

AVALIAÇÃO TÉCNICO-AMBIENTAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS: RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA DE REVESTIMENTO E EMISSÃO DE POLUENTES

**LUIZY BORGES VIEGAS¹; LAUREN VASQUES HOLZ²; LEONARDO MACHADO
MENDES³; MILENA CARDOSO NEITZEL⁴; PRISCILA MILECH THEISEN⁵;
KLAUS MACHADO THEISEN⁶**

¹Universidade Federal de Pelotas – viegasluizy@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – teclaurenholz@outlook.com

³Universidade Federal de Pelotas – leonardo.machado@ufpel.edu.br

⁴Universidade Federal de Pelotas – milenacneitzel@hotmail.com

⁵Universidade Federal do Rio Grande do Sul – priscila.milech@gmail.com

⁶Universidade Federal de Pelotas – theisenkm@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação asfáltica é um componente essencial da infraestrutura de transportes, sobretudo em países como o Brasil, onde a malha rodoviária constitui o principal meio de escoamento da produção nacional. Entretanto, as misturas asfálticas a quente (HMA – *Hot Mix Asphalt*), tradicionalmente utilizadas, são produzidas em temperaturas elevadas, variando entre 150 °C e 180 °C, o que resulta em elevada emissão de compostos orgânicos voláteis e fumaça, contribuindo para a poluição atmosférica e o aumento dos gases de efeito estufa (RÄDER, 2018; BALBO, 2007). Diante desse cenário, cresce a busca por soluções mais sustentáveis que mantenham a qualidade da pavimentação e, ao mesmo tempo, reduzam os impactos ambientais. Nesse contexto, destacam-se as misturas mornas (WMA – *Warm Mix Asphalt*), desenvolvidas para reduzir as temperaturas de usinagem e compactação em torno de 30 °C a 50 °C, quando comparadas às misturas a quente, possibilitando menor consumo de energia, redução nas emissões de poluentes, melhores condições de trabalho e menor envelhecimento do ligante asfáltico (NEWCOMB, 2006; PROWELL et al., 2007; D'ANGELO et al., 2008). As misturas asfálticas podem ser classificadas segundo a temperatura de usinagem (MOTTA, 2011). Quando produzidas abaixo de 100 °C, são denominadas semimornas, enquanto acima desse valor são classificadas como mornas (D'ANGELO et al., 2008). A redução das temperaturas é alcançada principalmente pelo uso de aditivos químicos, orgânicos ou processos de espumação da água, que diminuem a viscosidade do ligante. Tais avanços permitem benefícios adicionais, como a possibilidade de transporte por maiores distâncias, a viabilidade de compactação em climas mais frios e a economia energética que pode chegar a cerca de 45%, resultando em menores custos e emissões de poluentes (D'ANGELO et al., 2008). Todavia, os estudos também mostram que o módulo de resiliência (*resilient modulus*) das WMA tende a ser inferior ao das HMA, especialmente devido à presença de aditivos como zeólitas ou Evotherm, que diminuem a rigidez do ligante (HILAL et al., 2022; IMANEUL et al., 2023). Este menor módulo pode exigir revestimentos mais espessos para atender aos mesmos níveis de desempenho estrutural. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo realizar o dimensionamento mecânico de um pavimento, comparando as espessuras de revestimento necessárias para HMA e WMA, correlacionando o percentual de aumento de espessura com o percentual de redução de emissões de poluentes proporcionada pelas misturas mornas.

2. METODOLOGIA

Para o trabalho, utilizou-se dados provenientes da tese de MOTTA (2011). A tese original avaliou seis tipos de misturas asfálticas, no qual se utilizou dados de quatro delas, sendo duas a quente (HMA2 e HMA3) e duas mornas (WMA2 e WMA3). Os dados das misturas encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados das Misturas. Fonte: autores, 2025.

