

19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

AVALIAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM MATERIAL FRESADO: UM ESTUDO DE CASO BRASILEIRO

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

Zila Mascarenhas¹; Fernanda Belizario-Silva²; Raimi Silva³; Diego Andrade³; Kamilla Vasconcelos¹; Liedi Bernucci^{1,2}

RESUMO

O cenário mundial mostra a crescente necessidade por soluções de menor impacto ambiental e desempenho técnico melhor ou igual às existentes, se aplicando também as necessidades da infraestrutura rodoviária. Este artigo apresenta a avaliação do ciclo de vida (ACV) de uma mistura asfáltica reciclada a quente com uso de material asfáltico fresado (RAP) produzida em usina brasileira, em comparação ao desempenho ambiental de uma mistura convencional. A unidade declarada de 1 tonelada de mistura asfáltica foi adotada, considerando-se a fronteira do estudo desde a extração de recursos naturais, até a produção de mistura asfáltica na usina (berço ao portão). O indicador analisado foi o potencial de aquecimento global (pegada de carbono) com horizonte de 100 anos, expresso em kg CO_{2eq}/t de mistura asfáltica, conforme método do IPCC (2021). O uso de RAP em mistura asfáltica usinada a quente resulta em menor pegada de carbono quando comparada à mistura convencional. Os resultados mostram que, para este estudo de caso, a fase de produção da mistura asfáltica foi a que mais contribuiu para a pegada de carbono total da mistura, o que indica ser um processo de potencial investimento para melhorar o desempenho ambiental da mistura asfáltica. A logística de transporte do RAP também deve ser levada em consideração, uma vez que pode anular os benefícios ambientais da reciclagem, quando as distâncias de transporte do bota-espera até a usina são superiores a 315 km (para o caso analisado).

PALAVRAS-CHAVE: sustentabilidade; pegada de carbono; misturas asfálticas usinadas a quente; reciclagem; usina de asfalto.

ABSTRACT

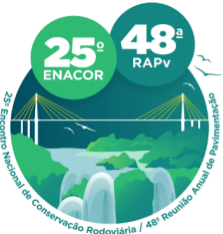
The world scenario shows the growing need for alternatives with lower environmental impacts and better or similar performance compared to existing solutions. This paper presents the life cycle assessment (LCA) of a recycled asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement (RAP) produced in a Brazilian mixing plant, compared to the environmental performance of a conventional asphalt mixture. The declared unit adopted was 1 metric ton of asphalt mixture, and the system boundary included the extraction of natural resources, material transportation and asphalt mix production (cradle-to-gate approach). The Global Warming Potential (carbon footprint) with 100 years' time horizon was used as impact indicator, expressed in kg CO_{2eq}/t of asphalt mixture according to the IPCC method (2021). The use of RAP in hot mix asphalt can reduce the carbon footprint compared to the conventional asphalt mixture. The results show that the mixing stage was the one with higher contribution to the total carbon footprint, identifying it as an important process for further investment to improve the product's environmental performance. Nevertheless, RAP transportation distances must be considered as the environmental benefits of RAP recycling can be eliminated when distances between RAP supplier and mixing plants are higher than 315 km, for this case study.

KEY WORDS: recycling; hot mix asphalt; carbon footprint; asphalt plant; sustainability.

¹ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e-mail: zilamascarenhas@usp.br; e-mail: kamilla.vasconcelos@usp.br; e-mail: liedi@usp.br

² Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, e-mail: fbsilva@ipt.br

³ Grupo Arteris, e-mail: raimi.silva@arteris.com.br; e-mail: diego.andrade@arteris.com.br



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A análise do desempenho ambiental de materiais asfálticos para pavimentos tem se mostrado essencial para a avaliação da eficácia de alternativas sustentáveis, como, por exemplo, a reciclagem de resíduos e o uso de novas tecnologias de produção de misturas asfálticas. Métodos quantitativos, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) possibilitam comparar objetivamente diferentes sistemas de produtos, identificando as soluções que potencialmente causam menor impacto ao meio ambiente. A ACV também permite identificar as fases do ciclo de vida onde há maior contribuição para os impactos ambientais avaliados, para priorizar melhorias nos processos produtivos, e/ou no produto, de forma a minimizar os impactos ambientais provenientes da infraestrutura rodoviária.

