

Circularidade e pegada de carbono: desempenho ambiental de solução para recuperação de rodovias com materiais reciclados

Circularity and carbon footprint: environmental performance of road rehabilitation solution with recycled materials

Zila Maria Garcia Mascarenhas¹, Fernanda Belizario-Silva², Mariana Bosso³,
Celso Luiz dos Santos Romeiro Junior³, Liedi Légi Bariani Bernucci⁴, Kamilla Vasconcelos⁴

¹Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil

²ETH Zurich, Zurich, Suíça

³Grupo Arteris, São Paulo, São Paulo, Brasil

⁴Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil

Contato: zila.mascarenhas@ufma.br,  (ZMGM); silva@ibi.baug.ethz.ch,  (FBS); mariana.bosso@arteris.com.br,  (MB); celso.romeiro@arteris.com.br,  (CLSRJ); liedi@usp.br,  (LLBB); kamilla.vasconcelos@usp.br,  (KV)

Recebido:

12 de fevereiro de 2025

Revisado:

14 de julho de 2025

Aceito para publicação:

14 de agosto de 2025

Publicado:

11 de novembro de 2025

Editor de Área:

Francisco Thiago Sacramento Aragão,
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Brasil

Palavras-chave:

Avaliação do ciclo de vida.
Mistura asfáltica reciclada a frio.
Reabilitação de pavimentos.
Sustentabilidade.

Keywords:

Life cycle assessment.
Cold recycled asphalt mixture.
Pavement rehabilitation.
Sustainability.

DOI: 10.58922/transportes.v33.e3104

RESUMO

A aplicação de material asfáltico fresado (RAP) para obras rodoviárias e intervenções restaurativas tem sido crescente diante da necessidade de reduzir a geração de resíduos, por meio da reutilização, e aumentar a circularidade na construção civil. O objetivo deste estudo é avaliar o potencial benefício ambiental da restauração de pavimentos com camada de mistura asfáltica reciclada a frio (MARF) com emulsão asfáltica, em comparação à restauração apenas com materiais virgens. Foram analisados os indicadores de consumo de material e de água, geração de resíduos sólidos e pegada de carbono. Os resultados apontam que a estrutura com material reciclado a frio tem melhores indicadores de circularidade em relação ao consumo de material e geração de resíduo, porém ela pode ter maior pegada de carbono que a estrutura flexível convencional. No entanto, as respostas de pavimento se diferenciam significativamente com potencial diferença de durabilidade entre as estruturas, atribuindo benefício ambiental à estrutura de pavimento reciclado (RECRap).

ABSTRACT

The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) for highway pavements rehabilitation has been growing in view of the need to reduce waste, by reusing it, and enhance the circularity of civil construction. However, the use of RAP needs to be evaluated in terms of carbon footprint in pavements. The objective of this study is to evaluate the potential environmental benefit of restoration solution with RAP cold recycled with asphalt emulsion, compared to restoration with virgin materials only. The indicators of material and water consumption, solid waste generation and carbon footprint were analyzed. The results indicate that the structure with cold recycled material has better circularity indicators in terms of material consumption and waste generation, but it may have a higher carbon footprint than the conventional flexible structure. However, the pavement responses differ significantly, with a potential difference in durability between the structures. In this respect, the recycled pavement structure may have environmental benefits.



1. INTRODUÇÃO

As práticas mais comuns da indústria da pavimentação asfáltica em direção à economia circular são a reciclagem de material asfáltico fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement* ou RAP), a extensão da vida útil dos pavimentos por meio de manutenções preventivas e o uso de outros resíduos em pavimentos asfálticos (Mantalovas et al., 2020). O uso do RAP em um novo ciclo de mistura asfáltica (reciclagem a quente, morna ou a frio) é a prática internacional mais comum de reciclagem (EAPA, 2021). No Brasil, um levantamento publicado na Revista ENINFRA por Lopes et al. (2024) revelou que, entre 2019 e 2021, o Brasil gerou, em média, 2,1 milhões de toneladas de RAP por ano (valor obtido por meio da verificação dos contratos de todas as Superintendências estaduais do DNIT e dados de Concessionárias), sendo 91% doadas ou estocadas para uso futuro. Leite et al. (2021) afirmaram que o seu uso tem sido feito, principalmente, para pavimentar vias de acessos rurais; o RAP também é utilizado para compor camadas de base granular sem nenhum tratamento especial (Pasche et al., 2014), especialmente em regiões que não dispõe dos equipamentos necessários para a realização da reciclagem a quente, ou a frio. Além disso, o emprego do RAP estabilizado com emulsão asfáltica tem sido feito para a regularização de desnível entre a faixa do tráfego e o acostamento em concessões como no trecho da BR-101 entre Ubatuba-SP e Rio de Janeiro-RJ (Revista OE, 2025). Concessionárias brasileiras relatam aplicações do RAP em misturas asfálticas a quente, morna e a frio nos últimos anos ainda em porcentagens pequenas de destinação, aproximadamente 1,3% da massa de RAP gerada anualmente (Lopes et al., 2024). Experiências nacionais apontam um potencial uso do RAP para produção de misturas asfálticas recicladas a frio, que podem ser aplicadas em camadas de base de pavimentos rodoviários, contribuindo para estruturas de pavimento mais robustas (Tanski et al., 2017; Guatimosim et al., 2018; Unger-Filho et al., 2020). Além disso, a reciclagem a frio tem sido encorajada por pesquisadores que avaliam o seu desempenho mecânico em laboratório e os efeitos de diferentes fileres e métodos de estabilização com ligante asfáltico (Kuchiishi et al., 2021; Meneses et al., 2022; Brondani, 2023).

A recuperação de recursos e a reciclagem caracterizam a prática de fluxos circulares de materiais (Leendertse et al., 2018), promovendo um modelo de negócio regenerativo - um modelo que não apenas minimiza impactos ambientais, mas busca restaurar, renovar e valorizar os recursos naturais utilizados. Essa abordagem aproxima a infraestrutura rodoviária dos princípios da economia circular, ao transformar resíduos em insumos e prolongar a vida útil dos materiais. Embora a redução do consumo de materiais e da geração de resíduos sólidos seja importante, é necessário também almejar a redução das emissões de gases de efeito estufa associadas ao ciclo de vida dos pavimentos, visando mitigar as mudanças climáticas e seus efeitos adversos (IPCC, 2022). Em alguns casos, o uso de materiais reciclados pode levar ao aumento indesejado da pegada de carbono dos materiais, como no caso de concretos reciclados que, para compensar a perda de resistência mecânica, aumentam o consumo de cimento por m³ (Vieira, Figueiredo e John, 2020). Em outros casos, o aumento da pegada de carbono pode também estar relacionado às necessidades de beneficiamento dos resíduos e às escolhas de fornecedores ou localização dos resíduos a serem reciclados (Huang et al., 2007). Por isso, é importante usar ferramentas que ajudam a quantificar a pegada de carbono de atividades como a reciclagem.

