



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

Igor Sieczkowski Moreira¹; Leonardo Lunkes Wagner¹; Mônica Regina Garcez¹; Gracieli Bordin Colpo² & Lélío Antônio Teixeira Brito¹

RESUMO

Visando o uso de práticas sustentáveis, o material fresado de pavimento, ou RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), pode ser reutilizado na produção de materiais estabilizados com emulsão de asfalto (*Bitumen Stabilized Materials – BSM*), possibilitando seu retorno à rodovia. A BSM vem ganhando espaço no Brasil e auxilia na redução da pegada ambiental por ser um material de aplicação a frio e com possibilidade de incorporação de elevados valores de RAP. Este trabalho objetiva quantificar os impactos ambientais oriundos da produção de BSM, a partir de uma análise de ciclo de vida, visando identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de seu processo produtivo. Para tanto, utilizou-se o software OpenLCA e a base de dados Ecoinvent 3.7.1, estando o escopo restrito aos módulos A1, A2 e A3, correspondente à fase de produção dos materiais, conforme proposto pela norma ISO 21930 (2017). O método utilizado foi o ReCiPe *endpoint* (H, A), cujos indicadores apresentam os impactos ambientais agregados nas categorias de saúde humana, biodiversidade e escassez de recursos. Os resultados demonstraram que o esgotamento de combustíveis fósseis, devido majoritariamente ao transporte de materiais, é o principal impacto ambiental da BSM analisada. Assim, verifica-se também que os impactos estão diretamente relacionados à emissão de CO₂. Portanto, uma oportunidade de melhorar o desempenho ambiental da produção de BSM é a alternância para combustíveis oriundos de fontes renováveis, utilização de bioligantes ou a substituição da frota de veículos antigos por novos menos poluentes.

PALAVRAS-CHAVE: ESG; Materiais estabilizados; Reciclagem de pavimentos; Transporte de materiais; Fresado.

ABSTRACT

Aimed at sustainable practices, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), can be reused in the production of Bitumen Stabilized Materials (BSM), enabling its return to the highway. BSM is gaining ground in Brazil and assists in reducing the environmental footprint as it is a cold-applied material with the potential to incorporate high amounts of RAP. This study aims to quantify the environmental impacts arising from the production of BSM through a life cycle analysis, seeking to identify opportunities to improve the environmental performance of its production process. For this purpose, the OpenLCA software and the Ecoinvent 3.7.1 database were used, with the scope limited to modules A1, A2, and A3, corresponding to the production phase of the materials, as proposed by the ISO 21930 (2017) standard. The method used was ReCiPe *endpoint* (H, A), whose indicators show the aggregated environmental impacts in the categories of human health, biodiversity, and resource scarcity. The results demonstrated that the depletion of fossil fuels, primarily due to material transportation, is the main environmental impact of the analyzed BSM. Thus, it is also evident that the impacts are directly related to CO₂ emissions. Therefore, an opportunity to improve the environmental performance of BSM production is switch to fuels from renewable sources, the use of bio-binders, or the replacement of old vehicles with newer, less polluting ones.

KEY WORDS: ESG; Stabilized materials; Pavement recycling; Material transportation; RAP.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e-mail: igor.moreira@ufrgs.br; leonardo.lunkes@ufrgs.br; monica.garcez@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br

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



INTRODUÇÃO

Uma das principais técnicas de recuperação de pavimentos envolve a fresagem do revestimento asfáltico em conjunto com parte da base, também conhecido como *Full Depth Reclamation* (FDR). O material fresado é denominado no inglês de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), e consiste no resíduo da camada superficial de concreto asfáltico (CA). Frequentemente o RAP é descartado em local de aterro temporário, não sendo ideal do ponto de vista ambiental por diversas questões, inclusive pelo aumento de transporte necessário para seu posterior processamento.

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio da resolução nº14/2021 (DNIT, 2021), dispõe que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias deverão incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento, podendo este ser aplicado nas camadas do pavimento a serem construídas ou na execução de novos concretos asfálticos.

Segundo Dias *et al.* (2023), a pesquisa e aplicação de camadas de base compostas por materiais asfálticos reciclados, estabilizados com emulsão asfáltica, tem sido explorada em diversas configurações no Rio Grande do Sul. Tais misturas são internacionalmente conhecidas como *Bitumen Stabilized Materials* (BSM).

