

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)

DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS SUSTENTÁVEIS: EQUILIBRANDO CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS, DE CUSTOS E DE DESEMPENHO

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

Marcos Lamha Rocha¹; Marcela Maria Toscana Krau¹; Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza¹; Francisco Thiago Sacramento Aragão¹; Luis Alberto Herrmann do Nascimento²

RESUMO

Este estudo comparou o desempenho de oito diferentes misturas asfálticas, incluindo misturas convencionais, mornas e com uso de RAP, levando em conta aspectos de desempenho, custo e impactos de mudança climática, ecotoxicidade, uso de solo e recursos fósseis. As misturas mornas apresentaram menor rigidez, enquanto o RAP conferiu maior rigidez às misturas, embora com diferenças relativamente baixas. A análise de fadiga mostrou que as misturas com menor volume de vazios apresentaram melhor desempenho. Quanto à deformação permanente, as misturas mais mornas e com maior volume de vazios mostraram maior susceptibilidade ao dano. A análise de custo indicou redução nos custos para as misturas com RAP, enquanto a análise de impacto ambiental apontou um menor impacto para as misturas mornas e com RAP em relação às convencionais. A otimização de misturas que levem em conta simultaneamente desempenho, custo e impacto ambiental pode ser complexa, mas é possível quantificar o efeito de cada fator e, a partir disso, tomar uma decisão informada que leve em consideração todos eles. Com base em um ranking dos aspectos de desempenho mecânico, econômico e ambiental para cada cenário avaliado, foi possível identificar quais apresentavam o melhor equilíbrio entre esses fatores, facilitando a tomada de decisão para a escolha da mistura mais adequada ao local de execução do projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Dosagem balanceada, impacto ambiental, RAP, mistura morna

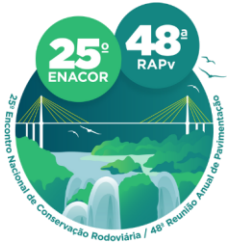
ABSTRACT

This study compared the performance of eight different asphalt mixtures, including conventional, warm, and RAP mixes, taking into account aspects of performance, cost, and impacts of climate change, ecotoxicity, land use and fossil resources. Warm mixtures presented lower stiffness, while RAP were stiffened the mixtures, although with relatively low differences. The fatigue analysis showed that mixes with lower voids in mineral aggregate (VMA) presented better performance. As for permanent deformation, warmer mixtures with higher VMA were more susceptible to damage. The cost analysis indicated a cost reduction for mixes with RAP, while the environmental impact analysis showed a lower impact for warm and RAP mixes compared to conventional ones. The optimization of mixtures that simultaneously consider performance, cost, and environmental impacts can be complex, but it is possible to quantify the effect of each aspect and make an informed decision that takes all of them into account. Based on a ranking performance of the variable factors considered, it was possible to identify the mixes that presented the best balance between these factors, facilitating the decision-making process for choosing the most appropriate mixture for the specific location of the pavement application.

KEY WORDS: Balanced mixture design, environmental impact, RAP, WMA

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, marcoslr94@gmail.com; marcela.krau@coc.ufrj.br; clara.souza@coc.ufrj.br; fthiago@coc.ufrj.br

² CENPES/PETROBRAS, luisnascimento@petrobras.com.br



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A dosagem de misturas asfálticas é um processo essencial na produção de pavimentos de alta qualidade e durabilidade. O processo de dosagem favorece que sejam determinadas as quantidades de ligante asfáltico, agregados e outros aditivos necessários para atender às especificações de projeto e também está relacionado com o desempenho adequado de longo prazo no campo.

Atualmente, existem várias metodologias de dosagem de misturas asfálticas convencionais, como o método Superpave, o método Hveem e o método Marshall. Embora esses métodos tenham sido utilizados por muitos anos, eles ainda apresentam algumas limitações que podem afetar a qualidade e a durabilidade da mistura (BENNERT *et al.*, 2021).

Além disso, as especificações volumétricas são apenas válidas quando não há aditivos ou tecnologias especiais utilizadas na produção de asfalto. Assim, o uso de novos aditivos e estratégias, como o pavimento asfáltico reciclado (*Reclaimed Asphalt Pavement*, RAP, em inglês), misturas mornas (*Warm Mixture Asphalt*, WMA, em inglês) e os ligantes asfálticos modificados por polímeros, na composição da mistura asfáltica pode complicar o processo de dosagem e resultar em uma previsão de desempenho de campo não confiável.

Para resolver essas limitações, novas metodologias de dosagem, como a Dosagem de Mistura Balanceada (*Balanced Mix Design*, BMD, em inglês), foram propostas. A BMD incorpora ensaios de desempenho como de deformação permanente (DP) e fadiga, por exemplo, para obter a melhor proporção dos componentes na mistura. Essa abordagem tem como objetivo garantir que a mistura tenha um desempenho a longo prazo satisfatório no pavimento (WEST *et al.*, 2018).

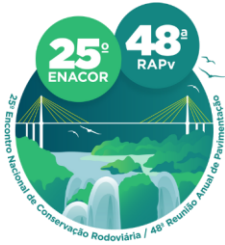
Atualmente, observa-se a necessidade da incorporação de ensaios de desempenho aos métodos dosagem vigentes para a produção de misturas que resistam melhor às ações do tráfego e do clima (ROCHA *et al.*, 2023). Além da verificação de desempenho, os projetos de misturas asfálticas também devem ser avaliados quanto ao custo do ciclo de vida e o impacto ambiental para incentivar alternativas duráveis e sustentáveis.

Entre várias estratégias sustentáveis, duas que têm ganhado a atenção de pesquisadores e agências são o uso de RAP na mistura (CHAVES, 2023; FROTA *et al.*, 2022; UNFER FILHO, 2019) e de misturas mornas (KRAU, 2023; BRESSI *et al.*, 2021; ALLOZA *et al.*, 2015; GIANI *et al.*, 2015). O uso de RAP em misturas asfálticas quentes tem o potencial não apenas de criar economia direta de custos, mas também de conservar recursos naturais e promover práticas sustentáveis na indústria da pavimentação asfáltica, incentivando a reciclagem. Além disso, o melhor desempenho pode levar à economia de custos a longo prazo com base na análise do custo do ciclo de vida (*Life Cycle Cost Analysis*, LCCA, em inglês) das pavimentações asfálticas (TRAN *et al.*, 2022).

