

## PAVIMENTAÇÃO SUSTENTÁVEL EM GOIÁS COM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO

JOÃO PAULO SOUZA SILVA<sup>1</sup>, JOÃO VICTOR SANTOS CAVALCANTE<sup>2</sup>, KLEYBSON SILVA BORGES<sup>3</sup> e LARA BATISTA FERREIRA DE LIMA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>DSc, Professor, UFG, Aparecida de Goiânia-GO, [jpss@ufg.br](mailto:jpss@ufg.br) ;

<sup>2</sup>Eng. Transportes, UFG, Aparecida de Goiânia-GO, [jvictorsc@discente.ufg.br](mailto:jvictorsc@discente.ufg.br);

<sup>3</sup>Eng. Transportes, UFG, Aparecida de Goiânia-GO, [kleybsonborges@discente.ufg.br](mailto:kleybsonborges@discente.ufg.br) ;

<sup>4</sup>MSc. Eng. Civil, UFG, Aparecida de Goiânia-GO, [lara.batista@ufg.br](mailto:lara.batista@ufg.br)

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
07 a 10 de outubro de 2024

**RESUMO:** Nesse estudo, foram produzidas e avaliadas misturas asfálticas recicladas a frio, comparando duas configurações. O primeiro grupo consiste em 100% de material asfáltico fresado (RAP) combinado com um agente rejuvenescedor emulsionado (ARE). Já o segundo grupo é composto por 50% de RAP e 50% de agregados virgens, também com ARE e emulsão asfáltica de ruptura lenta. O RAP utilizado foi proveniente da restauração e revitalização de vias urbanas em Goiânia-GO, enquanto o agente rejuvenescedor é o Cyclopav 200E. A configuração mais eficiente foi aquela com 50% de RAP e 50% de agregado virgem, incorporando 1,6% de ARE e 4% de emulsão asfáltica. Essa mistura apresentou um custo aproximado de R\$ 270,00/m<sup>3</sup>, em comparação com os R\$ 455,00/m<sup>3</sup> do PMF convencional que utiliza material virgem. Além disso, o PMF reciclado é mais econômico e ecológico, aproveitando o RAP e reduzindo o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos. O estudo confirma que o RAP pode ser usado com sucesso na produção de misturas asfálticas recicladas a frio, trazendo benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a economia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Material fresado, Redução de impacto Ambiental, Sustentabilidade.

### SUSTAINABLE PAVEMENT IN GOIÁS WITH COLD RECYCLED ASPHALT MIXTURES

**ABSTRACT:** In this study, cold recycled asphalt mixtures were produced and evaluated, comparing two configurations. The first group consists of 100% reclaimed asphalt pavement (RAP) combined with an emulsified rejuvenating agent (ARE). The second group is composed of 50% RAP and 50% virgin aggregates, also with ARE and slow-breaking asphalt emulsion. The RAP used was sourced from the restoration and revitalization of urban roads in Goiânia-GO, while the rejuvenating agent is Cyclopav 200E. The most efficient mixture configuration incorporated 50% RAP and 50% virgin aggregate, with 1.6% ARE and 4% asphalt emulsion. This mixture had an approximate cost of R\$ 270.00/m<sup>3</sup>, compared to R\$ 455.00/m<sup>3</sup> for conventional cold mix asphalt (PMF) using virgin material. Additionally, recycled PMF is more cost-effective and environmentally friendly, utilizing RAP and reducing natural resource consumption and waste generation. The study confirms that RAP can be successfully used in cold recycled asphalt mix production, benefiting both the environment and the economy.

**KEYWORDS:** Reclaimed Asphalt Pavement, Reduction of environmental impact, Sustainability.

### INTRODUÇÃO

O asfalto reciclado é uma técnica que reutiliza materiais asfálticos existentes para criar novas superfícies de estradas ou reparar as existentes. Essa abordagem visa reduzir a quantidade de resíduos, conservar recursos naturais e diminuir custos (Bernucci, *et al.* 2022). No Brasil, a falta de um banco de dados nacional para gerenciar o material fresado destaca a necessidade de pesquisas focadas na reciclagem e reutilização de materiais asfálticos envelhecidos. A reutilização do material fresado em novas camadas de revestimento é uma prática inovadora e ambientalmente responsável no setor de pavimentação, oferecendo vantagens econômicas e ambientais (Specht *et al.*, 2013). Apesar de

propriedades físicas e mecânicas inferiores, estudos indicam que misturas asfálticas recicladas podem alcançar ou superar o desempenho das tradicionais, especialmente com a técnica de reciclagem a frio.