Moreira, Correia e Pereira (2006) afirmam a existência de estudos recentes demonstrando que técnicas de reciclagem a frio, como a BSM, se mostram vantajosas no ponto de vista de economia de energia e proteção ambiental. Porém, a técnica de materiais estabilizados por asfalto, como o próprio nome já diz, é composta por materiais derivados do petróleo, além da possível adição, por exemplo, de cimento Portland. Sendo assim, mesmo que este material seja frequentemente relacionado à redução de impactos ambientais, o seu processo produtivo não é isento de danos ambientais, havendo necessidade de sua avaliação.

Neste contexto, este trabalho possui o objetivo de quantificar os impactos ambientais associados à produção de uma BSM composta por RAP, emulsão asfáltica e adição de agregados virgens e cimento Portland, a partir de uma análise de ciclo de vida (ACV), bem como identificar oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental da produção de BSM com agregados provenientes das obras de restauração de rodovias.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de estabilização de uma BSM ocorre quando a espuma de asfalto, ou emulsão asfáltica, é misturada com agregados virgens e/ou RAP (SABITA, 2020). Além do agente estabilizador, pode-se adicionar um filler ativo, como cal ou cimento. Materiais estabilizados por asfalto podem ser utilizados para a execução de pavimentos novos ou reabilitação de pavimentos antigos, e a estabilização pode ser realizada *in situ* ou em usina. No processo de reabilitação, comumente são utilizadas as técnicas de reciclagem profunda ou *overlay*.

Durante o processo executivo, a eficiência da compactação da BSM é dependente de seu teor de umidade. Grilli *et al.* (2014) demonstram que, em uma BSM composta por altos teores de umidade, inicialmente a água funciona como um lubrificante e permite a compactação efetiva. Porém, quando a energia absorvida pela pressão d'água torna-se dominante, há a diminuição da trabalhabilidade da mistura, fazendo com que a compactação perca seu efeito no intertravamento do esqueleto sólido. Por outro lado, o teor ótimo de umidade permite a obtenção do valor mínimo de volume de agregados, atingindo a saturação somente ao final do processo de compactação.



Um dos principais guias sobre BSM é o TG2 - *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials*, da República da África do Sul (SABITA, 2020). O guia indica que a BSM apresenta características como significativa coesão, resistência à flexão pelo ligante disperso na mistura, baixa propensão ao trincamento quando submetido à tração, boa sensibilidade à umidade e durabilidade.

A busca por materiais inovadores, ambientalmente amigáveis e capazes de atender às demandas impostas, é essencial para garantir a qualidade dos pavimentos e o desenvolvimento sustentável. A reutilização de materiais de pavimentação, que seriam descartados ou subutilizados, está ganhando destaque nas pesquisas e nas demandas das construtoras de pavimentos rodoviários por meio de técnicas de reciclagem.

O RAP, conhecido no Brasil como fresado, é um material obtido na remoção de uma ou mais camadas do pavimento, por meio de um processo denominado de fresagem. Este material vem ganhando espaço nos processos de recuperação de pavimentos, pois apresenta uma boa granulometria e um percentual de ligante já incorporado. Em um passado recente, o fresado era descartado ou doado para prefeituras ou vizinhos de obras, pois não havia demanda para seu reaproveitamento.

A reciclagem consiste em uma técnica de reabilitação de rodovias que busca a reutilização de materiais já envelhecidos, incorporando-os em misturas com novos agregados, cimento, cal ou outros aditivos químicos (FEDRIGO, 2015; BERNUCCI *et al.*, 2022). Além disso, a execução da reciclagem pode ocorrer em campo ou em usinas, onde há um maior controle dos materiais e maior qualidade de mistura, embora exija o transporte do material até a usina (SABITA, 2020). A incorporação do fresado pode ser feita a quente ou a frio.

A utilização de agregados deve respeitar as propriedades necessárias para o tratamento bem-sucedido com o material asfáltico, incluindo características de durabilidade do agregado natural (não tratado), resistência (dureza), plasticidade, classificação, composição e características de intemperismo (SABITA, 2020).

Assim como os agregados virgens, o RAP deve ser classificado e estudado para compor a mistura de BSM. Preti *et al.* (2019) destacam que o RILEM TC237-SIB é o único protocolo de caracterização de RAP existente. O teste de coesão, desenvolvido no documento, funciona adequadamente como uma ferramenta para classificar e distinguir os diferentes tipos de RAP (PERRATON *et al.*, 2016; PRETI *et al.*, 2019). Referente especialmente à granulometria, encontra-se o dilema de se o RAP deve ser considerado como “*black rock*” (agregado negro) ou como sua granulometria original, após a extração do ligante asfáltico.