Similarmente, o uso de WMA em pavimentos asfálticos apresenta diversas vantagens em relação às misturas convencionais. De acordo com Belc *et al.* (2021), a WMA produz pavimentos com qualidade de desempenho comparável ou superior a temperaturas de produção mais baixas do que as misturas asfálticas padrão. A WMA também proporciona benefícios adicionais, como melhor compactação e redução do consumo de energia (D'ANGELO *et al.*, 2008). Alguns estudos (SHARKAWY *et al.*, 2016; VALDES-VIDAL *et al.*, 2018) mostram o efeito positivo da menor temperatura em misturas com RAP em relação à deformação permanente.

Kumar *et al.* (2022) propuseram uma estrutura de BMD levando em conta desempenho, custo e impacto ambiental. Com base nas análises de LCCA, foi selecionada uma mistura asfáltica mais economicamente e ambientalmente viável para ser utilizada na construção.

A dosagem balanceada, com a consideração de novos materiais e tecnologias, além da análise de custo e do ciclo de vida, ainda é um assunto recente e há muito a ser estudado para compreender melhor a relação entre propriedades dos materiais, volumetria e desempenho das misturas asfálticas.



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

www.rapvenacor.com.br



A utilização de novas tecnologias como RAP e WMA e a adoção de práticas de manutenção e reparo que prolonguem a vida útil do pavimento são importantes para o desenvolvimento de misturas com menor impacto ambiental. Portanto, a consideração dessas estratégias na dosagem de misturas asfálticas pode ajudar a promover práticas mais sustentáveis na indústria de pavimentação asfáltica.

Diante disso, este estudo considera o uso dessas tecnologias sustentáveis na dosagem de misturas asfálticas, a fim de avaliar seus efeitos nas propriedades das misturas. Com a combinação dessas estratégias, espera-se que seja possível desenvolver misturas asfálticas que apresentem desempenho aprimorado e menor impacto ambiental. Assim, o artigo visa contribuir para o avanço do conhecimento sobre dosagem de misturas asfálticas balanceadas, levando em consideração desempenho, custo e sustentabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Para as misturas asfálticas, foram utilizados um ligante CAP 50/70 puro, classificado como um ligante PG 64S-22, e os agregados do tipo gnaiss de uma pedreira no estado de Minas Gerais. Para a produção das misturas mornas, foi utilizado um aditivo produzido e disponibilizado pelo CENPES/PETROBRAS, em um teor de incorporação de 0,35% ao ligante, conforme indicação pelo próprio fornecedor.

Em relação às misturas com RAP, o material reciclado utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro. O agente rejuvenescedor (AR) foi um óleo de base vegetal modificado, considerado como um produto “verde”, que objetiva melhorar a durabilidade e a resistência ao trincamento das misturas asfálticas, em um teor de 1,8% da massa do ligante, de acordo com a dosagem realizada em conjunto com o fornecedor do material.

Três diferentes granulometrias foram utilizadas, visando obter parâmetros volumétricos, como vazios de agregado mineral (VAM) e relação betume-vazio (RBV) mais distintos possíveis. Uma faixa maior de índices volumétricos possibilita uma otimização desses em relação ao desempenho final, por meio de equação de volumetria-desempenho (WANG *et al.*, 2019). As granulometrias (denominadas A, B e C) estão ilustradas na Figura 1. Para as misturas com RAP, o fresado foi incorporado na porcentagem de 20% sobre o volume total da mistura para cada peneira da granulometria C. Ou seja, para cada peneira, 20% da porcentagem retida individual foi substituída pelo RAP (denominada C+RAP). A Tabela 1 resume as propriedades das oito misturas asfálticas avaliadas.

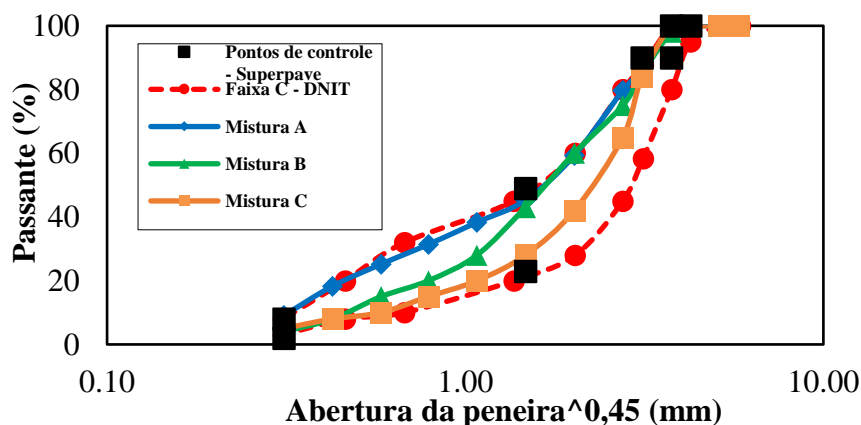
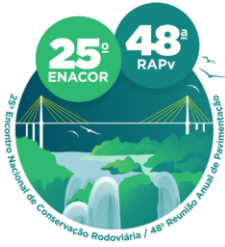


Figura 1. Granulometrias utilizadas



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 1. Propriedades das misturas avaliadas

Mistura	Granulometria	Volume de vazios (%)	Teor de ligante (%)	VAM	RBV	Temperatura	RAP (%)	AR (%)
1	A	3,0	4,41	12,1	75,2	Quente	0	0
2	A	5,0	3,86	12,5	59,9	Quente	0	0
3	B	3,0	4,34	13,1	77,0	Quente	0	0
4	B	5,0	3,67	13,6	63,3	Quente	0	0
5	C	4,0	4,75	14,5	72,4	Quente	0	0
6	C+RAP	4,0	3,81	13,5	70,3	Morna	20	0
7	C+RAP	4,0	3,81	13,5	70,3	Morna	20	1,8
8	C+RAP	4,0	3,81	13,5	70,3	Quente	20	1,8

Ensaio Mecânicos e Simulações

Para avaliar o comportamento mecânico das misturas, os ensaios de módulo dinâmico (MD), fadiga por tração direta e *Stress Sweep Rutting* (SSR) foram realizados. Para os ensaios de MD, foram caracterizadas três réplicas por mistura e cada uma foi ensaiada em quatro temperaturas (4°C, 20°C, 40°C e 54°C) e seis frequências (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz). Deformações entre 50 $\mu\epsilon$ e 75 $\mu\epsilon$ foram toleradas e, para isso, o carregamento compressivo senoidal aplicado foi ajustado para que não houvesse deformações excessivas, que violassem os limites de linearidade.

