados.

Parâmetros Volumétricos de Projeto

As propriedades volumétricas da mistura A (usinada) e da mistura B (laboratório) obtidas em projeto de dosagem estão apresentadas na Tabela 5. Os resultados da mistura B representam os parâmetros volumétricos obtidos em laboratório ao reproduzir a dosagem realizada em usina. Vale ressaltar que a mistura B foi compactada em laboratório na temperatura de 145°C e a mistura A foi compactada em usina a 155°C.



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 5. Propriedades volumétricas das misturas estudadas

Propriedade	DNIT-ES 112/2009 camada rolamento	Mistura A	Mistura B
Teor de asfalto (%)	--	5,0	4,9
Volume de Vazios (%)	3 a 5	5,0	3,8
Relação Betume Vazios (%)	65 a 78	69,5	74,8
Vazios do Agregado Mineral (%)	>13	16,40	15,05
Massa Esp. Max. Medida (g/cm ³)	--	2,419	2,420
Massa Esp. Aparente (g/cm ³)	--	2,305	2,327
Estabilidade (kgf)	> 800	800	1256
Fluência (1/100 in)	8 a 16	11,90	14,00

Observa-se que a mistura produzida e compactada em laboratório apresenta volume de vazios inferior ao da mistura produzida e compactada em usina, mesmo com temperatura de compactação 10°C inferior. Isto pode ter ocorrido devido à um possível maior envelhecimento da mistura usinada, e consequentemente maior enrijecimento, por exposição a temperaturas mais elevadas durante a produção.

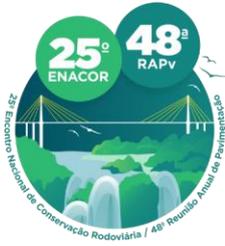
Parâmetros Mecânicos

O estudo do dano por umidade induzida, em corpos de prova moldados em laboratório com volume de vazios de 6% a 8%, foi realizado com a mistura A (usinada) e com a mistura B (laboratório). A resistência retida à tração (RRT) encontrada para a mistura A foi de 93%, enquanto para a mistura B foi de 88%. Ambas as misturas atenderam ao valor mínimo de 80%, conforme Bernucci et al. (2022).

Em relação aos resultados dos ensaios de deformação permanente pelo método do Flow Number, foi realizado ensaio uniaxial de carga repetida apenas para a mistura A. Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos, com 150 mm ($\pm 2,5$ mm) de altura e 102 mm ($\pm 2,0$ mm) de diâmetro e volume de vazios (Vv) de 7 % \pm 0,5 %. As amostras foram moldadas com a mistura coletada na usina e submetidos à temperatura de 60°C (com condicionamento prévio de no mínimo 3 horas), atendendo a norma NBR 16505 (2016). O resultado do ensaio indicou um FN médio de 198 ciclos. Pode-se constatar que, de forma geral, misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados por borracha apresentam resultados de Flow Number inferiores a 500 ciclos, independente da composição granulométrica empregada, conforme valores obtidos por Barros (2017), Faccin (2018) e Silva et al. (2022).

Os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração foram realizados em corpos de prova moldados pela metodologia Marshall em usina (mistura A) e em laboratório (mistura B). Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 6.

Os resultados dos parâmetros mecânicos de rigidez e resistência foram semelhantes para as misturas A e B, atendendo ao valor mínimo de resistência à tração por compressão diametral de 0,75 MPa, à temperatura de 25°C, exigido pela especificação DNIT-ES 112 (2009).



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 6. Resultados dos ensaios de MR e RT das misturas estudadas.

Mistura A			Mistura B		
Vv (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	Vv (%)	MR (MPa)	RT (MPa)
5,1	-	1,10	4,1	-	1,02
5,1	3029	0,92	4,5	4227	0,99
5,3	3629	1,06	4,9	3226	0,92
5,4	4311	1,13	4,6	3632	0,93
Média	3656	1,05	Média	3695	0,97
Desv. Pad.	641,44	0,09	Desv. Pad.	503,46	0,05
CV (%)	17,54	8,82	CV (%)	13,63	4,97

Os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos foram realizados somente para mistura A, em vigotas obtidas de placas extraídas da rodovia BR 116/RS, km 83+500 da pista norte, na terceira faixa. A redução em 50% da rigidez inicial da mistura, representada pelo módulo de rigidez à flexão inicial, foi considerada como critério utilizado para término do ensaio. Foram selecionados três diferentes níveis de deformação, sendo 300, 400 e 500 microdeformações, e para cada nível foram ensaiadas três amostras. Na Figura 2 consta o modelo obtido para análise do número de ciclos em função da amplitude de deformação de tração da mistura A.