O método sul-africano de projeto de mistura trata o RAP como um agregado negro e não considera a contribuição do ligante asfáltico envelhecido na composição. Por outro lado, o procedimento de projeto de mistura, desenvolvido nos Estados Unidos, apresenta o RAP com maior porcentagem de agregados revestidos com ligante, pois seus pavimentos possuem maiores espessuras de camada betuminosa (CHANDRA, VEERARAGAVAN e KRISHNAN, 2013). Os manuais da ARRA (ARRA, 2016, 2017, 2018), bem como o Manual da Wirtgen (WIRTGEN GROUP, 2012) e o livro Pavimento Sustentável (BONFIM, 2021), consideram o RAP com sua granulometria não extraída, ou seja, como *black rock*.

Algumas agências consideram a contribuição do ligante envelhecido presente no RAP, mas a maioria trata o RAP da mesma forma que um agregado natural ou rocha negra, ou seja, o ligante é considerado inerte devido às baixas temperaturas de produção (MONDAL e KUNA, 2022). Contudo, a reativação das características aglutinantes do ligante presente no RAP pode ser obtida a



partir do aumento de temperatura, tanto dos agregados virgens, quanto do próprio RAP, e do aumento do tempo de mistura (MADRIGAL *et al.*, 2017).

Com relação ao aditivo de filler ativo, diferentes tipos podem ser utilizados em materiais estabilizados por ligantes, como cimentos (não recomendado os de cura rápida), cal hidratada, cinza volante e escória de alto forno, sendo apenas alguns dos principais exemplos. Conforme o TG2 (SABITA, 2020), o objetivo de incorporar o filler ativo na BSM é melhorar a aderência do asfalto ao agregado, melhorar a dispersão da emulsão, reduzir o índice de plasticidade dos materiais naturais, aumentar a rigidez da mistura e a taxa de ganho de resistência, acelerar a cura da mistura compactada e auxiliar na ruptura da emulsão.

Porém, o comportamento de materiais estabilizados com ligante varia significativamente dependendo da qualidade do material não tratado e da quantidade de asfalto e carga ativa aplicada. Assim, a quantidade de cimento Portland deve ser limitada para evitar a diminuição da flexibilidade das misturas (YAN *et al.*, 2017). Quando a adição é excessiva, o material se comporta mais como material tratado com cimento Portland e o benefício da adição de emulsão asfáltica é discutível. Por esta razão, essa adição é limitada a 1% em massa (BONFIM, 2021; SABITA, 2020; WIRTGEN GROUP, 2012).

Meneses, Vasconcelos e Bernucci (2022) demonstram que o tipo de filler, mesmo em pequenas porcentagens (1%), afeta o comportamento mecânico de misturas de asfalto reciclado a frio. A adição de um baixo teor de cimento Portland ou cal hidratada produz um comportamento semelhante ao de um material granular, com rigidez dependente do estado de tensões. Em níveis baixos de adição, a cal apresenta melhor desempenho em termos de aumento da rigidez e menor dependência da tensão confinante.

Com o cimento Portland dosado em baixas quantidades, os produtos de hidratação se dispersam no interior dos filmes de ligante asfáltico, aumentando a viscosidade da mistura e melhorando a resistência às deformações permanentes (GRAZIANI *et al.*, 2016). Com o aumento do teor de cimento Portland, a estabilidade à umidade, a estabilidade em alta temperatura e a resistência das misturas recicladas à frio aumentam, enquanto a resistência à fissuração em baixa temperatura inicialmente aumenta e depois reduz (YAN *et al.*, 2017).

Os mecanismos de cura não ocorrem imediatamente após a compactação, mas são graduais e podem levar semanas ou meses. Por exemplo, a taxa de quebra da emulsão asfáltica depende do tipo e conteúdo do emulsificante, do valor do pH dentro da mistura e da presença de partículas finas (ou seja, carga ou cimento Portland). Por outro lado, a taxa de perda de umidade está estritamente relacionada às condições de contorno das camadas recicladas, como temperatura e umidade relativa. Além disso, como as reações de hidratação do cimento Portland requerem a presença de água, o uso de cimento acelera o processo de cura da emulsão asfáltica por reduzir a quantidade de água livre (GRAZIANI *et al.*, 2016).