A reciclagem de pavimentos, especialmente por meio da incorporação de emulsão asfáltica no processo de reciclagem a frio, estabiliza o material e melhora suas características, proporcionando maior coesão e durabilidade. Essa abordagem também permite a rápida liberação do tráfego após a execução, minimizando transtornos e tempo de interdição. No contexto do transporte rodoviário no Brasil, onde há investimentos contínuos em construção e restauração de estradas, a reciclagem de pavimentos é crucial para a sustentabilidade, economia e qualidade das pavimentações.

A análise do material fresado é essencial para garantir a eficiência e durabilidade das rodovias e estradas. Este estudo visa desenvolver misturas asfálticas recicladas a frio em laboratório, explorando diferentes proporções de material fresado e um agente de reciclagem emulsionado, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico e promover práticas sustentáveis na pavimentação.

## MATERIAL E MÉTODOS

Nessa pesquisa, foram analisadas misturas asfálticas recicladas a frio, produzidas exclusivamente com material fresado (RAP), com e sem adição de agregados virgens. O objetivo era avaliar o desempenho volumétrico e mecânico dessas misturas para aplicação em serviços de pavimentação de baixo custo, como tapa-buracos, remendos e pequenos recapeamentos, representando uma solução inovadora e econômica para Goiás. O RAP utilizado, fornecido pela Secretaria de Infraestrutura do município de Goiânia-GO, mostrou resultados comparáveis a agregados novos, indicando ser micaxisto.

Após a conclusão da caracterização do material fresado e a obtenção de sua granulometria, foi verificado que para enquadrar-se na norma técnica de um PMF, o mesmo deveria ter sua granulometria corrigida. A proporção necessária foi de 50% de material fresado e 50% de agregado virgem. Essa composição foi utilizada na produção da mistura asfáltica reciclada, atendendo às especificações para um Pavimento de Misto de Frio (PMF), conforme recomendado pela ES 153 do DNIT. Entretanto, no estudo foram produzidas seis misturas recicladas e rejuvenescidas:

- **Três misturas com 100% de RAP:** Embora o RAP não atendesse à granulometria esperada para um PMF, nesta pesquisa foram produzidas três misturas com 100% de RAP, seguindo as recomendações de Silva (2011) e Silva e Farias (2018). Adicionalmente, nessas misturas, foram incorporados Agente de Reciclagem Emulsionado (ARE) nas proporções de 0,9%, 1,5% e 2,1% em relação à massa do corpo de prova. Também foram criadas outras três misturas com correção granulométrica, aproximando-nos o máximo possível de um Pavimento de Misturado a Frio (PMF) virgem, conforme recomendado pela ES 153 do DNIT (2010).
- **Três misturas com 50% de RAP e 50% de Agregado virgem:** Nessas três misturas, foi adicionada emulsão asfáltica de ruptura lenta ao agregado virgem, com teores de 4%, 5% e 6%, seguindo a mesma recomendação do DNIT. Na fração de RAP presente nessas misturas, foi incorporado 1,6% de ARE. Esse procedimento resultou em uma abordagem consistente e uniforme. O quadro abaixo apresenta um resumo das composições das misturas testadas.

Tabela 1. Composição das misturas produzidas em laboratório

Misturas	% RAP	% Agregado virgem	% ARE	% Emulsão Asfáltica (RL-1C)
M1	100%	0%	0,9%	0%
M2	100%	0%	1,5%	0%
M3	100%	0%	2,1%	0%
M4	50%	50%	1,6%	4%
M5	50%	50%	1,6%	5%
M6	50%	50%	1,6%	6%

Para produção das misturas M1, M2 e M3, o RAP foi misturado ao agente de reciclagem emulsionado (ARE) nas proporções já mencionadas. Para as misturas M4, M5 e M6, foi feita a mistura de agregado virgem com emulsão asfáltica para formar uma base coesa, a adição do ARE ao RAP na

tentativa de restaurar o ligante envelhecido, e a combinação dessas fases seguida de uma hora de homogeneização. Este processo segue a Norma ES 153 (DNIT, 2010) e utiliza a metodologia Marshall para assegurar a qualidade e resistência da mistura final.

Foram confeccionados 06 (seis) corpos de prova para análise das propriedades físicas e mecânicas para cada tipo de mistura estudada, ou seja, no total, foram testados 36 corpos de prova seguindo a norma DNIT 153/2010-ES para misturas do tipo Pré-misturado à frio. Essa etapa foi importante para assegurar que a mistura atendesse às especificações de desempenho requeridas.

Para determinar o teor ótimo de projeto em misturas asfálticas a frio, a metodologia se baseou na adaptação dos métodos para misturas quentes, utilizando o Volume de Vazios (Vv) e a Relação de Betume/Vazio (RBV). Sem um critério estabelecido, a escolha será guiada pelos parâmetros mecânicos de Estabilidade e Fluência, conforme normas que exigem Estabilidade acima de 250 kgf e Fluência entre 2,0 e 4,5 mm, visando garantir a adequação da mistura para uso em pavimentos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização dos agregados virgens, agregados do RAP, teve a finalidade de verificar se esses materiais eram adequados para a produção de misturas asfálticas recicladas.