O uso de material fresado (RAP) em misturas asfálticas é a prática internacional mais comum de reciclagem, apesar de ainda incipiente no Brasil, possibilitando a diminuição do consumo de ligante asfáltico e agregados virgens e dos impactos ambientais associados a estes insumos (LEE; CHOU; CHEN, 2012; VIDAL *et al.*, 2013; WEST; WILLIS; MARASTEANU, 2013; AURANGZEB *et al.*, 2014). No aspecto econômico, o uso crescente do RAP proporciona a diminuição de custos relacionados à aquisição de materiais virgens e do seu frete. No entanto, é importante que as distâncias de transporte de materiais secundários, ou resíduos, como o RAP, quando aplicado a novas misturas asfálticas, sejam consideradas na ACV para que os benefícios da reciclagem não sejam anulados pelos impactos provenientes de processos adicionais desse novo sistema de produto (processamento, transporte, etc.).

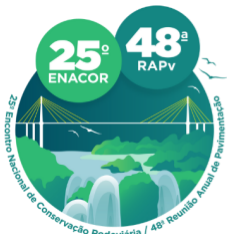
Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho ambiental da produção de mistura asfáltica reciclada a quente em usina de asfalto estacionária, em comparação a uma mistura asfáltica convencional (sem material reciclado). Foi realizado o mapeamento das etapas do ciclo de vida da mistura asfáltica, com coleta de dados primários do processo de mistura, combinados a dados secundários de base de dados. Os resultados, incluindo a análises de sensibilidade da distância de transporte do RAP à usina, propõem indicações para eventuais melhorias no processo produtivo e na logística de transporte de materiais para produção de misturas asfálticas com a incorporação de baixa percentagem de RAP (10%).

METODOLOGIA

Objetivo e Definição do Escopo

As etapas da ACV seguem as orientações das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). O objetivo principal deste estudo é avaliar o desempenho ambiental (mais especificamente a pegada de carbono) de mistura asfáltica reciclada a quente, em comparação a uma mistura asfáltica convencional sem adição de RAP de semelhante curva granulométrica. As misturas asfálticas consideradas nesta análise são compostas basicamente de ligante asfáltico modificado por borracha, agregado virgem, cal e RAP (Tabela 1). A Figura 1 apresenta a curva granulométrica das misturas em estudo respeitando os limites especificados pela SPV 16,0 (INSTITUTO DE ASFALTO, 2001).

As proporções de cada material foram adotadas a partir de dosagens reais de misturas asfálticas, em que o RAP substitui parcialmente o agregado virgem e o ligante asfáltico. Baseado nos projetos de mistura convencional e reciclada, assumiu-se a substituição parcial do ligante asfáltico com mobilização de 90% do ligante do RAP. A mesma durabilidade foi assumida para a mistura convencional e reciclada.



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

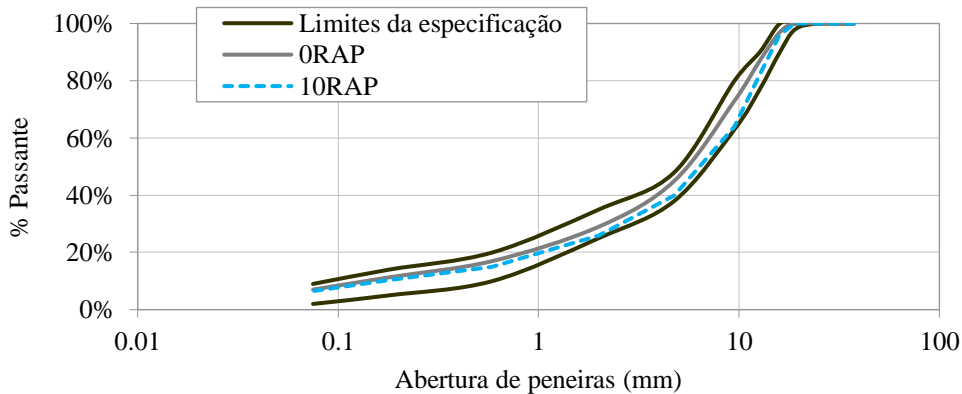


Figura 1. Granulometria de projeto das misturas asfálticas.

Tabela 1. Características das misturas asfálticas.