Os ensaios de tração direta foram realizados à deformação de tração controlada e na frequência de 10 Hz. Os níveis de deformação impostos foram variados para as misturas, a depender do número de ciclos (Nf) necessários para a ruptura da amostra. Neste trabalho, foi observada a queda do ângulo de fase como critério de rompimento e finalização do ensaio.

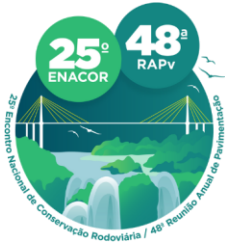
Na avaliação da deformação permanente, o ensaio SSR foi conduzido em duas temperaturas, uma alta (TA), de 54°C, e outra baixa (TB), de 20°C, sob pressão de confinamento constante de 69 KPa (10 psi), com três blocos de carregamento de 200 ciclos, cada um para um nível diferente de tensão desvio. Pelo menos duas réplicas foram ensaiadas para cada temperatura e a diferença relativa da deformação plástica ao final do ensaio entre as réplicas foi inferior a 25%.

Por fim, foi utilizado o programa FlexPAVE™ 1.1 para simular a resposta do pavimento de acordo com condições específicas de clima, tráfego e tipo de estrutura. Neste trabalho, foram simulados os danos gerados ao pavimento pelo trincamento por fadiga e por afundamento de trilha de roda (ATR), utilizando as funções de transferência de NASCIMENTO (2015) e BARROS *et al.* (2022) e com critérios de falha de 30% de área trincada para fadiga e 12,5 mm para deflexão permanente.

Para que fosse possível realizar as simulações no FlexPAVE™ 1.1 para as misturas avaliadas, foi considerada uma estrutura padrão, composta por 12,5 cm de mistura asfáltica, 20 cm de base granular (MR = 350 MPa), 20 cm de sub-base granular (MR = 250 MPa) e subleito (MR = 200 MPa). O material da camada superficial foi variado e simulações foram realizadas levando-se em consideração os oito cenários. Outras informações como clima da cidade do Rio de Janeiro, velocidade de 80 km/h e tráfego inicial de 5×10^6 passagens equivalentes do eixo padrão de 8,2 tf, com uma taxa de crescimento anual de 1%, também foram adotadas. A estrutura foi projetada para uma vida útil de 15 anos.

Análise de Custos

Para identificar os impactos econômicos do projeto de pavimentos considerando as misturas avaliadas, foi utilizada a razão de custo por N_{total} (R\$/N). Essa razão representa o custo total de construção da estrutura e o valor das solicitações de tráfego (expressas pelo número N - até que a



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

www.rapvenacor.com.br



estrutura atinja o limite de sua vida útil de fadiga ou deformação permanente). Os custos unitários para os materiais foram baseados no Sistema de Custos Rodoviários do DNIT (SICRO) da cidade do Rio de Janeiro, com referência de janeiro de 2023. O valor total dos custos de cada estrutura foi dado em R\$/m, considerando uma faixa de 6,0 m de largura.

Levando-se em consideração o caso de produção de campo, os cenários utilizariam a mesma mão de obra e foram desconsideradas questões ligadas ao transporte de insumos. Sendo assim, observou-se que as variáveis que iriam compor os custos seriam: (i) aditivos; (ii) CAP puro; (iii) RAP; e (iv) combustível utilizado para a usinagem. Para as misturas mornas, foi considerada uma redução energética de 30%, com base no estudo de Prowel *et al.* (2012).

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV é uma metodologia que permite a quantificação de possíveis impactos ambientais oriundos de processos ou produtos, considerando variadas fases do seu ciclo de vida. Seu desenvolvimento seguiu as diretrizes estabelecidas nas normas internacionais ISO 14040 (ISO, 2006a), ISO 14044 (ISO, 2006b) e EN 15804 (EN, 2012), em combinação com o guia europeu ILCD - *International Reference Life Cycle Data System* (EC, 2010). Para o contexto de pavimentos asfálticos, o ciclo de vida completo compreende as etapas de extração das matérias-primas, transporte, processamento da mistura em usina, uso, manutenção e segue até o seu descarte, que corresponde à etapa de fim de vida.

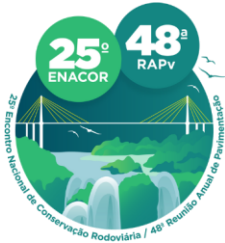
Neste estudo, o objetivo é quantificar os potenciais impactos de mudança climática, ecotoxicidade, uso de solo e de recursos fósseis, visando uma tomada de decisão multicritério quanto à utilização de misturas WMA e com incorporação de RAP.

O escopo da ACV foi “*cradle-to-gate*” (do berço ao portão da usina), com unidade funcional de 3,65 m de largura e 1 km de comprimento e espessura de 12,5 cm de revestimento. O fluxo de referência foi de 456,25 m³ do produto usinado, considerando apenas os materiais envolvidos na camada de revestimento asfáltico. Para a avaliação dos diferentes cenários (oito misturas), foi utilizada a ferramenta Simapro v9.5.0 e a base de dados do EcoInvent v.3.6 (2019), que adota o método de impacto do IPCC de 2021. Na modelagem, foi quantificado o impacto de mudança climática. O impacto foi quantificado em toneladas métricas equivalentes de dióxido de carbono por unidade funcional (tCO₂/UF). Esta análise é fundamental na tomada de decisão, auxiliando na escolha da melhor alternativa de pavimentação, levando em conta não somente custos de construção, mas também durabilidade, manutenção, consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa e reaproveitamento de resíduos.