Os ensaios de Abrasão Los Angeles, índice de forma, densidade real e aparente, absorção e granulometria dos agregados, mostram que todos possuem propriedades favoráveis para aplicação em pavimentação.

O ligante residual, recuperado do material fresado por meio de técnicas de extração pelo rotarex e rotaevaporador em laboratório, exibiu sinais de deterioração, com viscosidade muito acima do permitido para um ligante geralmente usado em pavimentação, tornando essencial o uso de um aditivo químico capaz de reestruturar o ligante oxidado. Para recuperar as características do ligante envelhecido presente no RAP, foi usado o ARE (agente de reciclagem emulsionado), conhecido como Cyclopav, na composição das misturas recicladas e rejuvenescidas a frio, a fim de verificar se as mesmas se adequam ao esperado para uma mistura do tipo PMF.

A emulsão asfáltica de ruptura lenta, usada nas misturas contendo 50% de RAP e 50% de agregados virgens, também foi analisada e atendeu a todos os requisitos normatizados pelo DNIT.

### Análise dos parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas produzidas

As misturas asfálticas recicladas produzidas em laboratório foram submetidas a uma análise rigorosa para determinar seu desempenho físico e mecânico. Os resultados dessa caracterização são fundamentais para validar a aplicabilidade da pesquisa e seu potencial de contribuição para a engenharia sustentável em Goiás.

Os resultados obtidos a partir da caracterização física e volumétrica, podem ser observados na tabela a seguir e revelam dados importantes sobre as misturas. Essas informações são essenciais para compreender a qualidade e a durabilidade do material reciclado, bem como para garantir sua adequação às normas técnicas vigentes.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios volumétricos e mecânicos das misturas produzidas.

Misturas	% RAP	Agregado virgem	% ARE	% Emulsão Asfáltica	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	Estab. Marshall (Kgf)	Fluência Marhsall (mm)
M1	100	0%	0,9%	0%	1,99	16,2	381,87	4,5
M2	100	0%	1,5%	0%	2,01	15,2	291,79	4,5
M3	100	0%	2,1%	0%	1,87	21,1	231,67	4,4
M4	50	50%	1,6%	4%	2,10	19,3	324,40	2,24
M5	50	50%	1,6%	5%	2,10	18,7	434,11	5,13
M6	50	50%	1,6%	6%	2,15	16,1	287,53	2,42

Os resultados obtidos para o Volume de Vazios ( $V_v\%$ ) demonstram conformidade com os padrões estabelecidos pela norma DNIT 153/2010-ES, que preconiza valores entre 5% e 30%. Todas as composições estão dentro da faixa normativa, garantindo a qualidade e durabilidade do pavimento.

Além disso, as propriedades físicas e volumétricas das misturas asfálticas foram complementadas pela avaliação das características mecânicas. Conforme a norma, os valores de referência para a estabilidade e fluência Marshall do pré-misturado a frio são: estabilidade mínima de 250 kgf após 75 golpes e fluência entre 2,0 e 4,5 mm.

Na análise de estabilidade, a Mistura M3 não atingiu o mínimo requerido de 250 kgf, enquanto a Mistura M5 apresentou fluência acima do permitido para um PMF. As Misturas M1, M2, M4 e M6 seriam adequadas para reutilização como PMF, cumprindo todos os critérios estabelecidos pela norma. No entanto, a mistura M1, mais economicamente viável, usa 100% de RAP e apenas 0,9% de ARE, mas com granulometria fora dos padrões para um PMF. Apesar de fora da especificação granulométrica, essas misturas podem ser alternativas para obras de manutenção rotineira, como tapa-buracos e remendos, mas não são adequadas para novas construções em estacionamentos ou vias públicas.

Com base nos resultados obtidos, as misturas que atendem a todos os quesitos granulométricos, volumétricos e mecânicos são a M4 e M6. No entanto, a M4 se destaca por seu melhor desempenho, incluindo aspectos econômicos. Essa mistura utiliza 1,6% de Agente de Reciclagem Emulsionado (ARE) para recuperar as características de desempenho do ligante envelhecido presente no RAP e apenas 4% de emulsão asfáltica para recobrimento do agregado virgem. Essa abordagem resulta em uma economia substancial na produção da mistura, uma vez que o ligante é o componente de maior valor agregado. Portanto, a escolha estratégica da mistura M4 não apenas atende aos requisitos normativos, mas também otimiza considerações econômicas. Ela pode ser utilizada tanto em serviços rotineiros de manutenção, como tapa-buracos e remendos, quanto em serviços de construção, como pavimentação urbana e não urbana.