Mistura asfáltica	Teor de RAP, M%	Teor de cal, M%	Teor de ligante (virgem), M%	Teor de ligante (total), M%	Tipo de ligante	Massa específica aparente, g/cm ³
0 RAP	0	1,4	5,1	5,1	Asfalto borracha	2,383
10 RAP	9,5	1,4	4,8	5,2	Asfalto borracha	2,362

* M%: por massa de mistura, RAP: material fresado

A unidade declarada adotada para este estudo foi 1 tonelada (t) de mistura asfáltica. A fronteira do sistema do produto em análise abrange a extração e o processamento das matérias primas, transporte destes materiais até a usina e produção das misturas asfálticas. Tais fases do ciclo de vida configuram uma análise do berço ao portão. Sendo assim, as fases de construção, uso e fim da vida útil não foram contabilizadas neste estudo. A Figura 2 mostra a fronteira do sistema para os dois cenários considerados: mistura convencional e mistura reciclada.

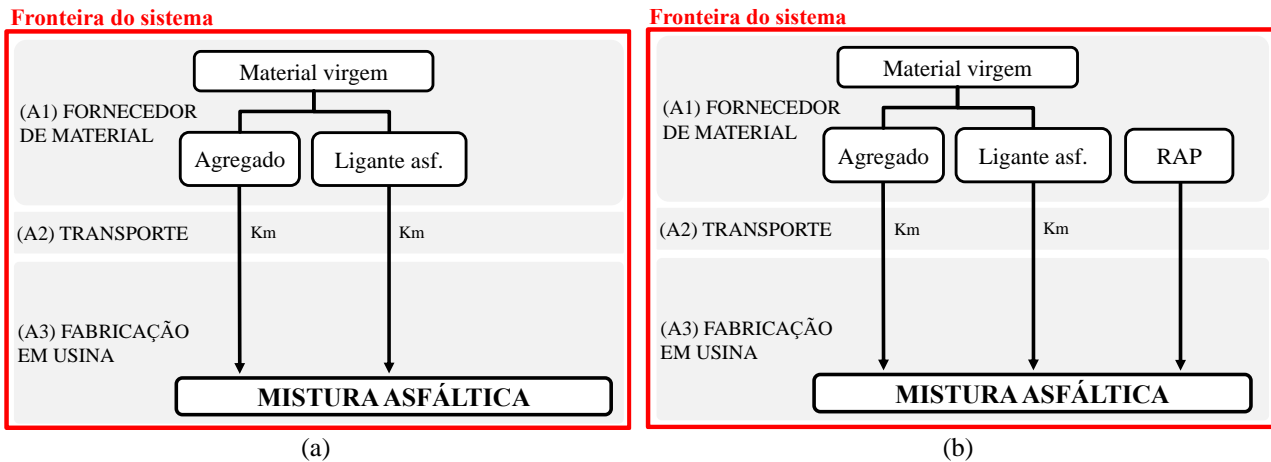


Figura 2. Fronteiras do sistema: (a) Mistura convencional e (b) Mistura reciclada com 10% de RAP.

Inventário do Ciclo de Vida

O inventário do ciclo de vida (ICV) foi criado a partir da combinação de dados primários levantados em uma usina de produção de misturas asfálticas e dados secundários da literatura e base de dados *ecoinvent* (versão 3.9.1 de 2022, alocação “cut-off”, ou seja, materiais reciclados entram com carga ambiental nula). Os insumos para produção das misturas em estudo são: asfalto borracha, agregado virgem, cal hidratada e RAP. O ligante asfáltico modificado foi representado pela combinação do



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



inventário do ligante asfáltico virgem do *ecoinvent* com o inventário da borracha moída de pneus retirado da literatura. O consumo de energia elétrica e diesel para produzir 1 tonelada de borracha moída é de 406,25 kWh e 10,26 L, respectivamente (TUSHAR *et al.*, 2022). A energia gasta no processo de incorporação da borracha foi desprezada por falta de dados representativos. De acordo com o fornecedor do ligante modificado, a borracha corresponde a 15% da massa total do ligante, atendendo às propriedades estabelecidas pela Resolução N° 39 da ANP (2008).

Os agregados virgens foram modelados usando dados de pedreiras brasileiras coletados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) (SILVA *et al.*, 2018). Agregados e ligante asfáltico tiveram suas massas estimadas a partir dos projetos de dosagem utilizados na usina. No caso da mistura reciclada, o RAP é incorporado à mistura, sendo necessário o seu beneficiamento nas instalações da usina de asfalto antes da fabricação da mistura. Esse processamento se dá por britagem do RAP com o uso de escavadeira com rompedor acoplado. A estimativa de horas de operação do rompedor (para estimar o consumo de energia associado à operação) foi feita por meio da especificação do equipamento, que descreve capacidade máxima de britagem igual a 230 L/min, calculando-se uma necessidade de aproximadamente 1 minuto e 50 segundos para britagem de 1 tonelada de RAP, considerando que o equipamento funciona a 85% de sua capacidade máxima. A Tabela 2 apresenta a massa por material.