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A estrutura metodológica aplicada neste estudo segue os requisitos para uma análise do ciclo de vida, conforme proposto pela norma técnica NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). De acordo com a referida norma, a ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final.



Um estudo de ACV é composto pela definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados.

Para a realização da modelagem de análise de ciclo de vida e a obtenção dos impactos ambientais causados pela produção de BSM, utilizou-se o *software* de acesso livre openLCA v.2.0.3 em conjunto com a base de dados Ecoinvent 3.7.1. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa esquematicamente o cenário modelado, contendo os cinco fluxos de saída escolhidos no programa. Os fluxos 1 a 4 são equivalentes à produção dos materiais utilizados na mistura, enquanto o fluxo “X” equivale à mistura dos quatro produtos anteriores, resultando na BSM.

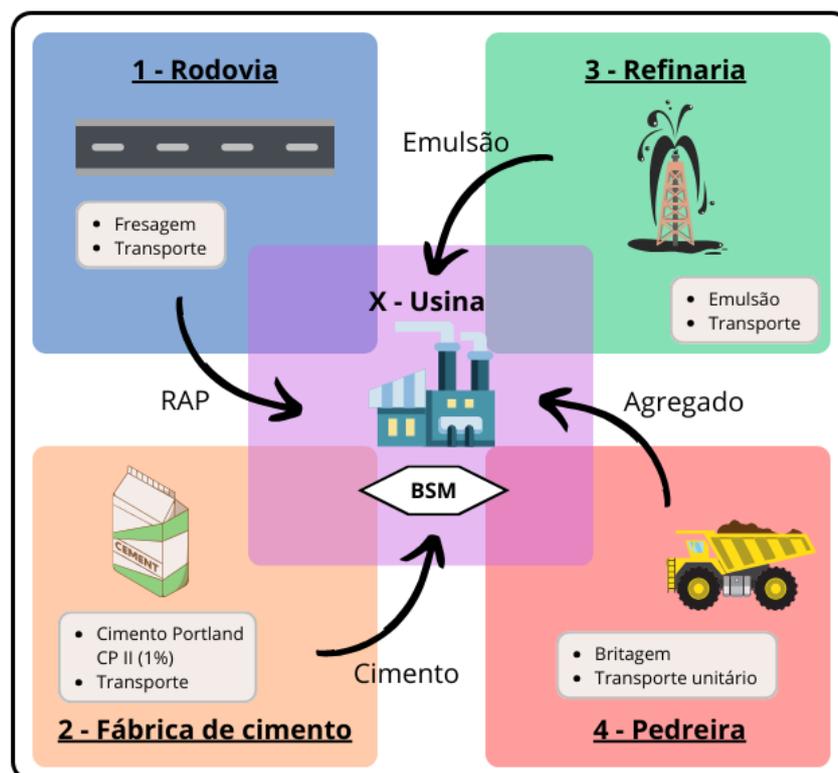


Figura 1. Esquema do fluxo de produção da BSM (AUTORES, 2024).

Escopo

Conforme os requisitos da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), e seguindo os fluxos designados pela ISO 21930 (2017), o escopo para estudo foi assim definido:

- Unidade declarada: 100 toneladas de BSM;
- Fronteiras do sistema: análise do berço ao portão (*cradle-to-gate*) com os módulos mandatórios para uma declaração ambiental de produto (DAP), conforme sugerido pela ISO 21930 (2017):
 - Materiais (A1): faz referência a extração e produção das matérias-primas;
 - Transporte (A2): indica o transporte destas matérias-primas até a usina;
 - Produção (A3): considera a energia despendida para a mistura das matérias-primas, dando origem ao produto BSM;



- Procedimentos de alocação: alocação de recursos em massa;
- Tipos de impactos avaliados: método ReCiPe *Endpoint* (H, A);
- Fonte de dados:
 - *Foreground*: traço das misturas, energia de equipamentos na usina e em campo e distâncias de transporte;
 - *Background*: base de dados Ecoinvent.

Construção do inventário

A ISO 21930 (2017) apresenta de forma esquemática as etapas genéricas do ciclo de vida de uma estrutura de pavimento. Neste estudo, o escopo foi delimitado nos módulos A1, A2 e A3, correspondentes a fase de produção dos materiais, mandatória para a publicação das DAP.