Bowers et al. (2023) apontam os benefícios ambientais da reciclagem a frio, com redução da pegada de carbono, da demanda por agregado virgem e até do consumo de água. Zhou et al. (2020) mostraram resultados comparativos entre estruturas de restauração de pavimentos flexíveis que apontam benefícios na pegada de carbono (redução de até 50%) para a estrutura que usa a reciclagem a frio tanto em usina estacionária quanto *in loco*. A pegada de carbono para as estruturas de restauração recicladas foi de 190 a 219 t de CO_{2-eq}. A emissão de dióxido de carbono

equivalente ($\text{CO}_{2\text{-eq}}$) é uma unidade de medida que permite comparar o impacto ambiental potencial de vários gases de efeito estufa convertidos em uma quantidade equivalente de dióxido de carbono (CO_2). No estudo, a estrutura de pavimento reciclado era composta por camada de base de 15 a 20 cm de espessura, junto a uma sub-base de 30 cm feita por reciclagem profunda e um revestimento asfáltico de 15 a 20 cm.

Este trabalho tem por objetivo avaliar o potencial benefício ambiental da reciclagem a frio, por meio da comparação de indicadores de desempenho ambiental de uma estrutura de pavimento composta por mistura asfáltica reciclada a frio (MARF) com utilização de emulsão asfáltica como método de estabilização (denominada de RECRap), com a pegada de carbono de uma estrutura de pavimento que utiliza apenas materiais virgens (denominada de RECflex). Os indicadores de desempenho ambiental considerados foram: o consumo de material, o consumo de água, a geração de resíduos sólidos e a pegada de carbono. Para quantificar estes indicadores, foi feito o mapeamento do funcionamento de uma usina para fabricação de mistura asfáltica a frio, para avaliar o uso de RAP em uma solução de restauração de pavimentos asfálticos. Ambas as estruturas de pavimento foram apontadas pela concessionária de rodovia como alternativas de restauração para um mesmo volume de tráfego. Cabe salientar que até o momento de escrita desse artigo, que não há um consenso nacional sobre a estratégia de dimensionamento de estruturas de pavimento com camada asfáltica reciclada a frio, de forma que não foi parte do escopo desse artigo realizar esse dimensionamento, mas verificar estruturas de restauração adotadas no cenário brasileiro.

2. METODOLOGIA

Para facilitar a compreensão da metodologia aplicada, a Figura 1 apresenta um fluxograma com as fases adotadas no estudo.

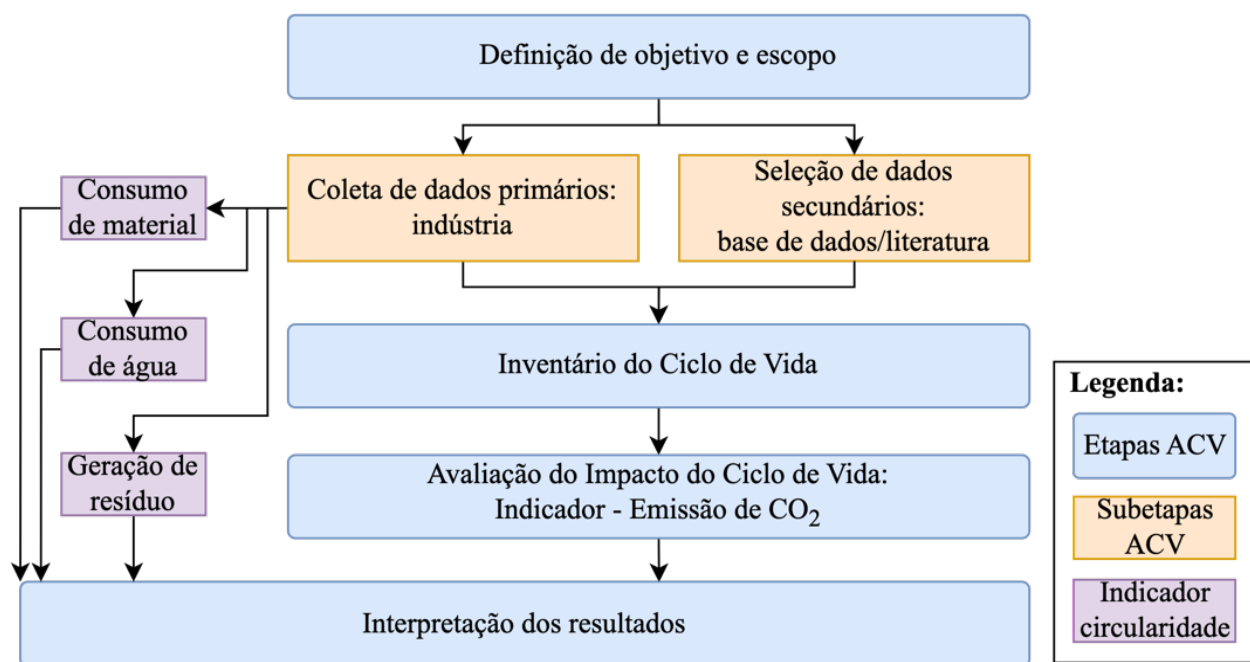
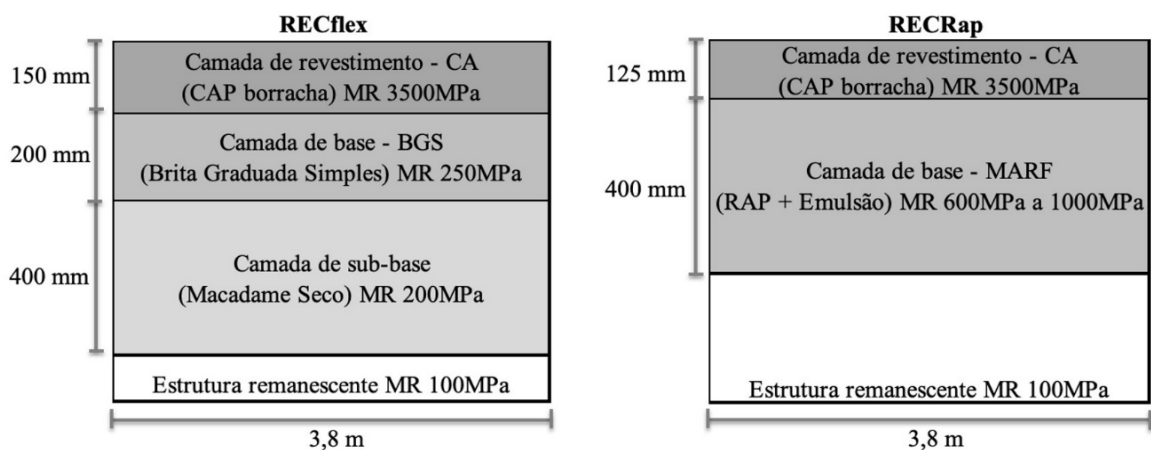


Figura 1. Metodologia adotada.