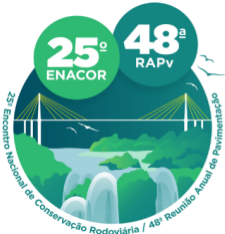
Tabela 2. Massa de cada material em 1t de mistura asfáltica.

Cenário	Mistura, kg	Agregado, kg	RAP, kg	Cal, kg	Asfalto borracha, kg
0 RAP	1000	935,0	0	14,0	51,0
10 RAP	1000	842,6	95,2	14,0	48,2

Em um primeiro momento, o transporte foi considerado apenas para os materiais virgens, 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 e será processado para incorporação na nova mistura asfáltica.

Em um segundo momento, foi realizada uma análise de sensibilidade considerando que o RAP seria retirado do pavimento e depositado em um bota-espera, para posteriormente ser transportado para a usina de asfalto. Nesse caso, considera-se o transporte do RAP entre o bota-espera e a usina de asfalto, variando-se a distância de transporte entre mínima, média e máxima. Tais distâncias foram avaliadas de acordo com a localização dos pontos de bota-espera, por meio de informações fornecidas pela Autopista Fernão Dias, sendo de 14,1 km, 68,3 km e 192,5 km, respectivamente.

O tipo de transporte e as distâncias foram determinadas a partir do cenário real do estudo de caso em questão, onde o transporte rodoviário do agregado virgem e do ligante asfáltico são realizados por meio de caminhões. As capacidades de carga dos caminhões para transporte dos agregados e do ligante asfáltico foram assumidas como 23 t e 40 t (peso total), respectivamente. A distância de transporte dos agregados partindo do fornecedor para a usina foi reportada como 1 km, uma vez que a pedreira e a usina pertencem ao mesmo grupo industrial. No caso do ligante asfáltico, foi necessário considerar a distância de transporte entre a refinaria e o distribuidor de asfalto (indústria modificadora) de 146 km, a distância de transporte entre o fornecedor de pneu e o distribuidor de asfalto foi assumida de 45 km e a distância entre o distribuidor asfáltico e a usina informada foi de 214 km. Um padrão de emissões veiculares mais conservador, fase PROCONVE P5 (Resolução CONAMA 315/2002, equivalente a Euro 3), foi assumido para todos os veículos de transporte (CETESB, 2019). Um resumo das distâncias de transportes e características é apresentado na Tabela 3.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 3. Informações de transporte.

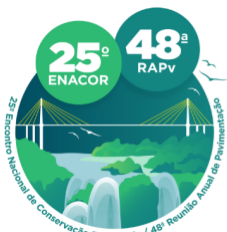
De	Para	Distância, km	Tipo de transporte
Refinaria	Fornecedor de ligante	146	Caminhão (40 t)
Fornecedor de pneu	Fornecedor de ligante	45	Caminhão (23 t)
Fornecedor de ligante	Usina	214	Caminhão (40 t)
Pedreira	Usina	1	Caminhão (23 t)
Bota-espera RAP	Usina	0	Caminhão (23 t)
Análise de sensibilidade - diferentes distâncias de transporte para o RAP			
Bota-espera RAP	Usina	14,1 (mín.)	Caminhão (23 t)
Bota-espera RAP	Usina	68,3 (média)	Caminhão (23 t)
Bota-espera RAP	Usina	192,5 (máx.)	Caminhão (23 t)

A fase de produção das misturas asfálticas corresponde aos processos que ocorrem dentro da usina. O consumo de energia elétrica e combustíveis foi obtido por medições diretas na usina em estudo que produziu a mistura reciclada a quente com 10% de RAP e a mistura convencional (sem RAP). As medições de consumo de energia elétrica foram feitas por meio de aparelhos medidores com transformadores de corrente para calcular o consumo de energia elétrica em tempo real. O consumo do gás liquefeito de petróleo (GLP) foi estimado por meio de leituras realizadas no medidor analógico de capacidade do tanque de gás no início e no fim da produção de misturas asfálticas; apesar da imprecisão associada a este método de medida, era o único disponível na ocasião da realização do estudo.