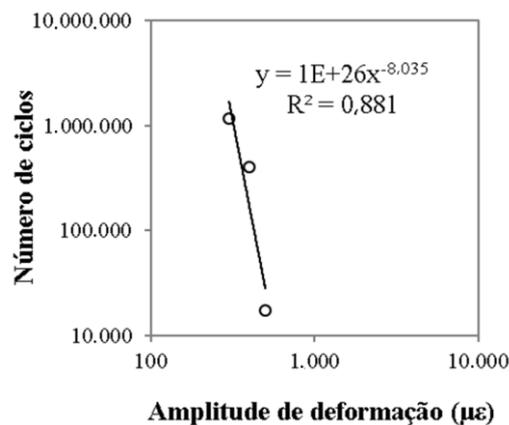
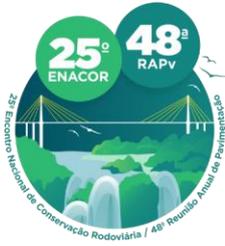


Figura 2. Resultados de fadiga à flexão em quatro pontos para mistura A

A Mistura A, com asfalto borracha a temperatura intermediária foi comparada com uma mistura com asfalto polimerizada utilizada por Colpo (2014). Observa-se que a mistura A, apresenta maior valor (em módulo) do parâmetro b do modelo ($y = a \cdot x^{-b}$) quando comparado a uma mistura com asfalto polimerizado ($b = -5,6$) de Colpo (2014), ambas misturas ensaiadas na temperatura de 20°C. Isto significa que a vida de fadiga da mistura A é mais dependente da variação do nível de deformação de tração, nesta condição analisada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados dos ensaios apresentados, o estudo de uma nova mistura, mistura B, com temperatura de compactação 10°C abaixo da mistura utilizada em campo, mistura A, não



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

www.rapvenacor.com.br



resultaram em mudança significativa de comportamento em termos de resistência, rigidez e sensibilidade à água.

Considerando os resultados de fadiga à flexão em quatro pontos e FN, a mistura A, utilizada em campo, pode ser considerada como representativa de misturas elaboradas a temperaturas intermediárias com asfalto borracha.

Agradecimentos

Os autores agradecem a à concessionária ECOSUL que forneceu o material para o estudo, parte de uma pesquisa RDT aprovada pela ANTT, bem como ao Laboratório de Pavimentação de UFRGS que permitiu a execução do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T 321-17. (2017) Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending. American Association of State and Highway Transportation Officials
- ABNT (2012) NBR 6296 - Produtos betuminosos semissólidos — Determinação da massa específica e densidade relativa. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 6560 - Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2007) NBR 6576 - Materiais asfálticos - Determinação da penetração Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2006) NBR 15086 - Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2021) NBR 15184 - Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016) NBR 16505 - Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (2008). Cimentos RESOLUÇÃO ANP Nº 39, DE 24.12.2008 - DOU 26.12.2008.
- BALBO, J. T. (2007) Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, São Paulo.
- BARROS, L. M.; (2017) Deformação permanente de misturas asfálticas: Avaliação do desempenho pelo critério de flow number de misturas quentes e mornas. Trabalho de Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2022). Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto;
- COLPO, G. B. (2014) Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre;
- DNER – ME 035/98 (1998). Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Departamento Nacional de estradas e rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER – ME 054/97 (1997) Equivalente de Areia. Departamento Nacional de estradas e rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER – ME 078/94 (1994). Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Departamento Nacional de estradas e rodagem, Rio de Janeiro.



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

www.rapvenacor.com.br



DNER – ME 081/98 (1998). Agregados- determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Departamento Nacional de estradas e rodagem, Rio de Janeiro.