2.1. Objetivo e definição do escopo

O objetivo principal deste estudo é comparar o desempenho ambiental de duas soluções para a restauração de pavimentos projetadas para suportar um tráfego similar em rodovia de alto volume de tráfego (número N_{USACE} de $1,4 \times 10^8$). A solução de referência (RECflex) representa um pavimento flexível convencional, em que todas as camadas são compostas somente por materiais virgens. Na solução “circular” (RECRap), a camada de base do pavimento possui MARF com emulsão. A análise de impactos ambientais foi realizada por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV) com o uso de dados primários fornecidos pelas empresas detentoras das usinas de produção de misturas asfálticas a frio e a quente do estudo, combinados a dados secundários de base de dados e literatura. A MARF da estrutura RECRap contém material fresado (RAP) que corresponde a 70% da massa total de agregados, representando a realidade da usina em operação.

As estruturas de pavimento para as técnicas de restauração foram idealizadas pela Concessionária para um tráfego de $1,4 \times 10^8$ (N_{USACE}) para uma vida útil de 10 anos. Vale salientar que as estruturas foram analisadas como pavimentos flexíveis tradicionais, uma vez que não se dispõe de equações para avaliação do desempenho de camadas recicladas a frio no Brasil até o momento de preparação deste artigo. Para a caracterização das camadas dos pavimentos, foram utilizados dados de rigidez de projetos semelhantes, com base em dados reais obtidos anteriormente pela Concessionária responsável, sendo os valores representativos dos materiais utilizados nas estruturas. As características e dimensões das camadas de cada estrutura são apresentadas na Figura 2.



(2a) Estrutura de pavimento sem RAP (RECflex)

(2b) Estrutura de pavimento com RAP (RECRap)

* CA: concreto asfáltico, BGS: brita graduada simples, RAP: material asfáltico fresado no inglês *reclaimed asphalt pavement*, MARF: mistura asfáltica reciclada a frio, MR: módulo de resiliência.

Figura 2. Estruturas de pavimento analisadas.

Os agregados utilizados para a produção das misturas são estocados em área coberta, principalmente aqueles destinados à mistura usinada a quente (concreto asfáltico usinado a quente, CA) a ser aplicada na camada de revestimento em ambas as estruturas. O RAP foi produzido a partir da fresagem do pavimento ao longo da BR-101, nas proximidades da cidade de Curitiba/PR. Ambas as estruturas de pavimento possuem como camada de revestimento a mesma mistura asfáltica composta por ligante asfáltico modificado por borracha (penetração 50), cal hidratada e agregados virgens britados (Tabela 1). Na estrutura de pavimento RECflex, a camada de base e sub-base são compostas por brita graduada simples (BGS) e macadame seco (MS), respectivamente.

Já na estrutura RECRap, há apenas uma camada de base de mistura asfáltica reciclada a frio (MARF) com emulsão asfáltica catiônica de ruptura média 1C, executada em duas etapas, com 20 cm cada. A MARF é composta por emulsão asfáltica, cimento Portland, agregado virgem e RAP.

Tabela 1: Características do CA e MARF

Mistura asfáltica	RAP, M%*	Agregado virgem, M%	Cimento Portland, M%	Cal Hidratada, M%	Água, M%	Ligante Asfáltico, M%	Tipo de ligante	Massa específica aparente, g/cm ³
CA (revestimento)	0	93,2	0	1,4	0	5,4	Asfalto borraça	2,457
MARF (base)	66,5	26,3	0,9	0	4,2	3,3**	Emulsão asfáltica	2,187

* M%: porcentagem por massa de mistura. RAP: material fresado. **62,5% de ligante asfáltico residual.

A unidade funcional adotada foi 1 km de rodovia com faixa única de 3,8 metros de largura. As duas soluções de estruturas para restauração de pavimentos deteriorados foram consideradas como sendo capazes de resistir a um tráfego semelhante por 10 anos ($N_{USACE} 1,4 \times 10^8$). A fronteira do sistema abrange a extração e processamento das matérias primas, transporte destes materiais até a usina e produção das camadas em usina quando necessário, sendo uma análise com abordagem do berço ao portão. Apenas os impactos gerados até a produção das misturas na usina são considerados nesse estudo, de forma que as fases de construção, uso e fim da vida útil não entraram nessa análise. Estudos anteriores demonstram que as estruturas de pavimento com MARF podem apresentar desempenho similar quando comparadas às estruturas convencionais de pavimento flexível (Ghasemi et al., 2018; Diefenderfer et al., 2023). A Figura 3 mostra a fronteira do sistema para as estruturas de pavimento analisadas.

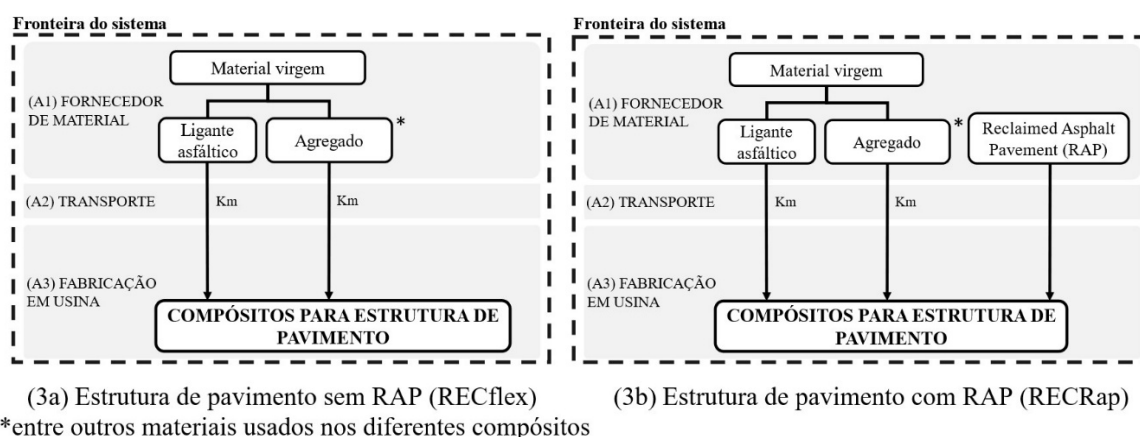


Figura 3. Fronteira do sistema.

2.2. Inventário do ciclo de vida

O inventário do ciclo de vida (ICV) traz o detalhamento dos dados de entrada e saída de cada processo para produção do produto (estruturas de restauração de pavimentos asfálticos).

Foi realizada uma combinação de dados primários, levantados por meio de visita em uma usina de solos para a produção de MARF e solicitados por meio de formulário enviado a uma usina de produção de mistura asfáltica volumétrica para produção de CA, com dados secundários da literatura e base de dados *ecoinvent* (versão 3.9.1), conforme apresentado na Tabela 2. A base de dados *ecoinvent* é uma das mais utilizadas em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), fornecendo inventários de processos ambientais com informações sobre consumo de recursos, emissões e geração de resíduos para diferentes setores produtivos. Adotou-se o sistema de alocação “*cut-off*”, no qual materiais reciclados, como o RAP, entram no sistema com carga ambiental zero (os impactos da sua produção são pertencentes ao ciclo de vida anterior), considerando apenas os impactos gerados a partir de seu novo uso. Os parágrafos a seguir descrevem os processos considerados em cada fase do ciclo de vida das misturas.