Os dados primários coletados ou estimados, conforme descrito anteriormente, foram associados aos inventários da base de dados *ecoinvent* o mais próximos possível da realidade brasileira (Tabela 4). A usina de asfalto em análise consome energia elétrica para o funcionamento geral do equipamento e GLP para o aquecimento do ligante asfáltico, secagem e aquecimento dos agregados (1,06 kWh e 373,5 MJ, respectivamente para a mistura convencional e 1,24 kWh e 338,8 MJ para a mistura reciclada) para produzir 1 tonelada de mistura asfáltica densa à 175°C (temperatura de saída da massa asfáltica).

Tabela 4. Lista de dados considerados no inventário.

Fase do ciclo de vida	Unidade do processo	Dado primário	Dado secundário
Produção de agregados	Agregados	Quantidade de agregado de acordo com o projeto de dosagem da mistura	IPT e <i>ecoinvent</i> 3.9.1: Gravel production, crushed gravel, crushed Cutoff, U - BR
	Ligante virgem		<i>Ecoinvent</i> 3.9.1: Pitch production, petroleum refinery operation pitch Cutoff, U - BR
Produção de ligante asfáltico	Borracha moída de pneu	Quantidade de asfalto borracha de acordo com o projeto de dosagem da mistura	Tushar <i>et al.</i> (2022) e <i>ecoinvent</i> 3.5: Market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-South-eastern/Mid-western grid Market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine Cutoff, U - GLO
Produção de cal hidratada	Cal	Quantidade de cal de acordo com o projeto	<i>Ecoinvent</i> 3.9.1: Market for lime, hydrated, packed lime, hydrated, packed Cutoff, U - RoW



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



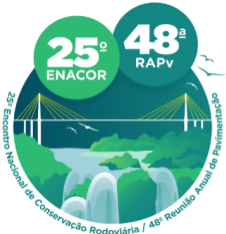
		de dosagem da mistura	
Processamento do RAP	Britagem e peneiramento	Quantidade de RAP de acordo com o projeto de dosagem da mistura	Ecoinvent 3.9.1: Machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, high load factor machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, high load factor Cutoff, U - GLO
Transporte	Transporte de agregados por rodovia	Distâncias de transporte e quantidade de matéria prima a ser fornecida	Ecoinvent 3.9.1: Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR
	Transporte de ligante asfáltico por rodovia		Ecoinvent 3.9.1: Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR
Produção da mistura asfáltica	Secagem e aquecimento dos agregados	Quantidade de agregado de acordo com projeto de dosagem da mistura e consumo de gás pela usina	Ecoinvent 3.9.1: Heat production, propane, at industrial furnace >100 kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW
	Armazenamento do ligante asfáltico	Quantidade de asfalto borracha de acordo com o projeto de dosagem da mistura e consumo de gás pela usina	Ecoinvent 3.9.1: Heat production, propane, at industrial furnace >100 kW heat, district or industrial, other than natural gas Cutoff, U - RoW
	Produção da mistura (usina)	Consumo de eletricidade	Ecoinvent 3.9.1: Market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-South-eastern/Mid-western grid

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A avaliação da pegada de carbono 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 kg de CO₂ equivalente (CO₂-eq) por tonelada de mistura asfáltica (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*.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, apresentam-se os resultados que não consideram os impactos do transporte do RAP desde a fresagem em campo até a usina, uma vez que estes são atribuídos ao ciclo de vida anterior. Os resultados de potencial de aquecimento global são apresentados por fase do ciclo de vida na Figura 3 e Figura 4. A mistura asfáltica com RAP apresenta menor potencial de aquecimento global quando comparada à mistura convencional, mesmo que tenha sido usado um baixo teor de RAP, havendo uma redução de 5,2% das emissões totais, o que equivale a evitar a emissão de 4,1 kg CO₂-eq/t de mistura asfáltica.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