O módulo da matéria-prima (A1) corresponde à produção do RAP, cimento Portland, emulsão asfáltica e agregados; o módulo do transporte (A2) corresponde às distâncias percorridas pelas matérias-primas até a usina (campo-usina, refinaria-usina, fábrica de cimento-usina e pedreira-usina); e o módulo de produção (A3) corresponde à operação da usina para a produção da mistura de BSM.

As discriminações dos processos utilizados em cada fluxo de saída, bem como as quantidades, unidades e itens da base de dados, estão apresentados na Tabela 1.

O valor de consumo energético da operação de fresagem, constante na Tabela 1, foi calculado com base nas informações fornecidas pelo DNIT através do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO). A composição escolhida possui o código 4011479, denominada de “fresagem contínua de revestimento asfáltico”, referente ao estado do Rio Grande do Sul para o mês de abril de 2023.

Quanto a energia para mistura da emulsão e da BSM, ambas foram calculadas com base em informações fornecidas por empresas brasileiras.

A quantidade de material foi calculada para a produção de 100 toneladas de BSM, cujo traço foi adaptado da pesquisa de Dias *et al.* (2023), dimensionado conforme metodologia TG2 para um pavimento brasileiro, e é composto de 43% de agregado virgem, 54% de RAP, 1% de cimento Portland e 2% de emulsão asfáltica (60% de ligante asfáltico e 40% de água).

No cenário modelado, considerou-se que a rodovia submetida ao processo de recomposição está localizada no estado do Rio Grande do Sul. Para o cálculo das distâncias de transporte foram consideradas as principais empresas fornecedoras de materiais da região. Tomando como referência a usina da BSM, as distâncias consideradas até o campo (rodovia), fábrica de cimento Portland e distribuidora de emulsão asfáltica, são respectivamente de 50 km, 250 km e 280 km.

O cálculo da distância percorrida pela fresadora foi baseado em sua capacidade de fresagem. Um equipamento comumente utilizado em obras de reabilitação é capaz de realizar a fresagem de uma faixa de 1,00 m de largura e 20 cm de profundidade. Assim, é possível calcular o volume fresado em função da distância percorrida. O volume pode ser convertido para peso a partir do peso específico do RAP, equivalente a 2069 kg/m³. Por fim, para o transporte da fresadora, admitiu-se um peso de 14 toneladas.



Tabela 1. Descrição dos fluxos de produção da BSM (AUTORES, 2024).

Fluxo de saída	Fluxo de entrada	Qnt.	Un.	Módulo	Ecoinvent
RAP	Energia de fresagem	155,69	kWh	A1	Diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, U – GLO.
	Distância percorrida pela fresadora	3,51	t.km	A1	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
	Transporte da fresadora (usina-campo + campo-usina)	1400	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
	Transporte do material fresado (campo-usina)	2700	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
Cimento	Cimento CP II	1,00	t	A1	Cement, limestone 6-10% cement production, limestone 6-10% cement limestone 6-10% Cut-off U – BR
	Transporte (fábrica-usina)	250	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
Emulsão	Ligante asfáltico	2,00	t	A1	Pitch production, petroleum refinery operation pitch Cutoff, U – BR.
	Água	1,33	t	A1	Tap water tap water production, conventional treatment tap water Cut-off U-BR.
	Energia para mistura	8,21	kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-Southern grid.
	Transporte (refinaria-usina)	933,33	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
Agregado	Britagem	43,00	t	A1	Gravel, crushed gravel production, crushed gravel crushed Cutoff U – BR
	Transporte unitário dentro da usina	43,00	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
BSM	RAP	54,00	t	A1	Fluxo de saída – RAP.
	Cimento	1,00	t	A1	Fluxo de saída – Cimento.
	Emulsão	2,00	t	A1	Fluxo de saída – Emulsão.
	Agregado	43,00	t	A1	Fluxo de saída – Agregado.
	Energia para mistura	43,76	kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-Southern grid.



Avaliação dos Impactos

Para a avaliação dos impactos ambientais, utilizou-se o método ReCiPe *endpoint* (H, A), desenvolvido pelo *National Institute for Public Health and Environment* (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). O ReCiPe possui fatores de caracterização nos níveis *midpoint* e *endpoint*. No *midpoint*, os fatores de caracterização estão alocados entre a causa e o impacto observado, normalmente no ponto em que o mecanismo ambiental é idêntico para cada fluxo ambiental atribuído a essa categoria de impacto (GOEDKOOPE *et al.*, 2009). Os fatores de caracterização do *endpoint* refletem impactos nas três principais áreas de proteção: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos (HAUSCHILD e HUIJBREGTS, 2015).