Tabela 2: Lista de dados considerados no inventário

Fase do ciclo de vida	Unidade do processo	Quantidades		Dado secundário (inventário representativo dos processos a montante).
		RECflex	RECRap	
Produção de agregados	Agregado	5646,4 (t)	1962,0 (t)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Gravel production, crushed gravel, crushed Cutoff, U - BR</i>
Produção de ligante asfáltico	Ligante virgem	64,3 (t)	122,0 (t)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Pitch production, petroleum refinery operation pitch Cutoff, U - BR</i>
	Água	66,9 (t)	141,0 (t)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Market for tap water tap water Cutoff, U - BR</i>
	Borracha moída de pneu	4608,5 (kWh)	3840,4 (kWh)	Tushar et al. (2022) e <i>ecoinvent 3.9.1: Electricity, medium voltage market for Cut-off, U - BR-South-eastern/Mid-western grid</i>
		801,9 (MJ)	668,2 (MJ)	<i>Diesel, burned in building machine market for Cut-off, U - GLO</i>
Produção de cimento	Cimento Portland CP-II-F	0	29,9 (t)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Market for cement, CP II-F cement, CP II-F Cut-off, U - BR</i>
Produção de cal	Cal hidratada	19,6 (t)	16,3 (t)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Lime, hydrated, packed market for Cut-off, U - RoW</i>
Transporte	Transporte de agregados por rodovia	9107,7 (tkm)	5432,3 (tkm)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR</i>
	Transporte de asfalto borracha por rodovia	3233,0 (tkm)	3474,7 (tkm)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR</i>
Produção da mistura asfáltica	Secagem e aquecimento dos agregados	319505,4 (MJ)	266254,5 (MJ)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Heat, central or small-scale, natural gas market for heat, central or small-scale, natural gas Cut-off, U - RoW</i>
	Armazenamento do ligante asfáltico			
	Produção do compósito (CA, MARF e BGS)	3388,1 (kWh)	5018,5 (kWh)	<i>Ecoinvent 3.9.1: Electricity, medium voltage market for Cut-off, U - BR-South-eastern/Mid-western grid</i>

Os insumos para produção de CA para a camada de revestimento de ambas as estruturas são o asfalto borracha, a cal hidratada e os agregados virgens. O asfalto borracha foi representado pela combinação entre o inventário da borracha moída de pneus com o ligante asfáltico virgem do *ecoinvent*. A quantidade de energia elétrica e combustíveis fósseis consumidos no processamento da borracha foi adotada com base em dados da literatura. Segundo Tushar et al. (2022), o consumo de energia elétrica e diesel para produzir 1 tonelada de borracha moída de pneus é de 406,25 kWh e 10,26 litros, respectivamente. O processo de incorporação da borracha ao ligante asfáltico foi desconsiderado por indisponibilidade de dados primários e da literatura. De acordo com o fornecedor do asfalto borracha, a borracha corresponde a 15% da massa total do ligante atendendo às propriedades estabelecidas pela Resolução No 39 da ANP (Brasil, 2008). A emulsão asfáltica do tipo RM-1C presente na MARF foi modelada considerando a especificação do produto do fornecedor, em que a porcentagem residual de ligante asfáltico é de 62,4%. O processo de mistura dos materiais para produção da emulsão asfáltica também foi desconsiderado por indisponibilidade de dados primários e da literatura. Tal informação foi combinada a dados secundários da base de dados *ecoinvent*, considerando o consumo de ligante virgem. Apesar da camada de MARF usar cimento Portland CP-II em baixa porcentagem (0,9%), considerou-se importante a inclusão desse insumo no inventário do ciclo de vida da estrutura já que este pode ter uma contribuição significativa nas emissões de dióxido de carbono - CO₂ (Watson et al., 2020). Os agregados virgens das diferentes camadas das estruturas de pavimento foram representados por dados do *ecoinvent* que é composto por dados de pedreiras brasileiras (Tabela 2). As massas de cada insumo foram estimadas a partir dos projetos de dosagem das misturas. No caso da estrutura com material reciclado (RECRap), o RAP foi incorporado à MARF sem necessidade de beneficiamento para este estudo de caso. Porém, vale salientar que essa necessidade de beneficiamento está diretamente associada à granulometria do RAP, do seu percentual na mistura e do tipo de mistura.

O tipo de transporte e as distâncias entre o local de produção dos insumos (materiais virgens) e as usinas foram determinadas a partir do cenário real do estudo de caso em questão, onde o transporte rodoviário dos agregados e dos ligantes asfálticos são realizados por meio de caminhões. As capacidades de carga dos caminhões foram assumidas como 23 t e 40 t (peso total) para agregados e ligante asfáltico, respectivamente, baseado nas observações de veículos utilizados para o transporte desses materiais entre os fornecedores e as usinas de produção de mistura. A distância de transporte dos agregados partindo do fornecedor para a usina é de 1 km, pois a pedreira e a usina pertencem ao mesmo grupo industrial. Não foi considerada distância de transporte para o RAP, partindo do pressuposto de que o ciclo de vida do pavimento que gerou o RAP ao fim de sua vida útil inclui o transporte dos resíduos até sua destinação final e, portanto, o transporte do RAP pertence ao ciclo de vida anterior, sendo contabilizados os impactos apenas a partir do momento em que o RAP se encontra na usina (Moins, 2024). No caso do ligante asfáltico, consideraram-se as seguintes distâncias de transporte: 15 km entre a refinaria e o distribuidor de asfalto (indústria modificadora), 45 km entre o fornecedor de pneu e o distribuidor de asfalto e 30 km entre o distribuidor de asfalto e a usina. É importante ressaltar que o transporte do cimento Portland e da cal hidratada é considerado diretamente pelos itens “*market*” selecionados da base de dados *ecoinvent*.

A fase de produção de compósitos (mistura de materiais a serem aplicados em cada camada) corresponde aos processos que ocorrem nas diferentes usinas consideradas para a produção de CA (usina de asfalto volumétrica), BGS e MARF (usina de solos). A informação do consumo de energia elétrica e combustíveis foi obtida por meio de formulários e visita técnica às usinas em estudo, com dados de energia elétrica coletados diretamente do medidor padrão da instalação

(apenas para a produção na usina de solos). Foi reportado pela usina um consumo de 6,6 m³ de gás natural para a produção de 1 t de CA que compõe a camada de revestimento das estruturas analisadas. Esses dados primários foram associados aos inventários da base de dados *ecoinvent* que melhor representam a realidade brasileira. As usinas em análise consomem energia elétrica para o funcionamento geral dos equipamentos e gás para o aquecimento do ligante asfáltico, secagem e aquecimento dos agregados no caso de usinagens a quente (1,06 kWh e 228 MJ, respectivamente para produzir 1 t de CA na usina volumétrica e 1,14 kWh para produzir 1 t de BGS ou MARF na usina de solos). A emulsão asfáltica usada na MARF é armazenada em tanques horizontais e não passa por aquecimento. As eventuais perdas de materiais não foram consideradas nesta fase.