RESULTADOS

Caracterização Viscoelástica Linear

A Figura 2 apresenta as curvas mestras do MD na temperatura de referência de 20°C para as oito misturas avaliadas. Nota-se que a mistura 3 apresentou maior rigidez em baixas frequências, enquanto que a mistura 1 apresentou maior |E*| para frequências mais altas, devido principalmente ao baixo volume de vazios. A mistura 4 apresentou os menores valores de rigidez, principalmente para menores frequências, por ser a que teve o maior volume de vazios e o menor teor de asfalto. As misturas mornas apresentaram menor rigidez quando comparadas com as misturas quentes. Isso se deve principalmente à redução das temperaturas de usinagem e compactação, o que faz com que o ligante esteja menos exposto ao processo de envelhecimento a curto prazo ocasionado pelas altas temperaturas. Entre as misturas mornas com RAP, M6 e M7, a M6, que não conteve o agente



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



rejuvenescedor, foi a mais rígida. Quanto ao efeito do RAP nas misturas M6, M7 e M8, apesar de conferir maior rigidez, a diferença com relação às misturas convencionais foi relativamente baixa.

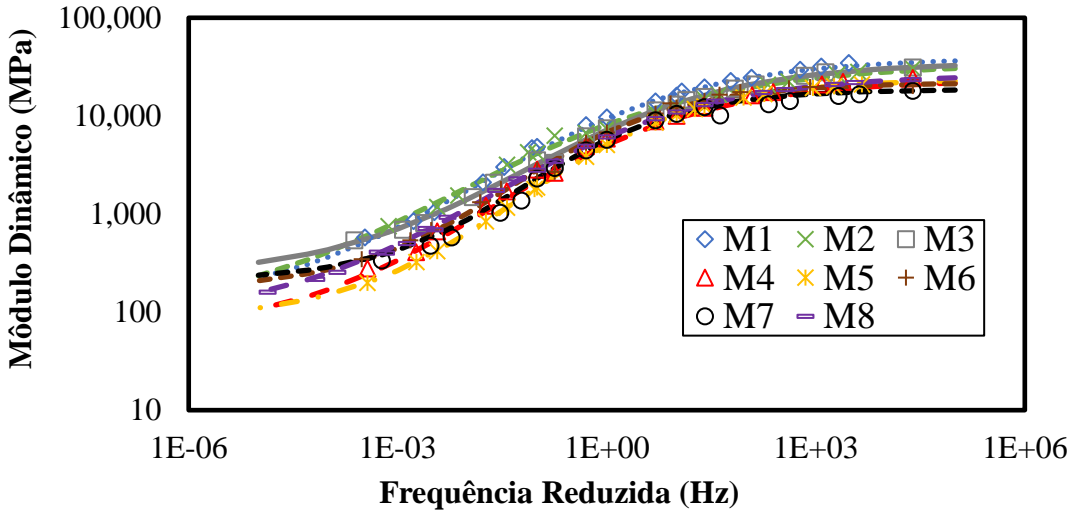


Figura 2. Curvas mestras de MD na temperatura de referência de 20°C

Dano por Fadiga

Para avaliar a resistência à fadiga, foi calculado o parâmetro Fator de Fadiga da Mistura (FFM). Quanto maior o valor do FFM, melhor a resistência à fadiga da mistura. A Figura 3 mostra os valores obtidos para as diferentes misturas. As misturas M1 e M2 apresentaram os menores valores do parâmetro, indicando maior suscetibilidade à fadiga. Tais misturas apresentaram também os menores VMA e VFA, respectivamente. A mistura M3 apresentou o maior valor de resistência à fadiga, assim como o maior valor de VFA. Quando comparadas as misturas M6 com M7 e M8, percebe-se que a adição do AR (M8) melhorou a resistência à fadiga do material, entretanto com valores muito similares.

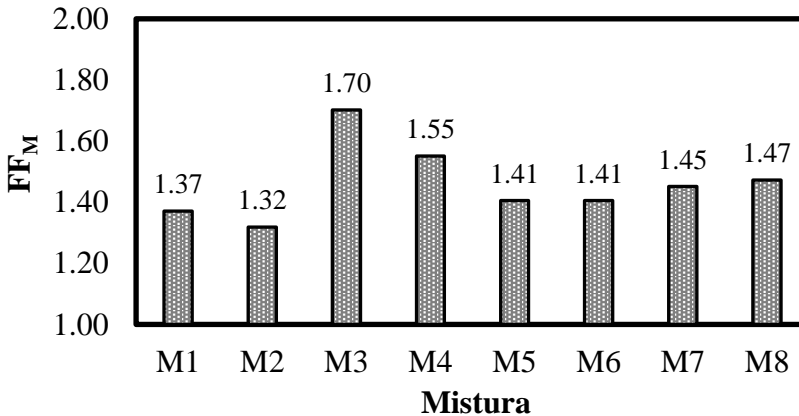
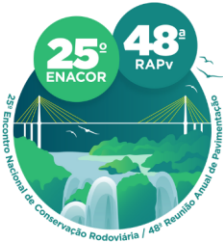


Figura 3. Fator de fadiga das misturas

Deformação Permanente

Para caracterizar a DP, foi realizado o ensaio SSR nas temperaturas de 20°C (temperatura baixa) e 54°C (temperatura alta). Para avaliar o efeito na deformação permanente, os dados do ensaio foram inseridos no programa FlexMAT™ e o parâmetro Rutting Strain Index (RSI) foi calculado. O RSI



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

www.rapvenacor.com.br



foi adotado neste estudo por ser um índice resultante da simulação de um pavimento padrão. Este parâmetro fornece uma indicação da susceptibilidade à DP e seu uso pode simplificar a análise e a avaliação de misturas asfálticas.

A Figura 4 ilustra os RSI calculados. Como pode ser observado, as misturas com menor volume de vazios (M1 e M3) apresentaram os menores valores de RSI, o que indica melhor desempenho à DP. Por sua vez, as misturas M6 (morna, com RAP e sem AR) e M9 (quente, com RAP e com AR) apresentaram valores semelhantes e menores do que as misturas M5 (quente e sem RAP) e M7 (morna, com RAP e com AR), respectivamente. Além disso, tais misturas apresentaram desempenho semelhante e pior do que as M3 e M5, respectivamente.