Cada nível do ReCiPe pode ser avaliado a partir de três perspectivas culturais diferentes: *Individualist* (I), *Hierarchist* (H) e *Egalitarian* (E). A primeira visa o curto prazo, é otimista em relação à tecnologia, valoriza a iniciativa individual do mercado e considera a natureza como resiliente. A segunda considera a natureza como parcialmente tolerante, sendo um modelo de consenso comumente encontrado em estudos científicos. A terceira perspectiva trabalha no longo prazo, visa as necessidades do grupo acima das individuais e considera a natureza como frágil (HUIJBREGTS *et al.*, 2017).

Neste trabalho optou-se pelo nível *endpoint* sob a perspectiva hierarquista média (H, A). Esta escolha foi feita em função de os resultados do *endpoint* serem expressos nas três principais áreas de proteção, de modo a facilitar o entendimento dos fatores de impacto do produto analisado. Ademais, a visão hierarquista foi escolhida por ser um consenso na comunidade científica.

No *endpoint*, a saúde humana é avaliada em anos de vida ajustados por incapacidade, equivalente a anos perdidos ou que uma pessoa está incapacitada devido a doenças ou acidentes; para a qualidade do ecossistema, a unidade utilizada é a perda local de espécies integrada ao longo do tempo (ano-espécie); para a escassez de recursos a unidade é o dólar, representante do custo adicional envolvido na extração futura de recursos fósseis e minerais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 consta a pontuação de impactos ambientais, para cada categoria, obtida a partir da análise de *endpoint* (H, A). A representação dos impactos por barras acumuladas, por grupo analisado, indica que o grupo mais impactado são os recursos naturais, seguido pela saúde humana e qualidade do ecossistema.

A categoria de recursos naturais engloba os recursos fósseis e minerais, os quais provocam impactos no aumento do custo de extração e custo de energia do óleo/gás/carvão (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Conforme os dados apresentados na Tabela 2, 94% do dano nos recursos naturais é provocado pelo esgotamento de recursos fósseis. Esse resultado é esperado, visto que a maioria das atividades realizadas (transporte, mistura e fresagem) utilizam combustível fóssil como fonte de energia.

Tabela 2. Impactos por categoria - ReCiPe *Endpoint* (AUTORES, 2024).

Grupo	Categoria de impacto	Pontuação	Representação por barra
Qualidade do ecossistema	Ocupação de terras agrícolas	2,08	
	Mudanças climáticas, ecossistemas	41,63	
	Ecotoxicidade de água doce	0,01	
	Eutrofização de água doce	0,01	
	Ecotoxicidade marinha	0,00	
	Transformação natural de terras	7,61	
	Acidificação terrestre	0,20	
	Ecotoxicidade terrestre	0,17	
	Ocupação urbana de terras	2,91	
	Total	54,63	
Saúde humana	Mudanças climáticas, saúde humana	65,87	
	Toxicidade humana	5,09	
	Radiação ionizante	0,11	
	Depleção de ozônio	0,05	
	Formação de material particulado	31,29	
	Formação de oxidante fotoquímico	0,23	
	Total	102,64	
Recursos	Esgotamento de combustíveis fósseis	225,21	
	Esgotamento de metais	14,39	
	Total	239,60	
Total geral		396,86	

A categoria de saúde humana é composta pelos impactos de material particulado, formação/esgotamento da camada de ozônio, radiação ionizante, toxicidade humana, aquecimento global e uso d'água, que são agregados em termos de aumento de doenças respiratórias, câncer, desnutrição e outras doenças (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Neste estudo, os indicadores mais afetados foram os de mudanças climáticas e formação de materiais particulados. Ambos relacionados direta ou indiretamente com a emissão de CO₂ a partir da queima de combustíveis fósseis.

A categoria de qualidade do ecossistema é formada pelos impactos de aquecimento global, uso d'água, ecotoxicidade/eutrofização d'água doce e marinha, formação da camada de ozônio, ecotoxicidade/acidificação terrestre, uso/transformação da terra, agregados em termos de dano a espécies de água doce, marinha e terrestre (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Para a produção da BSM em análise, conforme apresentado na Tabela 2, os indicadores de maior impacto nesta categoria são as mudanças climáticas e a transformação natural de terras. Novamente, as mudanças climáticas estão ligadas à emissão de CO₂. Com relação aos impactos de transformação, estes são provenientes da exploração de pedreiras e petróleo.