2.3. Avaliação do impacto do ciclo de vida

A avaliação da pegada de carbono (ABNT, 2023) foi realizada por meio do método do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) para calcular o potencial de aquecimento global das emissões de gases de efeito estufa, para o horizonte de 100 anos, expresso em t de CO₂ equivalente (CO_{2-eq}) por km de pavimento rodoviário restaurado, correspondendo a unidade funcional (IPCC, 2021). A ACV foi feita com o uso do *software openLCA* (v1.11.0), considerando a infraestrutura dos processos já incluída nos dados do *ecoinvent*.

Além da pegada de carbono, foram calculados os indicadores de consumo de material (t), desagregada entre o consumo de materiais virgens e reciclados; o consumo de água (m³); e a geração de resíduos sólidos (t). Embora estes não sejam indicadores de potencial de impacto ambiental, e sim de inventário, eles também são importantes para avaliar o desempenho ambiental das soluções virgens e recicladas do setor construtivo (Belizario-Silva, 2022).

2.4. Equivalência de deflexões do pavimento

Devido à incerteza quanto à equivalência da vida útil das duas estruturas de pavimento comparadas, realizou-se uma análise das respostas estruturais com o objetivo de equalizar as deflexões na superfície do pavimento, ajustando-se a espessura da camada de rolamento. Para isso, utilizou-se um *software* de análise elástica linear, baseado em abordagem mecanicista, capaz de simular sistemas multicamadas submetidos a cargas de tráfego. A escolha dessa ferramenta permitiu uma avaliação mais detalhada do comportamento estrutural, considerando as tensões e deformações induzidas pelas cargas aplicadas. Foram analisadas as deflexões na superfície do pavimento e as deformações horizontais na base da camada de revestimento asfáltico. Os pontos de avaliação foram distribuídos entre as rodas duplas de um eixo padrão e também sob uma das rodas para análise do ponto mais crítico.

A deflexão máxima no topo da camada de revestimento e deformações na fibra inferior do revestimento foram calculadas em pontos localizados abaixo e entre os pneus da roda dupla. Os módulos das camadas são apresentados na Figura 1, considerando uma variação de MR para a camada de MARF que possui processo de cura ao longo do tempo, podendo levar de 6 a 18 meses para atingir a cura total em campo (Ebels, 2008). Foi assumido, a partir da literatura (PMSP, 2004; Lynch, 2013), um MR de 800 MPa e 1.000 MPa para representar a cura inicial e total do material, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura RECRap apresentou consumo total de material 24% menor do que a estrutura RECflex, pelo fato de ter menor espessura. Isso corresponde a uma economia de 1.341 t de material por km de faixa da rodovia. Além disso, como 51% da massa de material da solução RECRap corresponde ao RAP, ela apresenta um consumo de material virgem 63% inferior à estrutura RECflex, o que equivale a evitar a extração de 3.550 t de materiais da natureza, para cada km de pavimento recuperado. Além disso, evita-se a disposição de 2.220 t/km de resíduos sólidos, equivalente à massa de RAP reaproveitada. Para a estrutura RECflex, uma massa baixa de geração de resíduo é evitada, 11 t/km, correspondendo a borracha de pneu moído usada para modificação do ligante asfáltico (Figura 4).

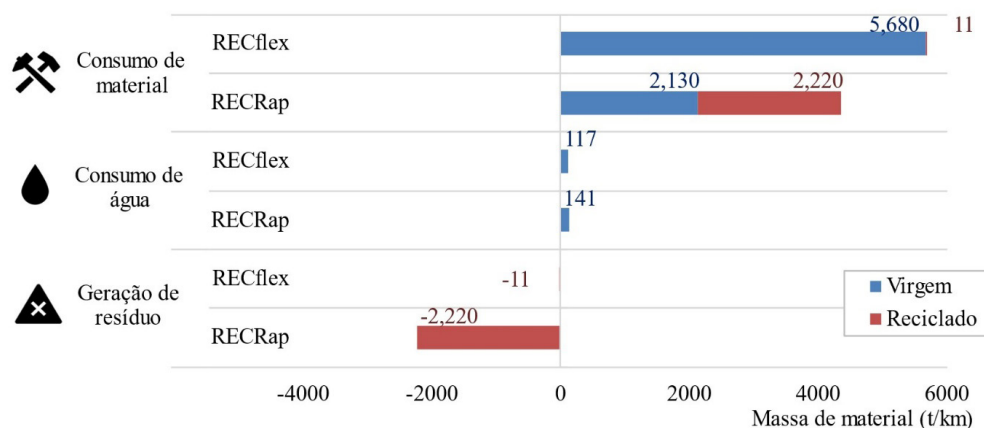


Figura 4. Indicadores de circularidade: consumo de material; consumo de água; e geração de resíduos em t por km de rodovia restaurada.

Por outro lado, a estrutura RECRap apresenta um consumo de água 20% maior do que o da estrutura RECflex, o que equivale a 24 m³ de água a mais por km. Apesar da MARF possuir menor pegada de carbono do que o CA convencional (Gu et al., 2019), a estrutura RECRap apresentou pegada de carbono 26% superior ao da estrutura RECflex, o que corresponde a 29 t CO_{2-eq}/km adicionais. Os resultados de pegada de carbono são apresentados na Figura 5. Para um maior detalhamento e compreensão da pegada de carbono, a Figura 6 mostra os resultados por fase do ciclo de vida e, especialmente, a segmentação da fase de produção de materiais em: i) produção de agregados; ii) produção de ligante asfáltico; e iii) produção de cal hidratada ou cimento Portland.

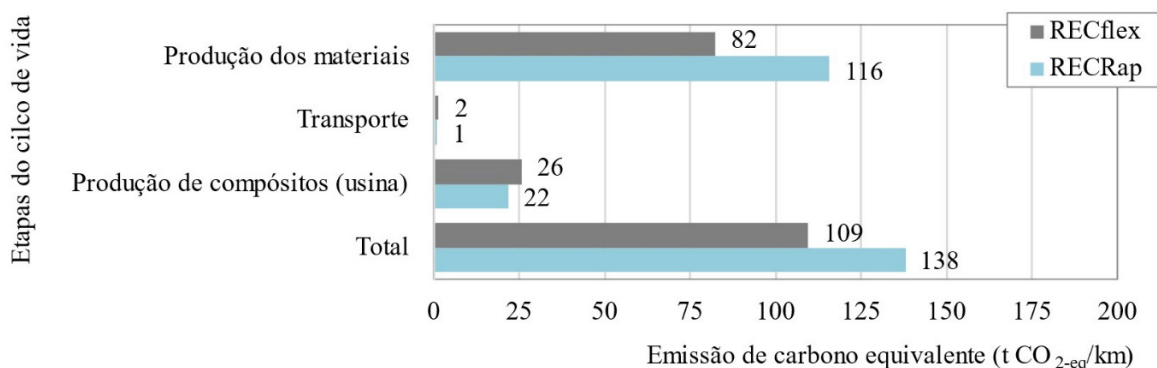


Figura 5. Pegada de carbono para as duas estruturas de pavimento, por etapa do ciclo de vida.