Tipo de Misturas	Tipo de Ligante	Teor de Ligante (%)	Volume de Vazios (%)	Módulo de Resiliência (MPa)	Faixa DNIT
HMA2	CAP 30-45	5,0	4,8	3791	C
WMA2	CAP 30-45	5,0	6,3	2942	C
HMA3	Asfalto Borracha	6,5	7,2	2125	Gap-graded
WMA3	Asfalto Borracha	6,5	6,7	2014	Gap-graded

Em seguida, realizou-se o dimensionamento da espessura de revestimento com cada uma das misturas, utilizando-se o *software* AEMC. Simulou-se pavimentos com revestimento em concreto asfáltico (as quatro misturas citadas), base de brita graduada, sub-base granular e subleito de solo fino, representativo das condições de solo do Sul do Rio Grande do Sul. Para as camadas abaixo do revestimento, foram considerados módulos de resiliência definidos pela Instrução de Projeto P00-001 de São Paulo (DER, 2024), adotando-se valores médios indicados: subleito 50 MPa; sub-base 150 MPa e base 290 MPa. As espessuras de base e sub-base seguiram valores mínimos recomendados pelo Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) para o tráfego considerado, adotando-se 20 e 30 cm para base e sub-base, respectivamente. O tráfego foi estimado pelo número N da equação de CALEGARO (2019), considerando-se o pedágio do Retiro (km 510 da BR 116/RS), resultando $N = 2,67 \times 10^7$ passagens de eixo padrão para 2025. Ademais, considerou-se carga de eixo padrão e coeficientes de Poisson e condições de aderência entre camadas padrão do *software* AEMC. Os critérios de dimensionamento foram os indicados para verificação mecanicista da Instrução de Projeto P00-001 citada, item 5.4.4.

Após a determinação das espessuras de revestimento, a análise prosseguiu com o cálculo do percentual de acréscimo de espessura requerido pelas misturas mornas (WMA2 e WMA3) em relação às suas respectivas misturas a quente de referência (HMA2 e HMA3). Este aumento na espessura, que representa uma medida da perda de eficiência estrutural, foi então confrontado com os dados de redução de emissão de poluentes para tecnologias de misturas mornas, conforme a tese de MOTTA (2011). A partir dessa análise comparativa entre o custo estrutural (maior espessura) e o benefício ambiental (menor emissão), avaliou-se a validade técnica e ambiental da substituição das misturas convencionais pelas misturas mornas no contexto do projeto analisado.

A análise da emissão de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) variou conforme o local e a temperatura de produção. Em laboratório, a mistura a quente com asfalto-borracha (HMA3 a 180°C) gerou 23.061 ng/m³ de HPAs, enquanto sua versão morna (WMA3 a 145°C) produziu 7.924 ng/m³; na usina, a HMA3 (175°C) atingiu 125.870 ng/m³; e na pista, a HMA3 (175°C) apresentou 49.681 ng/m³ contra 14.647 ng/m³ da WMA3 (145°C). Quanto ao consumo

energético, as misturas mornas proporcionaram cerca de 15% de economia para dois projetos distintos. Na Rodovia Presidente Dutra, a produção de 160 toneladas gerou uma economia de R\$ 290,00 em combustível (GLP), atingindo R\$ 930,00 por quilômetro executado, enquanto na Rodovia dos Bandeirantes, a produção de 450 toneladas resultou em uma economia de R\$ 482,40 em óleo BPF, atingindo R\$ 790,00 por quilômetro executado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dimensionamentos revela a seguinte ordem de desempenho estrutural: a HMA2 (28 cm) foi a mais eficiente, seguida pela WMA2 (31 cm), HMA3 (36 cm) e, por fim, a WMA3 (37 cm). Essa variação é diretamente explicada pelo módulo de resiliência (MR), mais elevado nas misturas com ligante CAP 30-45, resultando em melhor distribuição de carga e, conseqüentemente, na necessidade de menores espessuras.