Conforme visto, a produção de gás carbônico está presente de diversas formas nos fluxos considerados para a produção da BSM. De acordo com a Tabela 1, existem seis atividades de



transporte, cujo principal meio de poluição é a queima de diesel; para a produção do RAP há também a queima do diesel para o funcionamento da máquina fresadora; para o cimento, existe a emissão de CO₂ pela queima do material no processo produtivo; e para a emulsão, na produção do ligante asfáltico, há a emissão de CO₂ pela operação da refinaria de petróleo. Em todos estes casos há o esgotamento de recursos naturais, visto que o diesel e o ligante asfáltico são subprodutos do petróleo.

A Tabela 3 apresenta as quantidades de gás carbônico, em massa, geradas por categoria, conforme os resultados da simulação realizada neste estudo.

Tabela 3. Emissão de gás carbônico por categoria (AUTORES, 2024).

Fonte de emissão	CO ₂ (kg)	Porcentagem
Biogenética	89,78	3,8%
Fóssil	2250,29	95,8%
Transformação de terras	6,28	0,3%
Estoque de solo ou biomassa	1,43	0,1%
Total	2347,77	100%

A Tabela 3 corrobora o fato de os combustíveis fósseis serem um ponto crítico da BSM sob o ponto de vista ambiental. Essa fonte corresponde a 95,8% do total no processo produtivo do material. De acordo com as análises anteriores, o transporte de materiais é o modo mais frequente de combustão de recursos fósseis. Sendo assim, identifica-se o transporte de materiais como a principal fonte emissora de CO₂ e principal meio gerador de impactos ambientais na produção da BSM analisada.

Souza (2017) apresentou uma ACV para a avaliação da construção de pavimentos convencionais. Seus resultados ressaltaram que o transporte também desempenha um papel significativo nas emissões, corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Para facilitar o entendimento das dimensões das emissões do produto, os resultados foram comparados com as emissões de veículos brasileiros. Um carro produz em média 191,4 g de CO₂ por km percorrido (CARVALHO *et al.*, 2017). A produção de 100 toneladas de BSM gera uma emissão total de 2347,77 kg de CO₂. Assim, seria necessário que um veículo de passeio percorresse 12.266 km para equiparar as emissões de carbono com o processo produtivo de 100 toneladas deste material.

CONCLUSÕES

É importante salientar que uma análise de ciclo de vida é sensível ao contexto. Portanto, as conclusões obtidas são restritas ao cenário analisado, não sendo possível fazer generalizações, devido principalmente às distâncias de transporte específicas para cada região.

Os resultados demonstram que o esgotamento de combustíveis fósseis é o principal impacto ambiental do processo produtivo da BSM analisada. Dentre as diferentes fontes, identificou-se o transporte de materiais como o principal meio para a exaustão deste recurso. Ademais, a queima de combustíveis resulta na emissão de gás carbônico, levando à conclusão de que este é um dos fatores chave na análise de impactos ambientais da BSM.

Assim, as longas distâncias de transporte, presentes no cenário modelado, são decisivas para os resultados observados. Porém, vale ressaltar que este é um cenário comum no dia a dia, visto que em muitos casos a rodovia a ser recuperada está distante da usina de BSM, fábrica de cimento e



refinaria de emulsão. Um cenário ideal seria composto por um ambiente em que a usina, fábrica e refinaria estejam localizadas no mesmo lugar, havendo a necessidade apenas de transporte até o local de aplicação do material. Porém, entende-se que a configuração de locação destes pontos é uma condição pré-estabelecida, havendo dificuldades técnicas e operacionais para alteração. Portanto, como solução para mitigar os impactos ambientais, pode-se avaliar qual dos componentes da mistura de BSM apresentam maior momento de transporte para uma tentativa de otimização da dosagem da BSM, visando diminuir o impacto causado pelo transporte. Além disto, possíveis alternativas de longo prazo são a alternância para combustíveis oriundos de fontes renováveis, utilização de bioligantes ou a substituição da frota de veículos antigos por novos, menos poluentes. A simulação considerou veículos que seguem a norma Euro 5 de limite máximo de emissão de poluentes veiculares. Porém, sabe-se que já existem veículos no padrão Euro 6, com critérios de emissão ainda mais rigorosos e menos poluentes.