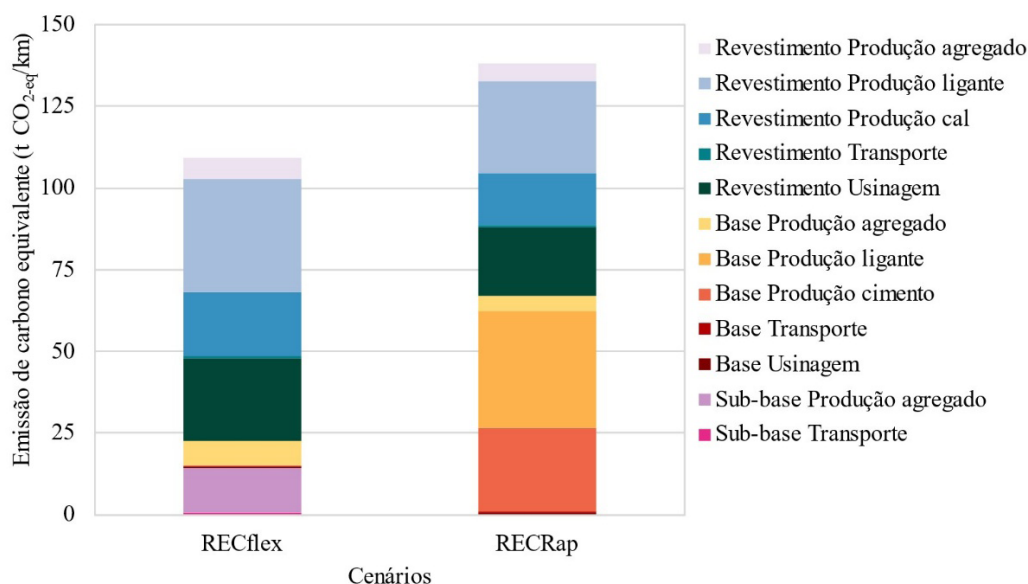


Figura 6. Emissões por fase do ciclo de vida para cada camada da estrutura de pavimento.

A fase de produção dos materiais é o maior contribuinte para a pegada de carbono total das duas estruturas RECflex e RECRap (75% e 84%, respectivamente), sendo também o fator que explica o aumento da pegada de carbono da estrutura reciclada em relação à estrutura com material virgem. Mesmo que a estrutura de pavimento RECflex tenha uma maior espessura de camada de revestimento de CA, a estrutura RECRap usa mais ligante asfáltico, devido ao consumo de ligante também na camada de base de MARF (emulsão asfáltica com 62,5% de ligante residual). Além disso, a presença de cimento Portland na camada de MARF eleva a pegada de carbono da fase de produção dos materiais para a estrutura RECRap.

Na fase de produção de compósitos, a quantidade de emissões é fortemente relacionada à operação da usina. A produção de MARF não traz grandes impactos, por ser um processo que consome apenas energia elétrica e que, portanto, corresponde a uma baixa contribuição na pegada de carbono quando comparada a fontes de energia fósseis. Sendo assim, a redução de 15% de emissões nessa fase, quando comparado o cenário RECRap com o RECflex, está predominantemente relacionada a diminuição de espessura de camada de revestimento de CA (único compósito a consumir combustível fóssil diretamente - gás). Uma espessura menor corresponde a uma menor massa de mistura asfáltica e, conseqüentemente, a um menor consumo de gás. Os impactos causados pela fase de transporte são baixos comparados às demais fases, devido à pequena distância de transporte dos agregados virgens, que é um componente em quantidade significativa na estrutura de pavimento RECflex. Para a estrutura RECRap, a fase de transporte também tem influência baixa nas emissões, devido às pequenas distâncias de transporte e ao fato de não ter sido considerado o impacto do transporte do RAP, uma vez que estes são atribuídos ao ciclo de vida anterior, como justificado no item 2.2.

Portanto, existe um *trade-off* entre o aumento da circularidade, representado pela redução do consumo de materiais virgens e da geração de resíduos sólidos, e a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que a solução com material reciclado apresenta pegada de carbono maior do que a solução apenas com materiais virgens. Além disso, há um aumento do consumo de água. Ou seja, dependendo do indicador analisado, o desempenho da solução RECRap pode ser inferior ao da solução de referência RECflex de acordo com a análise realizada nas duas estruturas.

4. DESEMPENHO AMBIENTAL E RESPOSTA ESTRUTURAL

A Tabela 3 apresenta as respostas estruturais dos cenários de restauração analisados, juntamente com a pegada de carbono de cada um deles. Diante da análise das respostas estruturais dos pavimentos, a deflexão da estrutura RECRap ($23,0$ a $26,7 \times 10^{-2}$ mm) mostrou-se até 28% menor que da RECflex ($32,2 \times 10^{-2}$ mm), sem considerar a menor deformação de tração no fundo da camada de revestimento. A maior deflexão da estrutura RECflex está relacionada a base e sub-base granulares, que possuem menor módulo de resiliência (MR), o que pode tornar essa estrutura mais suscetível ao aumento das deflexões ao longo do tempo quando comparada à estrutura RECRap, que possui camada de base MARF de maior coesão e maior rigidez.

Uma vez que a estrutura RECflex possui maior deflexão e, portanto, diferente comportamento estrutural comparado a estrutura RECRap, foi realizada uma análise das deflexões considerando a variação da espessura de camada de revestimento da estrutura RECflex até que essa solução RECflex apresentasse deflexão semelhante a estrutura RECRap. A opção por aumentar a espessura da camada de rolamento resultou em uma espessura de 25 cm de CA que, dentro da realidade de rodovias brasileiras de elevado volume de tráfego, são dificilmente construídas devido ao custo de implantação.

Tabela 3: Deflexões e deformações obtidas por meio de análise mecanicista e pegada de carbono de cada estrutura simulada

	Estrutura de pavimento			
	RECflex (original)	RECflex2 (CA 25 cm)	RECRap (MARF com MR de cura inicial)	RECRap (MARF com MR da cura total)
Deflexão no topo do pavimento (10^{-2} mm)	32,2	24,1	26,7	23,0
Profundidade de análise (mm) - topo	0,1	0,1	0,1	0,1
Deformação de tração na fibra inferior do revestimento (m/m)	$168,5 \times 10^{-6}$	$93,3 \times 10^{-6}$	$108,7 \times 10^{-6}$	$70,0 \times 10^{-6}$
Profundidade de análise (mm) - fibra inferior	149,9	249,9	124,9	124,9
Pegada de carbono ($\text{t CO}_{2\text{-eq}}$ /km)	109	167	138	138

Comparando o desempenho ambiental da estrutura RECflex2 com o da RECRap considerando a deflexão máxima similar, a pegada de carbono da estrutura de restauração RECRap passa a apresentar pegada de carbono 17% menor do que a RECflex2, correspondente à redução de $29 \text{ t CO}_{2\text{-eq}}$ /km. Os resultados se encontram coerentes com o encontrado por Amarh et al. (2022) e Zhou et al. (2020) que apontam redução de até 50% da pegada de carbono para a estrutura com reciclagem a frio. A Figura 7 apresenta os resultados de pegada de carbono por fase do ciclo de vida. Considerando a estrutura RECflex2, o benefício ambiental associado à redução do consumo de materiais virgens pela RECRap aumenta, com a economia alcançando 56%. O comparativo do consumo de água permanece inalterado.