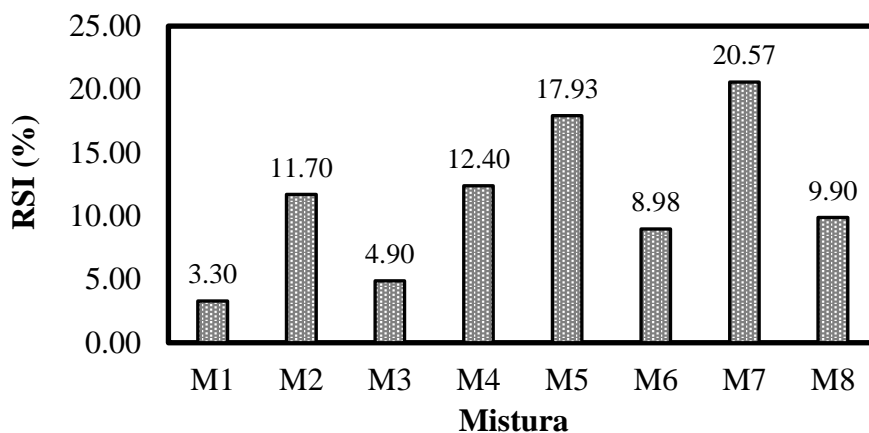


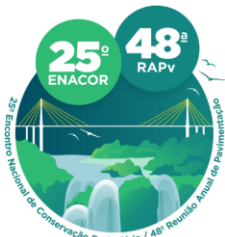
Figura 4. Parâmetro RSI das misturas

Simulações

Para analisar os efeitos de cada variável no desempenho do pavimento a longo prazo, levando-se em conta o tráfego e o clima, os dados foram inseridos no FlexPAVE™ 1.1 para simular a resposta do pavimento. Para fadiga, a análise permite a obtenção de gráficos com a evolução dos danos médios acumulados (N/Nf). Utilizando a função transferência de NASCIMENTO (2015), é possível calcular a previsão de área trincada (AT).

A Figura 5a mostra a AT prevista em um período de 180 meses para as oito misturas. Na análise, foi considerado um limite de 30%. Observa-se que as previsões seguiram a mesma tendência do FFM. As misturas M3 e M4 apresentaram o melhor comportamento à fadiga. As demais tiveram comportamento similar de AT, com exceção da mistura com RAP e sem AR (M6), que apresentou o pior desempenho.

Para a análise da deformação permanente, os resultados da Figura 5b confirmam o comportamento apresentado pelas misturas na análise do RSI. O limite de afundamento de trilha de roda estabelecido foi de 1,25 cm. De maneira geral, as misturas com maior volume de vazios e mornas apresentaram maior susceptibilidade ao dano causado pela deformação permanente. O uso do RAP minimizou os efeitos do ATR nas misturas, como é possível observar nas misturas M6 e M8, mas o uso do AR propiciou maior sensibilidade a este tipo de defeito, como observado para a mistura M7.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br

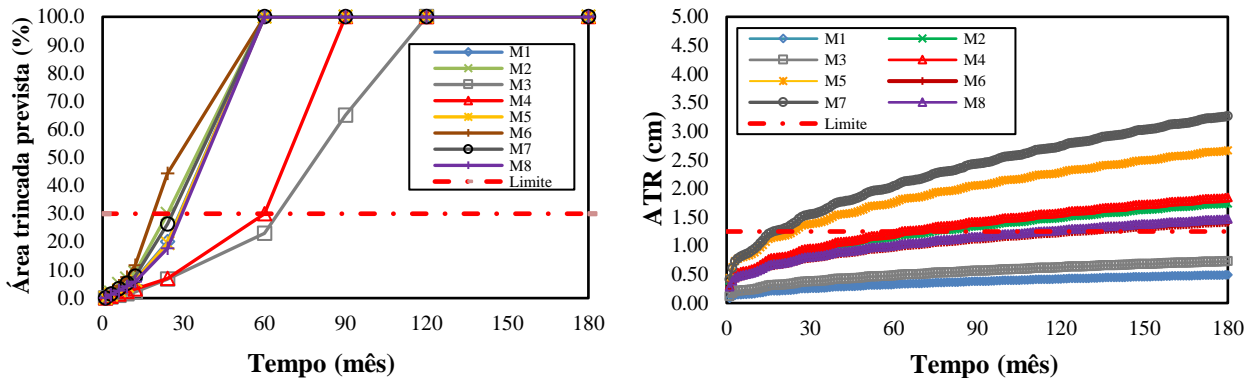


Figura 5. Área trincada prevista das misturas e afundamento de trilha de roda prevista das misturas

Comparação de Custos

Neste artigo, foi criada uma planilha em Excel para calcular os valores de cada componente, com base em dados do SICRO-DNIT e em informações sobre ligante asfáltico obtidas no *site* da Agência Nacional de Petróleo (ANP). A Figura 6 apresenta o custo total por metro para as oito misturas. Pode-se notar uma clara redução dos custos para as misturas com RAP (M6, M7 e M8), uma vez que possuem em sua composição um menor teor de ligante e um material consideravelmente mais barato (RAP). Em relação às misturas mornas e quente, a redução não foi expressiva, visto que o processo altera apenas o custo do combustível, mas, em contrapartida, deve ser considerado o preço do aditivo. Já para as misturas convencionais, os custos foram próximos, variando-se apenas o teor de ligante e agregados.

Para interpretar os resultados da análise econômica em relação à razão custo/benefício, as relações custo/m, que foram quantificadas para as estruturas, foram divididas pelo N_{total} , calculado até o pavimento atingir o limite de 30% de área trincada ou 1,25 cm de ATR. A Figura 8 também ilustra essa relação em uma comparação das estruturas de pavimento. Nota-se que mesmo com um custo menor de produção das misturas com RAP, o custo-benefício das misturas ainda foi menor do que o das misturas convencionais.