Como sugestão de trabalhos futuros, novos cenários podem ser avaliados, com enfoque em simular diferentes distâncias, visando quantificar a parcela de impacto do transporte, diferentes traços de BSM, procurando conciliar desempenho e proteção ambiental, e diferentes configurações de veículo, de forma a explorar a viabilidade da alteração da frota veicular. Além disso, é possível realizar simulações no nível *midpoint*, visando obter resultados quantitativos dos diversos poluentes envolvidos no processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão das bolsas de estudo e produtividade respectivamente ao primeiro autor e à terceira autora, à CAPES pela bolsa de estudo do segundo autor, bem como ao Laboratório de Pavimentação da UFRGS, que permitiu a execução do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Cement or Cement Kiln Dust (CKD) Stabilizing Agent FDR202. v. 60137, n. 630, 2016.
- ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Cold Recycling Using Foamed (Expanded) Asphalt Recycling Agent (CR202). Asphalt Recycling & Reclaiming Association, v. 60137, n. 630, 2017.
- ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. v. 60137, n. 630, 2018.
- BERNUCCI, L.B. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.
- BONFIM, V. Pavimento Sustentável. São Paulo: Exceção Editorial, 2021.
- CARVALHO, A.L. et al. Diagnóstico das Emissões de CO₂ a Partir dos Deslocamentos dos Estudantes da Universidade de Brasília. Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia. 2017.
- CHANDRA, R.; VEERARAGAVAN, A.; KRISHNAN, J.M. Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 104, p. 2–11, dez. 2013.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Resolução nº 14/2021, de 08 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração,



adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Brasília/DF, 2021.

DIAS, C.R.C. et al. Bitumen Stabilized Materials as Pavement Overlay: Laboratory and Field Study. *Construction and Building Materials*, v. 369, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130562>.

FEDRIGO, W. Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland: Definição das Bases Para um Método de Dosagem. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

GOEDKOOP, M. et al. ReCiPe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at The Midpoint and Endpoint Levels. 1ª ed. Report i: characterization. The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009.

GRAZIANI, A. et al. Effect of Curing on The Physical and Mechanical Properties of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. *Materials and Design*, v. 95, p. 358–369, 2016.

GRILLI, A. et al. Análise Volumétrica de Misturas Asfálticas Recicladas a Frio Por Meio de Compactador Giratório. 21º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil. 2014.

HAUSCHILD, M.Z.; HUIJBREGTS, M.A.J. Introducing Life Cycle Impact Assessment. In: *Life Cycle Impact Assessment*. Springer, 2015.

HUIJBREGTS, M.A.J. et al. ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. In: *Life Cycle Assess 22*, p. 138–147. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21930: Sustainability in Building Construction – Environmental Declaration of Building Products. Geneva, 2017.

MADRIGAL, D.P. et al. Effect of Mixing Time and Temperature on Cracking Resistance of Bituminous Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001831](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001831).

MENESES, J.P.C; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.L.B. Stiffness Assessment of Cold Recycled Asphalt Mixtures – Aspects Related to Filler Type, Stress State, Viscoelasticity, and Suction. *Construction and Building Materials*, v. 318, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126003>.

MONDAL, P.G.; KUNA, K.K. Mix Design Considerations for Foamed Bitumen Stabilized Materials: A Review. *Construction and Building Materials*, v. 326, fev., p. 126783, 2022.

MOREIRA, J., CORREIA, A.G.; PEREIRA, P.A. Contribuição Para a Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento, 2006.

PERRATON, D. et al. Tests Campaign Analysis to Evaluate the Capability of Fragmentation Test to Characterize Recycled Asphalt Pavement (RAP) Material. In 8th RILEM international Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. p. 965–976. Dordrecht: Springer. 2016.

PRETI, F. et al. Application and Validation of The Cohesion Test to Characterize Reclaimed Asphalt Pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup1), S434–S445. 2019.

SABITA. Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita). 3ª ed. 2020.

WIRTGEN GROUP. Reciclagem a Frio: Tecnologia de Reciclagem a Frio Wirtgen. 2012. Disponível em: <www.wirtgen.com>. Acesso em: abr. 2024.

YAN, J. et al. Early-Age Strength and Long-Term Performance of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixes With Various Cement Contents. *Construction and Building Materials*, v. 137, p. 153–159, 2017.

SOUZA, L. P. Uso Integrado das Ferramentas de Análise do Ciclo de Vida e de Análise do Custo do Ciclo de Vida em Pavimentação. 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.