DNER – ME 084/95 (1995). Agregado miúdo – determinação da densidade real. Departamento Nacional de estradas e rodagem, Rio de Janeiro.

DNER – ME 086/94 (1994). Agregado – Determinação do índice de forma. Departamento Nacional de estradas e rodagem, Rio de Janeiro.

DNER – ME 089/94 (1994) Agregados-Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Departamento Nacional de estradas e rodagem, Rio de Janeiro.

DNIT 112/2009-ES (2009) Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico com asfalto borracha, via úmida, tipo “Terminal Blending” – Especificação de Serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.

DNIT 136/2018-ME (2018) Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.

DNIT 135/2018-ME (2018). Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.

DNIT 180/2018 –ME (2018) Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.

D'ANGELO, J. D.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. (2008) Warm-mix asphalt: european practice. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration.

FACCIN, C. (2018). Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

FRANESQUI, M. A.; et al., (2018) Asphalt-rubber mixtures with Warm Mix Asphalt technology and high porosity volcanic aggregates.

FONTES, L. P. T. DA L. Otimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos. [s.l.] Universidade do Minho, 2009.

GRECA Asfaltos (2010), ECOFLEXPAVE 3a Geração. FATOS & ASFALTOS Informativo quadrimestral GRECA Asfaltos, ano 7, n°22.

JOHNSTON, M. G., et al., (2015). Estudo de fadiga em laboratório de misturas asfálticas mornas com utilização de ensaios de tração indireta por compressão diametral. XVIII Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA);

JOLIET, Y.; MALLOT, M., (2000) Precautions when interpreting rutting results from the LCPC traffic simulator. 2º Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona.

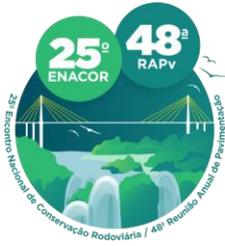
LO PRESTI, D.(2013); Recycled Tire Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. Construction and Building Materials Journal. Volume 49, Pp. 863-881. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. (2004) Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. Wisconsin highway research program 0092-01-02, Madison, Wisconsin, EUA.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2015) Mecânica dos Pavimentos. 3º ed. – Interciência, Rio de Janeiro, RJ.

MOTTA, Rosângela dos Santos (2011). Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo de Energia. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, USP, São Paulo.

MOCELIN, D. M. (2015) Avaliação da Trabalhabilidade de Misturas Asfálticas Mornas com Emprego de Aditivo Surfactante. Trabalho de Diplomação (Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.



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

www.rapvenacor.com.br



MOCELIN, D. M.; BRITO, L. A. T.; JOHNSTON, M. G.; ALVES, V. S.; COLPO, G. B.; CERATTI, J. (2017) A. P. Evaluation of Workability of Warm Mix Asphalt Through CDI Parameter and Air Voids. *Transport Infrastructure and Systems*. 1ed. London: CRC Press/Balkema, v. 1, p. 335-342..

MOCELIN, D. M.; (2018) Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico. Dissertação de Mestrado. PPGCI/UFRGS (Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MORILHA JUNIOR, A. Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 165, 2004.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. (2011) Mix design practices for warm mix asphalt. Washington D. C.: Transportation Research Board, Report 691.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; THEISEN, K. M.; MORILHA, A. (2006).; Accelerated Pavement Testing to Compare Efficiency of Overlay Materials Used in Brazil. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 1974(1):138-144. DOI: 10.1177/0361198106197400116.

RUST, F.C.; AKHALWAYA, I. (2018) Retarding Crack Reflection Using Bitumen-Rubber Seals and Overlays- Historic Overview of CSIR Research. *Proceedings of the Rubberized Asphalt, Asphalt Rubber 2018 Conference, RAR 2018 Kruger National Park, South Africa*.

SILVA, D. C da; MENSCH, N. G.; PIVETTA, F. C.; BRITO, L. A. T. (2022). Análise estatística da deformação permanente em misturas asfálticas com variações de ligantes e faixas granulométricas. 24 ENACOR e 47 RAPV. Bento Gonçalves.

SPECHT, L. P. (2004) Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada com Pneus. Porto Alegre. Tese de Doutorado em Engenharia, UFRGS.