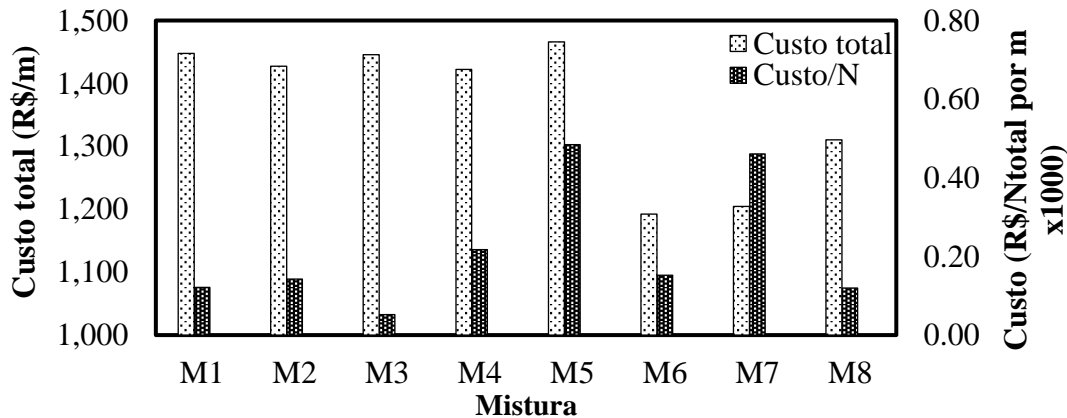
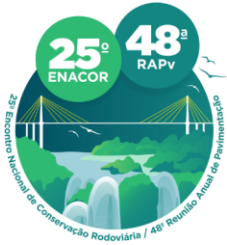


Figura 6. Custo calculado (R\$/m) e relação custo e vida útil para os pavimentos considerando diferentes misturas

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Na AICV, são analisados os resultados do inventário, que para este escopo foram os dados de tipo de material utilizado, dosagem das misturas e temperaturas de usinagem. Os parâmetros de entrada coletados anteriormente são convertidos em indicadores de impacto (EC, 2010). Seguindo a



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

www.rapvenacor.com.br



recomendação para processos de infraestrutura de Santos *et al.* (2022), a avaliação foi conduzida de acordo com o método EN 15804 (EN 15804 +A2 Method V1.00/EF 3.1 - *normalization and weighing set*) (BS, 2019).

A porcentagem dos materiais (ligante, aditivo, RAP, etc.) em relação à massa da mistura foi inserida juntamente com o tipo de asfalto (convencional ou WMA). Todos os fatores para os quais não havia dados disponíveis ou que não foram considerados (como distância de transporte, por exemplo) foram definidos como padrões e iguais entre as misturas para não afetar os resultados.

A Figura 7 mostra a contabilização de impactos, em sua unidade predeterminada, em relação aos oito cenários de misturas. O potencial de aquecimento global, que é um parâmetro útil para avaliar o impacto futuro das emissões na atmosfera, está representado pelo impacto de mudança climática. Observa-se um menor impacto ambiental das misturas mornas e com RAP para este parâmetro, em comparação com as convencionais. As misturas com maior teor de ligante (M1, M3 e M5) apresentaram destaque no impacto de “ecotoxicidade, água doce” e “uso de recursos, fósseis”, indicando que a produção e o uso do material asfáltico podem ocasionar o aumento potencial de contaminação de corpos hídricos (FRANZ *et al.*, 2014; OLIVEIRA & JUNGER, 2020). Além disso, o uso do ligante, mesmo que em baixa quantidade, representa uma contribuição substancial para o impacto de uso de recursos fósseis (HUANG *et al.* 2013). No impacto de “uso de solo”, observou-se uma redução naquelas misturas que utilizaram RAP (M6, M7, M8), devido à diminuição da exploração de jazidas.

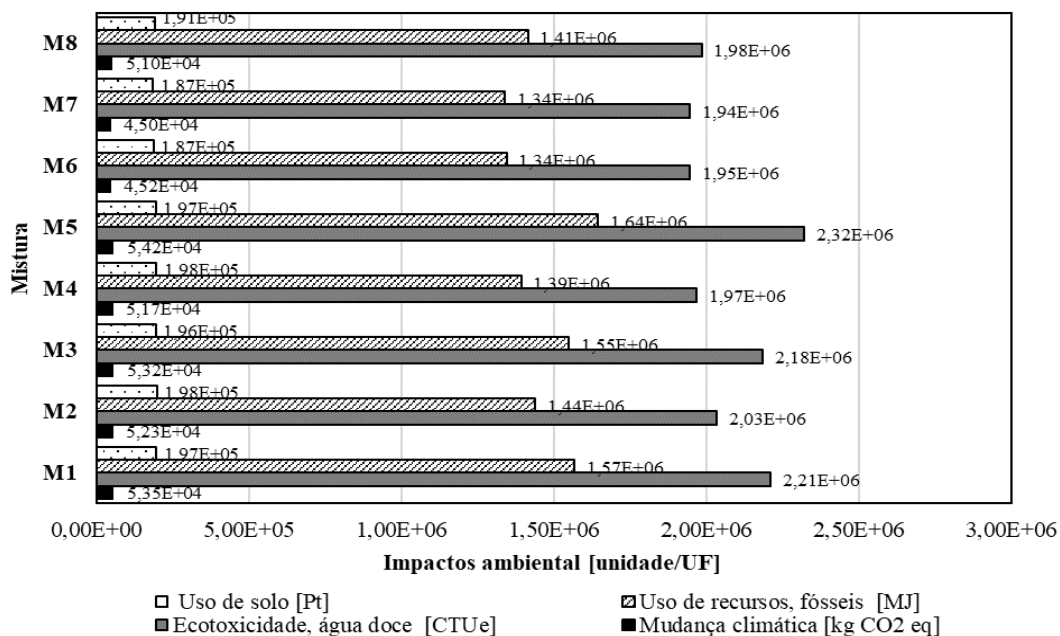
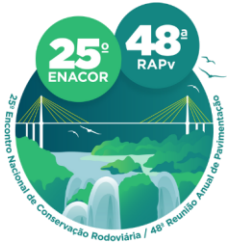