A estrutura RECRap mostrou-se benéfica em termos de pegada de carbono quando as deflexões do pavimento flexível convencional RECflex foram mantidas próximas na tentativa de manter durabilidade equivalente, já que as estruturas de pavimento com MARFs podem apresentar desempenho estrutural similar ou superior às convencionais (Diefenderfer et al., 2023). Esse benefício está fortemente relacionado à fase de produção dos compósitos, que pode emitir $21 \text{ t CO}_{2\text{-eq}}$ a menos por km. Esse valor é devido ao uso da reciclagem à frio na camada de base

da estrutura RECRap. A produção de MARF não trouxe grandes impactos por ser um processo que consome apenas energia elétrica, correspondendo a uma baixa contribuição nas emissões de CO₂ quando comparada a fontes de energia de combustíveis fósseis na fase de produção das misturas. Nesse caso, não há a necessidade de aquecimento prévio dos materiais para a usinagem, causando uma redução significativa no consumo de combustíveis fósseis. A massa de mistura à quente, que consome gás na produção, necessária na estrutura RECflex2 é de 2.334,1 comparada a 1.167,1 t na RECRap, trazendo redução de até 51% da pegada de carbono nessa fase, que está predominantemente relacionada à menor massa de CA destinada a camada de revestimento.

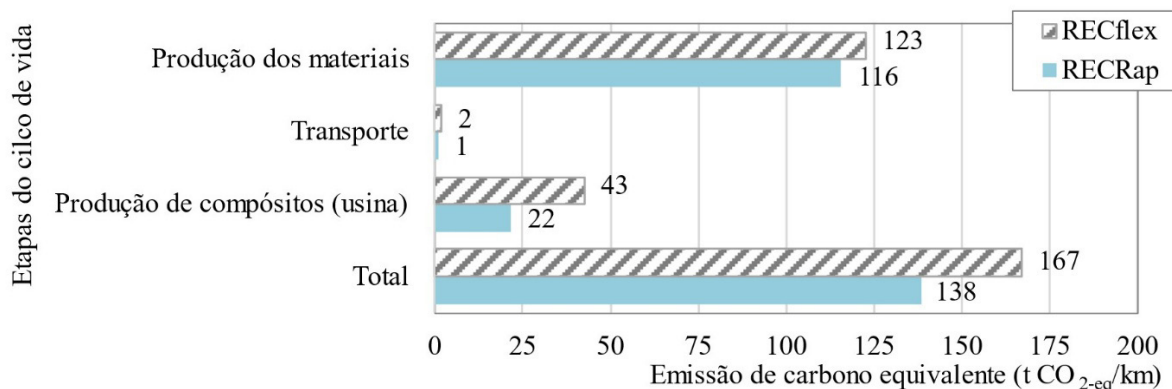


Figura 7. Emissões por fase do ciclo de vida.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo traz uma análise comparativa do desempenho ambiental de duas estruturas de pavimentos que podem ser adotadas como soluções de restauração de pavimentos asfálticos em rodovias de tráfego pesado, sendo uma com o uso de material asfáltico fresado (RAP) e a outra apenas com materiais virgens. Os resultados apontam para um *trade-off* entre a redução do consumo de materiais e geração de resíduos e o aumento do consumo de água e da pegada de carbono da estrutura de pavimento com RAP. Uma vez que as soluções comparadas apresentaram comportamento estrutural diferentes (avaliado pela deflexão no topo das estruturas), realizou-se uma análise de sensibilidade com variação na espessura do revestimento asfáltico, de forma a equiparar as deflexões no topo das duas estruturas (RECflex e RECRap), adotando-se uma estrutura RECflex hipotética de similar deflexão, como forma de considerar vida útil semelhante. Concluiu-se que a estrutura RECRap apresentou pegada de carbono inferior, sob condições de deflexões na superfície semelhantes. Nesse caso, o benefício está associado à técnica de reciclagem a frio, que contribui para um menor consumo de combustíveis fósseis na fase de produção dos compósitos comparada a estrutura RECflex que possui uma considerável massa de mistura usinada a quente (CA).

Entretanto, é importante ressaltar que as camadas que possuem ligantes em sua composição e são usinadas a quente podem apresentar maior robustez estrutural. Diante disso, a durabilidade das estruturas de pavimento como um todo deve ser considerada com a finalidade de aliar parâmetros de desempenho mecânico com as análises de desempenho ambiental. Os métodos de dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis com camada de mistura asfáltica reciclada a frio ainda são bastante discutidos entre órgãos rodoviários de diferentes países. As normativas brasileiras não contemplam de forma explícita estruturas com esse tipo de material e as equações

de desempenho não se apresentam calibradas para esse tipo de estrutura, o que torna essencial o acompanhamento de possíveis trechos experimentais para verificação de sua durabilidade. Essas informações podem reduzir as incertezas nas análises comparativas entre estruturas de pavimentos convencionais e aquelas com camadas de reciclagem à frio, auxiliando nas tomadas de decisão de órgãos rodoviários e grupos de concessões, de modo a promover a circularidade e contribuir efetivamente para a mitigação das mudanças climáticas.

É importante reafirmar que o inventário deste estudo faz combinações entre dados primários e secundários de bases de dados que representam, em sua maioria, indústrias internacionais e não necessariamente o Brasil. A exemplo, o inventário de ligante asfáltico virgem, que tem grande impacto na pegada de carbono do pavimento, foi selecionado da base de dados *ecoinvent* e não é representativo do produto brasileiro por falta de dados nacionais.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

ZMGM: Conceitualização, Curadoria de dados, Investigação, Metodologia, Escrita — rascunho original, Escrita — revisão e edição; FBS: Conceitualização, Curadoria de dados, Investigação, Metodologia, Escrita — rascunho original, Escrita — revisão e edição, Supervisão, Validação; MB: Conceitualização, Curadoria de dados, Investigação; Escrita — revisão e edição; CLSRJ: Conceitualização, Curadoria de dados, Investigação; Escrita — revisão e edição; LLBB: Conceitualização, Escrita — revisão e edição, Supervisão; KV: Conceitualização, Curadoria de dados, Investigação, Escrita — rascunho original, Escrita — revisão e edição, Supervisão, Validação.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não há conflito de interesses.