### **Inovação, viabilidade econômica, sustentabilidade e viabilidade ambiental do uso do RAP**

O Pré-Misturado a Frio (PMF) é uma mistura asfáltica executada à temperatura ambiente, que pode ser aplicada em diversas camadas de pavimentos rodoviários. A pesquisa revelou que o custo unitário do PMF convencional, segundo preços praticados por empresas na região metropolitana de Goiânia-GO, era de aproximadamente R\$ 455,00/m<sup>3</sup>.

Introduzindo o uso de revestimento asfáltico fresado (RAP) e ARE, esta técnica permite a produção de PMF reciclado. O ARE, contendo emulsão asfáltica modificada com polímeros e aditivos, restaura as propriedades do ligante envelhecido e melhora a adesividade entre os agregados.

A configuração com 100% de RAP + 0,9% de ARE, teria um custo aproximado de produção em torno de R\$ 95,00/m<sup>3</sup>, o que representa uma redução de 80% no custo quando comparado a um PMF novo. Entretanto, é importante ressaltar que essa opção só poderia ser aplicável para serviços rotineiros que necessitam de material com baixo custo e baixa capacidade estrutural, como remendos e tapa-buracos, principalmente em vias urbanas.

Por outro lado, o estudo apontou que o PMF reciclado com ARE, na melhor mistura (M4) pode ser produzido ao custo de R\$ 270,00/m<sup>3</sup>, representando apenas 60% do custo do PMF convencional, ou seja, uma redução de custo em torno de 40%. Esta abordagem não só oferece uma vantagem econômica significativa, mas também benefícios ambientais, como a redução na geração de resíduos, menor exploração de recursos naturais e diminuição na emissão de poluentes. Essa configuração é totalmente compatível com PMF novo, que por sua vez pode ser usado em pavimentação urbana ou não urbana, mostrando mais uma vez viabilidade técnica e econômica do serviço.

### **CONCLUSÃO**

No estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas a frio, os pesquisadores analisaram a composição e o comportamento mecânico dessas misturas. A caracterização dos componentes, incluindo o agregado virgem, atendeu aos parâmetros da norma para misturas pré-misturadas a frio

com emulsão catiônica convencional. No entanto, a presença do material fresado, sem diretrizes específicas, apresentou desafios na dosagem durante a produção da mistura.

Para melhorar os parâmetros mecânicos, em uma das configurações estudadas, os pesquisadores optaram por corrigir a granulometria do material fresado com a adição de um novo agregado. No entanto, a ausência de proporções normatizadas para a aplicação desse material destaca a necessidade de estudos detalhados e diretrizes técnicas específicas. A influência da granulometria do material reciclado no desempenho mecânico é um ponto crucial a ser considerado

Em síntese, apesar dos avanços demonstrados pela eficácia das misturas asfálticas recicladas, a falta de normatização ainda se destaca como um desafio significativo para sua implementação nas práticas executivas nacionais. Ao corroborar a viabilidade técnica desses materiais, esta pesquisa ressalta o potencial para oferecer soluções econômicas e sustentáveis na pavimentação de baixo custo.

Ao comparar o PMF convencional com o PMF reciclado com ARE, observou-se uma significativa vantagem econômica e ambiental para o último. O PMF reciclado com ARE, ao utilizar o RAP, reduz o consumo de novos recursos naturais e minimiza a geração de resíduos. Os benefícios ambientais do uso do RAP na pavimentação rodoviária são claros, incluindo a redução da poluição, do consumo de energia e dos custos de transporte.

Portanto, os resultados da pesquisa confirmam que o PMF reciclado com ARE é uma alternativa viável e sustentável para a pavimentação rodoviária, apresentando originalidade científica e grande potencial de difusão, além de fornecer dados confiáveis que apoiam a implementação dessa técnica inovadora no Estado de Goiás.

## AGRADECIMENTOS

Ao curso de Engenharia de Transportes, por disponibilizarem todo apoio para desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros 2ª Edição. Rio de Janeiro/RJ, 2022.
- DNIT: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 153: Pavimentação asfáltica – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2010, 11p.
- DNER \_\_\_\_\_. EM 369: Emulsões asfálticas catiônicas. Rio de Janeiro, 1997. 4p.
- SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M. Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas. Revista Matéria, v. 23, n. 3, 2018.
- Silva, J. P. S. Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. 134f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2011.
- Specht, L. P.; Pires, G. M.; Vitorello, T.; Hirsh, F.; Cronst, F.; Bergmann, E. C.; Tufensee, M. D. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. In: 42ª Reunião Anual de Pavimentação, 2013. Rio de Janeiro. Anais ABPv, 2013.