Figura 7. Impactos ambientais calculados na ferramenta SimaPro

Otimização

A otimização de misturas asfálticas que levam em conta simultaneamente o desempenho, os impactos ambientais e o custo pode ser bastante complexa, sendo em muitos casos impossível obter um resultado ótimo para todos os aspectos. No entanto, é possível quantificar o efeito de cada um desses fatores e, a partir disso, tomar uma decisão informada, que leve em consideração todos eles. Após a quantificação do efeito do desempenho, do impacto ambiental (considerando apenas a mudança climática) e do custo para cada opção de mistura asfáltica, foi produzido um *ranking* para as oito misturas levando em consideração esses três critérios, como mostra a Tabela 2. O ranqueamento priorizou a melhor mistura para o respectivo aspecto, ou seja, melhor desempenho, menor custo ou



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

www.rapvenacor.com.br



menor impacto ambiental. A melhor mistura para cada aspecto foi classificada como 1 e a pior, como 8. Esse tipo de análise facilita a identificação das misturas que apresentam o melhor equilíbrio entre esses três fatores e, por consequência, a seleção da opção mais adequada para o local de execução do projeto.

Tabela 2. Ranking das misturas em relação ao desempenho, custo e impacto ambiental

Aspecto	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Desempenho	2	4	1	6	7	5	8	3
Custo	7	5	6	4	8	1	2	3
Impacto ambiental	7	5	6	4	8	2	1	3
Soma	16	13	13	14	23	8	11	9

Com base nos dados da tabela, a mistura M3 apresentou o melhor desempenho e as misturas M6 e M7, os menores custo e impacto ambiental. No entanto, é importante ressaltar que a tomada de decisão para a escolha da melhor mistura não deve ser baseada apenas em fatores específicos, mas ser multicritério, considerando todos os aspectos envolvidos. Dessa forma, é necessário realizar uma avaliação ponderada de todos os critérios para cada opção de mistura, a fim de identificar a opção que apresenta o melhor equilíbrio entre desempenho, custo e impacto ambiental. Em uma análise básica e preliminar, realizada para ilustrar a consideração de múltiplos critérios, foi feita uma soma para os valores obtidos nos ranqueamentos da Tabela 2 para cada mistura. O mesmo peso foi adotado para cada aspecto. Na análise, a mistura M6 seria selecionada por ter apresentado a menor soma para os três aspectos avaliados.

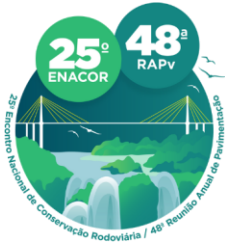
CONCLUSÕES

Este estudo analisou a dosagem balanceada de misturas asfálticas sustentáveis como uma abordagem promissora para a produção de pavimentos mais duráveis e com menor impacto ambiental. A combinação de novos materiais e tecnologias pode ajudar a prolongar a vida útil do pavimento e reduzir o desperdício de recursos naturais. Além disso, a consideração do ciclo de vida das misturas asfálticas é fundamental para avaliar seu impacto ambiental ao longo do tempo. A análise cuidadosa das emissões de gases de efeito estufa, consumo energético e outros fatores pode ajudar a identificar oportunidades para melhorar ainda mais a sustentabilidade das misturas asfálticas.

No trabalho, buscou-se comparar as propriedades das misturas quentes e mornas com adição de RAP (asfalto reciclado) e AR (agente rejuvenescedor) e avaliar o desempenho mecânico, o impacto ambiental e o custo de cada opção. Foi constatado que as misturas mornas apresentaram menor rigidez quando comparadas com as quentes, principalmente devido à diminuição das temperaturas de usinagem e compactação, o que faz com que o ligante esteja menos exposto ao processo de envelhecimento a curto prazo. A adição do RAP conferiu maior rigidez às misturas, mas a diferença foi relativamente baixa com o uso do AR. Para avaliar a fadiga, foi calculado o Fator de Fadiga da Mistura (FFM). As misturas com menores teores de ligante apresentaram menor resistência à fadiga. As misturas com menor volume de vazios apresentaram os menores valores de RSI, outro parâmetro adotado para avaliar a resistência à deformação permanente.

Os cenários com RAP apresentaram uma clara redução dos custos, uma vez que é um material consideravelmente mais barato e que é necessário um menor teor de ligante. No entanto, o custo-benefício destas ainda foi menor do que as misturas convencionais. Na análise do impacto ambiental, as misturas mornas e com RAP apresentaram um menor efeito do que das convencionais, reduzindo em 50% o impacto ambiental em comparação com as misturas quentes.

É importante ressaltar que a otimização de misturas asfálticas que levam em conta simultaneamente o desempenho, o impacto ambiental e o custo pode ser bastante complexa e, em



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

www.rapvenacor.com.br



muitos casos, isso pode dificultar a obtenção de um resultado ótimo para todos os aspectos. Por isso, foi produzido um *ranking* para os oito cenários, levando-se em consideração esses três critérios. Com base nessa análise, é possível tomar uma decisão informada para selecionar a mistura mais adequada para o local de execução do projeto, considerando o equilíbrio entre esses fatores.

Por fim, percebe-se que a dosagem balanceada não é apenas uma questão técnica, mas também envolve aspectos econômicos e sociais. A produção de misturas asfálticas sustentáveis pode gerar empregos e contribuir para o desenvolvimento econômico local. No entanto, ainda há muito a ser estudado sobre os materiais e tecnologias utilizados na produção de misturas asfálticas sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do CENPES/PETROBRAS e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, L. M., NASCIMENTO, L. A. H., ARAGÃO, F. T. S., UNDERWOOD, B. S. & DO CANTO PIVETTA, F. Characterization of the Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Based on Indexes and on Pavement Structural Performance. *Construction and Building Materials*, v. 326 p.126555, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126555

BELC, A.L.; COLERI, E.; BELC, F. & COSTESCU, C. Influence of Different Warm Mix Additives on Characteristics of Warm Mix Asphalt. *Materials*, v. 14, p. 3534, 2021. DOI: 10.3390/ma14133534

BENNERT, T., HAAS, E., WASS, E. & BERGER, B. Indirect Tensile Testing for Balanced Mixture Design and Quality Control Performance Testing. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, v. 89, p. 363-389, 2021.