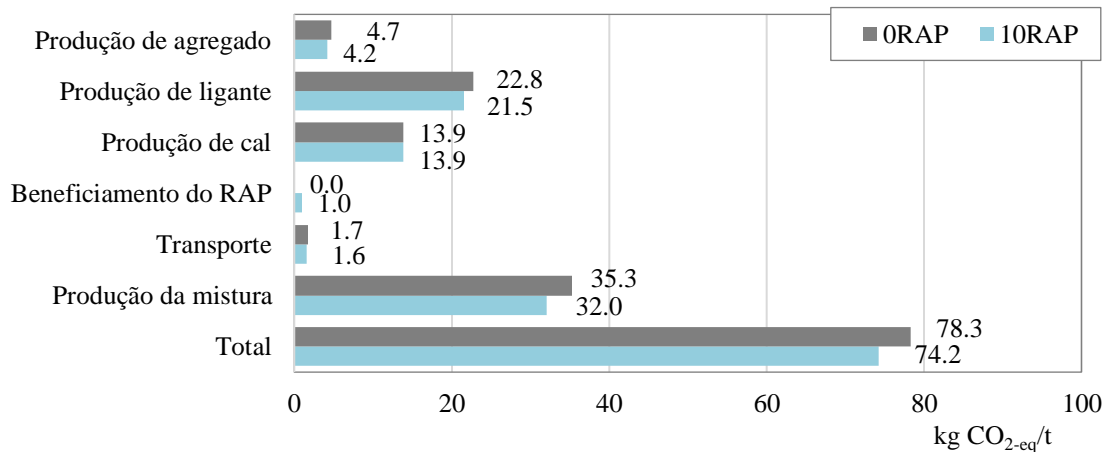


Figura 3. Pegada de carbono por fase do ciclo de vida para RAP disponível em usina.

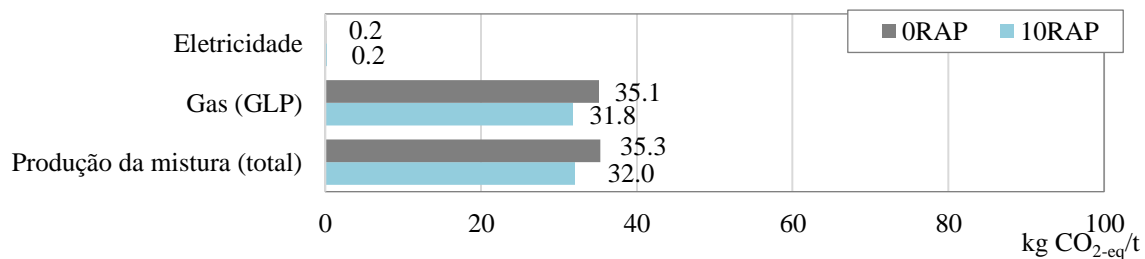


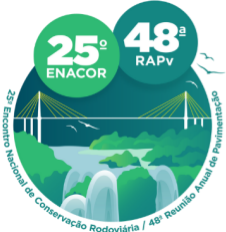
Figura 4. Pegada de carbono da fase de produção das misturas com e sem RAP.

A fase de produção da mistura asfáltica é o maior contribuinte para a pegada de carbono da mistura reciclada e convencional (43% a 45%). A Figura 4 mostra que as emissões são causadas principalmente pelo consumo de combustível fóssil (GLP), representando 99% do potencial de aquecimento global nessa fase, ao contrário da energia elétrica consumida de forma direta que representa uma parcela muito pequena. A redução da pegada de carbono também está ligada à etapa de produção de ligante asfáltico (redução de 5,7%), sendo este o segundo maior responsável pelo impacto analisado (próximo a 29%). Ao adicionar o RAP na produção de mistura asfáltica reciclada, há a substituição parcial do ligante asfáltico (AURANGZEB *et al.*, 2014; LUZZI *et al.*, 2021; SUZUKI *et al.*, 2023), ou seja, menos ligante asfáltico virgem será necessário, evitando assim a sua produção.

O beneficiamento do RAP, necessário para a reciclagem do material, não inviabilizou o seu uso do ponto de vista ambiental, tendo baixa contribuição nas emissões totais. Mesmo que os agregados virgens tenham também sido parcialmente substituídos pelo RAP, a contribuição para redução das emissões é baixa quando comparada à totalidade que a produção de agregados representa (aproximadamente 6% da pegada de carbono total). Os impactos da fase de transporte são baixos comparados às demais fases. Isso se deve à pequena distância de transporte dos agregados virgens que compõe a mistura asfáltica em 95%, onde a redução do volume a ser transportado (aproximadamente 10%) não traz significativas reduções nas emissões totais.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA DISTÂNCIA DE TRANSPORTE DO RAP

Uma análise de sensibilidade foi realizada considerando o armazenamento do RAP em bota-espera (comum em muitos cenários de obras no Brasil) ao longo da rodovia após a fresagem do pavimento, para ser posteriormente transportado à usina. O transporte realizado entre o bota-espera e a usina é



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



considerado um processo que fará parte do novo ciclo de vida com uso do RAP em mistura asfáltica reciclada a quente. Dessa forma, baseando-se no mapeamento de locais de bota-espera feito pela Autopista Fernão Dias, foram adotadas distância de transporte mínima, média e máxima entre o bota-espera e a usina de asfalto considerada nesse estudo de 14,1 km, 68,3 km e 192,5 km, respectivamente. Os resultados são apresentados na Figuras 5.