USO DE TECNOLOGIA ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

Declaração de disponibilidade de dados

Os dados, modelos e códigos que suportam os resultados deste estudo estão disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o suporte fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP: 2017/25708-7), pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e pelo Grupo Arteris.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2023) *NBR ISO 14067 - Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Amarh, E.A.; J. Santos; G.W. Flintsch et al. (2022) Evaluating the potential environmental benefits of cold recycling-based methods for flexible pavement rehabilitation in Virginia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2676, n. 6, p. 75-86. DOI: 10.1177/036119812111072786.
- Belizario-Silva, F. (2022) *Proposal of life cycle-based environmental performance indicators for decision-making in construction*. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo. DOI: 10.11606/T.3.2022.tde-31102022-091740.
- Bowers, B.F.; B.K. Diefenderfer; S.A. Cross et al. (2023) *Construction Guidelines for Cold Central Plant Recycling and Cold In-Place Recycling* (No. NCHRP Project 14-43). Washington: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.
- Brasil, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2008) Resolução No 39 da ANP. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.

- Brondani, C. (2023) *Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão e cimento portland*. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/30523>> (acesso em 14/08/2025).
- Diefenderfer, B.K.; G. Flintsch; W. Xue et al. (2023) Structural performance of an asphalt pavement containing cold central plant recycling and full-depth reclamation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2677, n. 1, p. 409-19. DOI: 10.1177/03611981221099511.
- EAPA. (2021) Asphalt in Figures 2020. European Asphalt Pavement Association. Disponível em: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-archive/?utm_source=SOME&utm_medium=EAPA&utm_campaign=MARCH> (acesso em 20/10/2024).
- Ebels, L.J. (2008) *Characterisation of material properties and behaviour of cold bituminous mixtures for road pavements*. Tese (doutorado). University of Stellenbosch. Stellenbosch. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/37319064.pdf>> (acesso em 14/08/2025).
- Ghasemi, P.; M. Aslani; D.K. Rollins et al. (2018) Modeling rutting susceptibility of asphalt pavement using principal component pseudo inputs in regression and neural networks. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 11, n. 6, p. 679-88. DOI: 10.1016/j.ijprt.2018.01.003.
- Gu, F.; W. Ma; R.C. West et al. (2019) Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: a case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 208, p. 1513-23. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.222.
- Guatimosim, F.V.; K.L. Vasconcelos; L.L.B. Bernucci et al. (2018) Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 2, p. 385-99. DOI: 10.1080/14680629.2016.1261726.
- Huang, Y.; R.N. Bird e O. Heidrich (2007) A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 1, p. 58-73. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.02.002.
- IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. In Masson-Delmotte, V.; P. Zhai; A. Pirani et al. (eds.) *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2022) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. In Shukla, P. R.; J. Skea; R. Slade et al. (eds.) *Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.
- Kuchiishi, A.K.; K. Vasconcelos e L.L.B. Bernucci (2021) Effect of mixture composition on the mechanical behaviour of cold recycled asphalt mixtures. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 8, p. 984-94. DOI: 10.1080/10298436.2019.1655564.
- Leendertse, W.L.; M.E.M. Schäffner and S. Kerkhofs (2018) *Introducing the circular economy in road construction*. In Caspeele, R.; L. Taerwe and D. Frangopol (eds.) *Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision*. Boca Raton: CRC Press, p. 1639-1644.
- Leite, L.M.F.; L.M.G. Motta; E.C. Costa et al. (2021) *Informações básicas sobre materiais asfálticos: A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/05/2021-ebook-ibp-informacoes-basicas-sobre-materiais-asfalticos.pdf>> (acesso em 14/08/2025).
- Lopes, A. F. D.; K. Vasconcelos; M. S. S. Almeida et al. (2024) Geração e utilização do rap no Brasil. *Revista ENINFRA*, v. 3, n. 3, p. 201-217.
- Lynch, A.G. (2013) *Trends in back-calculated stiffness of in-situ recycled and stabilised road pavement materials*. Tese (doutorado). University of Stellenbosch. Stellenbosch. Disponível em: <https://londoninternational.co.za/wp-content/uploads/2021/10/Lynch_Alan-Masters-trend_2013_17-Nov-2013-Rev2.pdf> (acesso em 14/08/2025).
- Mantalovas, K.; G. Di Mino; A.J.B. Carrion et al. (2020) European national road authorities and circular economy: An insight into their approaches. *Sustainability*, v. 12, n. 17, p. 7160. DOI: 10.3390/su12177160.
- Meneses, J.P.C.; K. Vasconcelos e L.L.B. Bernucci (2022) Stiffness assessment of cold recycled asphalt mixtures: Aspects related to filler type, stress state, viscoelasticity, and suction. *Construction & Building Materials*, v. 318, p. 126003. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126003.
- Moins, B. (2024) *Sustainability assessment of roads containing reclaimed asphalt pavement (RAP): decision support based on LCA & LCCA during road design*. Tese (doutorado). University of Antwerp. Antwerp. DOI: 10.63028/10067/2067820151162165141.
- Pasche, E.; C.F.C.E. Silva; G.M. Pires et al. (2014) Study of the RAP characteristics and its applications to pavement layers in southern Brazil. *Proceedings of the 21st Asphalt Meeting*, v. 1, p. 1-12.
- PMSP (2004) *IP - 08/2004: Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento*. São Paulo: PMSP/SIURB.
- Revista OE (2025) *Estudo reaproveita 100% material fresado e reduz emissões*, *Revista O Empreiteiro*, 26 de maio.
- Tanski, M.; L.P. Specht; T.C. Cervo et al. (2017) Análise de misturas asfálticas recicladas a frio para emprego em canadas de base e sub base de pavimentos. *Revista Estradas*, v. 1, p. 66-73.
- Tushar, Q.; J. Santos; G. Zhang et al. (2022) Recycling waste vehicle tyres into crumb rubber and the transition to renewable energy sources: A comprehensive life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, v. 323, p. 116289. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116289. PMID:36261991.
- Unger-Filho, W.; L.M. Gutiérrez Klinsky; R. Motta et al. (2020) Cold recycled asphalt mixture using 100% RAP with emulsified asphalt-recycling agent as a new pavement base course. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2020, p. 1-11. DOI: 10.1155/2020/5863458.

- Vieira, L.B.P.; A.D. Figueiredo e V.M. John (2020) Evaluation of the use of crushed returned concrete as recycled aggregate in ready-mix concrete plant. *Journal of Building Engineering*, v. 31, p. 101408. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101408.
- Watson, R.; B. Abbassi e Z.S. Abu-Hamattah (2020) Life cycle analysis of concrete and asphalt used in road pavements. *Environmental Engineering Research*, v. 25, n. 1, p. 52-61. DOI: 10.4491/eer.2018.399.
- Zhou, Q.; I. Al-Qadi; H. Ozer et al. (2020) Pavement recycling: a case study of life-cycle assessment and life-cycle cost analysis. In *International Symposium on Pavement, Roadway, and Bridge Life Cycle Assessment 2020 (Davis, CA)*. Boca Raton: CRC Press, p. 404-411. DOI: 10.1201/9781003092278-42.