BERNUCCI, L. L. B., MOTTA, L. M. G. D., CERATTI, J. A. P. & SOARES, J. B. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Oficina de Textos, São Paulo, 2015.

BRESSI, S., SANTOS, J., OREŠKOVIĆ, M. & LOSA, M. A Comparative Environmental Impact Analysis of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber and Reclaimed Asphalt Pavement Using Life Cycle Assessment. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22(4), p. 524-538, 2021. DOI: 10.1080/10298436.2019.1623404

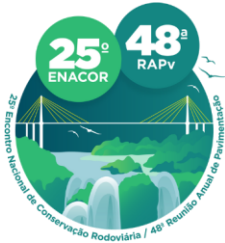
KRAU, M. M. T. *Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do Berço à Construção de pavimentos flexíveis com incorporação de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) e Resíduo de Polietileno Tereftalato (PET)*. Dissertação (Mestrado) — UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2023.

BS EN 15804/2012, Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products, European Committee for Standardization, v. 72, p. 2208-2220, 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.006

CHAVES, A. C. B. *Análise Da Interação Entre Ligantes De Mistura Asfáltica Com RAP, Com E Sem Uso De Agentes Rejuvenescedores*. Thesis. Universidade Federal do Ceará, 2023.

D'ANGELO, J., HARM, E., BARTOSZEK, J., BAUMGARDNER, G., CORRIGAN, M., COWSERT, J., HARMAN, T., JAMSHIDI, M., JONES, W. & NEWCOMB, D. *Warm-Mix Asphalt: European Practice; United States Report No. FHWA-PL-08-007*; Federal Highway Administration; Office of International Programs: Washington, DC, USA, 2008.

FRANZ, C.; MAKESCHIN, F.; WEIB, H. & LORZ, C. Sediments in Urban River Basins: Identification of Sediment Sources Within the Lago Paranoá Catchment, Brasília DF, Brazil: Using the Fingerprint Approach. *Science of the Total Environment*, v. 466- 467, p. 513-523, 2014. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.056



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

www.rapvenacor.com.br



FROTA, T. M., BASTOS, J. B. S. & SOARES, J. B. Potenciais Impactos Ambientais na Produção de Misturas Asfálticas Recicladas Aplicando a Abordagem de ACV Cradle-To-Gate: Estudo de Caso de Fortaleza. Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto, 2022.

GIANI, M. I., DOTELLI, G., BRANDINI, N. & ZAMPORI, L. Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements Using Reclaimed Asphalt, Warm Mix Technology and Cold In-Place Recycling. Resources, Conservation and Recycling, v. 104, p. 224-238, 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.08.006

HUANG, Y., SPRAY, A. & PARRY, T. Sensitivity Analysis of Methodological Choices in Road Pavement LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 18(1), p. 93-101, 2013. DOI: 10.1007/s11367-012-0450

KUMAR, V., COLERI, E., OBAID, I., BELC, A.L. & SUTHERLAND, A.J. Selection of Durable, Environmentally Friendly, and Cost-Effective Asphalt Mixtures. Materials, v.15(14), p.4873, 2022. DOI: 10.3390/ma15144873

NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Thesis. Graduate Faculty of North Carolina State University, 2015.

OLIVEIRA, R. C. & JUNGER, A. P. Utilização de Combustíveis Fósseis no Brasil e suas Consequências Ambientais. Research, Society and Development, v. 9(9), p. e466997538, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i9.7537

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. & FRANK, B. Warm-Mix Asphalt: best practices. 3rd ed. Lanham, Maryland: NAPA – National Asphalt Pavement Association, 2012.

ROCHA, M.L., ARAGÃO, F.T.S., NASCIMENTO, L.A.H.D. & UNDERWOOD, B.S. Balanced Mixture Design Framework for Asphalt Mixtures Based on Index-and Performance-Volumetrics Relationships. Transportation Research Record, 2023. DOI: 10.1177/03611981231161063

RODRÍGUEZ-ALLOZA, A. M., MALIK, A., LENZEN, M. & GALLEGO, J. Hybrid Input Output Life Cycle Assessment of Warm Mix Asphalt Mixtures. Journal of Cleaner Production, v. 90, p. 171-182, 2015. DOI:10.1016/j.jclepro.2014.11.035

SANTOS, G. Z. B., CALDAS, L. R., DE ALMEIDA M. F., J., MONTEIRO, N. B. R., RAFAEL, S. I. M. & DA SILVA, N. M. Circular Alternatives in the Construction Industry: An Environmental Performance Assessment of Sisal Fiber-Reinforced Composites. Journal of Building Engineering, v. 54, p. 104603, 2022. DOI: 10.1016/j.job.2022.104603

SHARKAWY, S. A., WAHDAN, A. H., & GALAL, S. A. Utilisation of warm-mix asphalt technology to improve bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement. Road Materials and Pavement Design, 2017. 18(2), 477-506.

TRAN, N. H., YIN, F., LEIVA, F., RODEZNO, C., HUBER, G. & PINE, W. Volumetric Mix Design Adjustments for Improving Asphalt Mixture Durability. Transportation Research Record, v. 2676(7) p. 445–455, 2022. DOI: 10.1177/03611981221078578

UNGER FILHO, W. Estudo De Mistura Asfáltica Reciclada A Frio Produzida Com 100% De Revestimento Asfáltico Fresado E Agente De Reciclagem Emulsionado. Dissertation, Universidade de São Paulo, 2019.

VALDES-VIDAL, G., CALABI-FLOODY, A. & SANCHEZ-ALONSO, E. Performance evaluation of warm mix asphalt involving natural zeolite and reclaimed asphalt pavement (RAP) for sustainable pavement construction. Construction and Building Materials, 2018. 174, pp.576-585.

WANG, Y. D, A. GHANBARI, B. S. UNDERWOOD. & Y. R. KIM. Development of a Performance-volumetric Relationship for Asphalt Mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2673 p.416–430, 2019. DOI: 10.1177/0361198119845364

WEST, R., C. RODEZNO, F. LEIVA. & F. YIN. Development of a Framework for Balanced Mix Design. Project NCHRP 20-07/Task 406, Auburn, AL 2018.