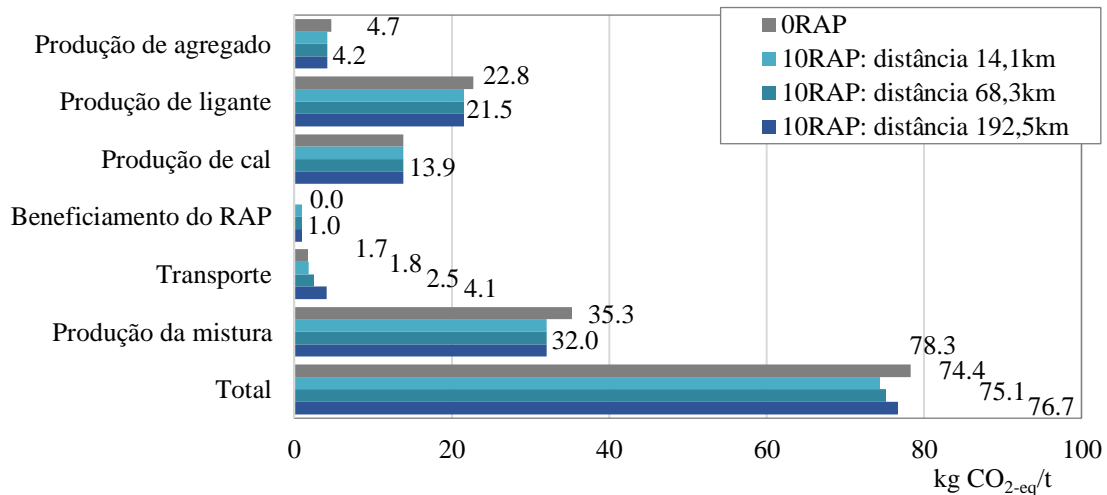


Figura 5. Emissões por fase do ciclo de vida para diferentes distâncias de transporte do RAP.

Os resultados mostram que em todos os cenários de distância de transporte (14,1 km, 68,3 km e 192,5 km) ainda há benefícios com relação ao impacto ambiental no transporte do RAP com redução de 5,0, 4,1 e 2,0% das emissões, respectivamente, quando comparadas à produção de mistura asfáltica convencional (0RAP). É importante mencionar que o dado usado para transporte de cargas, proveniente do *ecoinvent*, considera a adaptação do combustível de caminhões para a realidade brasileira, que inclui o uso de 12 % de biodiesel (Resolução CNPE N° 3/2023), além de uma porcentagem pré-definida de retorno do caminhão vazio à origem. A partir de uma regressão linear dos resultados de emissões totais para as diferentes distâncias de transporte, foi possível determinar a distância máxima de transporte do RAP de aproximadamente 315 km para que a reciclagem a quente iguale a pegada de carbono da mistura asfáltica com 0RAP, considerando as condições presentes neste estudo de caso (Figura 6).

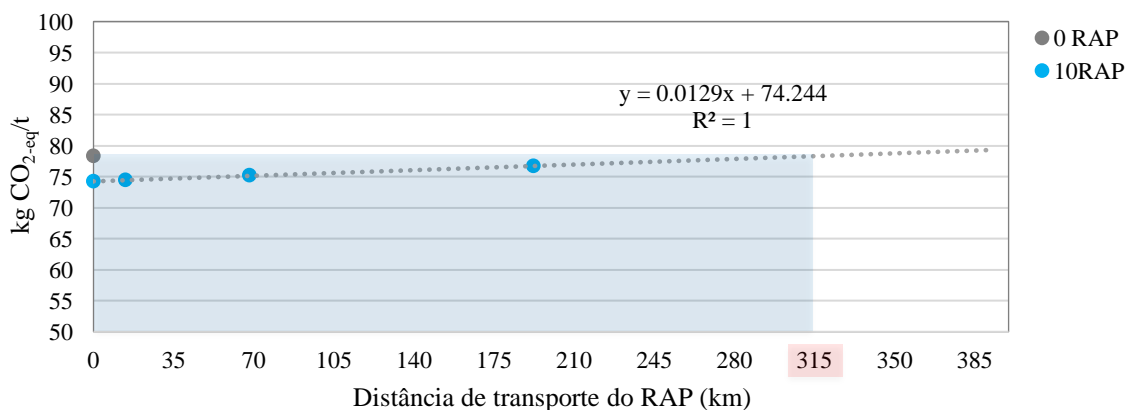
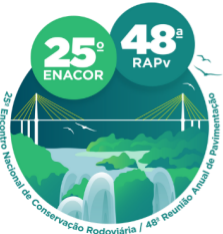