A análise comparativa entre as misturas asfálticas evidencia uma redução significativa nas emissões ao se utilizar a tecnologia morna (WMA3) em relação à quente (HMA3). Para a HMA3, com espessura de 0,36 m, obteve-se um total de 17.885,16 ng/m², enquanto a WMA3, com espessura de 0,37 m, apresentou 5.419,39 ng/m². Isso representa uma diminuição absoluta de 12.465,77 ng/m² e uma redução relativa de aproximadamente 69,7% nas emissões, de modo que a WMA3 emite apenas cerca de 30,3% do valor associado à HMA3, confirmando seu potencial mais sustentável em termos ambientais. Adicionalmente, a tecnologia morna proporciona uma economia de energia consistente de 15%, que se traduz em uma redução de custos diretos entre R\$1,07 e R\$1,81 por tonelada, variando conforme o tipo de combustível utilizado na usina. Esses dados combinados demonstraram um benefício duplo: um impacto ambiental significativamente menor e uma maior eficiência econômica na produção.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados analisados, conclui-se que a mistura morna (WMA3) não apresentou aumento significativo de espessura em relação à mistura quente (HMA3). O dimensionamento exigiu uma camada de 37 cm para a mistura morna, apenas 1 cm a mais que os 36 cm necessários para a mistura a quente, representando um acréscimo mínimo no volume de material. Frente à expressiva redução na emissão de poluentes, essa maior espessura é amplamente justificada e válida. A análise ponderada demonstrou que, mesmo com a necessidade de uma camada ligeiramente mais espessa, a mistura morna resultou em uma redução de quase 70% na emissão total de poluentes por metro quadrado. Portanto, o pequeno custo associado ao volume adicional de material é insignificante quando comparado ao benefício ambiental massivo, tornando a aplicação da mistura morna uma escolha tecnicamente viável e muito superior do ponto de vista da sustentabilidade. Cabe destacar que a tese de Motta (2011) não apresentou dados de emissões para as misturas HMA2 e WMA2, possivelmente em razão da volatilização de compostos orgânicos durante a produção. Em temperaturas elevadas, entre 150 e 180 °C, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) tendem a volatilizar, aumentando o potencial de exposição por inalação. Ainda assim, pode-se inferir que a relação entre essas misturas seguiria o mesmo padrão observado para HMA3 e WMA3, em que a mistura quente apresenta maiores níveis de poluentes em comparação à morna.

Os dados, portanto, confirmam um duplo benefício: menor impacto ambiental e maior eficiência no processo produtivo, reforçando a viabilidade técnica e a superioridade sustentável da adoção das misturas mornas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBO, J. T. (2007) **Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos, São Paulo.

CALEGARO, G. L. **Um estudo técnico comparativo entre métodos de recuperação estrutural de pavimentos normalizados pelo DNIT/DNER e retroanálise**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas.

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. **Warm-mix asphalt: european practice**. International Technology Scanning Program. Virginia: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2008.

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. DER/SP. IP-DE-P00/001 B. **Instrução de Projeto – Projeto de Pavimentação**, 2024.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).

HILAL, M. M. et al. (2022). **As WMA mixtures exhibited lower resilient modulus than HMA for both percentages of zeolite**. *Applied Sciences*. repositorio.ifpe.edu.br/3ResearchGate+3antt.gov.br+3ScienceDirectMDPI

IMANEUL (2023). **On the other hand, the resilient modulus of WMA is lower than that of HMA due to the presence of Evotherm which softens the asphalt**.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. 2011. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

NEWCOMB, D. **An introduction to warm mix asphalt**. Lanham: National Asphalt Pavement Association, 2006.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. **“Warm-mix asphalt: best practices”**. National Asphalt Pavement Association. Lanham. 27f. 2007.

RÄDER, A. S. **Avaliação das misturas asfálticas mornas como alternativa sustentável às misturas a quente**. In: *Anais do Encontro de Sustentabilidade em Projeto*. UFSC, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/245702/ANAIS-ENSUS-2018-Volume-III-135-143.pdf>.