Figura 6. Análise de regressão da pegada de carbono da mistura asfáltica em relação à distância de transporte do RAP, para estimar a distância de transporte limite.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental de um estudo de caso de produção de misturas asfálticas com incorporação de 10% de material fresado (RAP). O uso de RAP na reciclagem a quente demonstrou redução da pegada de carbono da mistura, mesmo que em baixo percentual, em comparação a uma mistura convencional sem RAP.

A fase de produção da mistura tem uma considerável contribuição na pegada de carbono total, sendo uma fase estratégica para investimentos técnicos a fim de aumentar a eficiência energética e reduzir o consumo de combustíveis fósseis. A redução da demanda de ligante asfáltico, quando produzida a mistura reciclada, é um dos principais fatores para diminuição dos impactos ambientais negativos, mesmo que este corresponda a uma pequena massa da mistura asfáltica. Nesse sentido, investimentos e incentivos devem ser direcionados ao uso do RAP e aumento do seu percentual na reciclagem. Cabe salientar que a durabilidade da mistura reciclada, mesmo não fazendo parte do estudo apresentado nesse artigo, é um fator relevante no real ganho ambiental da reciclagem, não devendo ser negligenciado no momento do projeto e execução da mistura reciclada a quente.

A análise de sensibilidade de distância de transporte do material reciclado aponta a importância de contabilizar o transporte do RAP proveniente de bota-espera (e a definição dos locais de bota-espera) e demonstra que existe um limite de distância de transporte para que haja benefícios ambientais no processo de reciclagem, ao menos enquanto os veículos de transporte estiverem sendo abastecidos com combustíveis fósseis. O uso de caminhões elétricos ou abastecidos com biocombustível são alternativas em teste que apresentam bom potencial de melhoria do desempenho ambiental da mistura asfáltica e podem permitir que a reciclagem seja benéfica, mesmo em cenários com maiores distâncias de transporte.

AGRADECIMENTO

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2009a) NBR ISO 14040 - Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT (2009b) NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

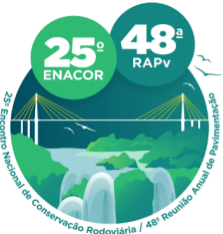
ANP (2008). Resolução N° 39/2008. Agência Nacional do Petróleo. Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/asfalto#:~:text=Resolu%C3%A7%C3%A3o%20ANP%20n%C2%BA%2039%2F2008,em%20todo%20o%20territ%C3%B3rio%20nacional.>

Asphalt Institute (2001). Superpave Mix Design: Superpave series SP-2. 3. Ed.

Aurangzeb Q, Al-Qadi IL, Ozer H, Yang R (2014). Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. Resour Conserv Recycl.

CETESB (2019). Emissões veiculares no estado de São Paulo 2019. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>

CNPE (2023). Resolução N° 3 de 20/03/2023, do Conselho Nacional De Política Energética. Brasil. Disponível em: [https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/servlet/INPDFViewer?jornal=515&pagina=2&data=29/03/2023&captchafield=firstAccess.](https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/servlet/INPDFViewer?jornal=515&pagina=2&data=29/03/2023&captchafield=firstAccess)



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



CONAMA (2022). Resolução N° 315/2002. Dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle de Emissões Veiculares-PROCONVE. Brasília – DF: Diário Oficial da União. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=265>.

IPCC (2021). In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, USA.

Lee, N., Chou, C., Chen, K (2012). Benefits in Energy Savings and CO2 reduction by using reclaimed asphalt pavement. In: Transportation Research Board 91st annual meeting.

Luzzi, F. C., Specht, L. P., Schuster, S. L., Boeira, F. D., Pereira, D. S., Almeida Júnior, P. O. B., Vitorello, T., Hirsch, F. (2021). Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.3, p.362-382.

Silva, F.B., Cleto, F.R.; Diestelkamp, E.D., Yoshida, O.S., Oliveira, L.A., Saade, M.R.M., Silva, V.G., Moraga, G.L., Passuello, A.C.B., Silva, M.G., et al. (2018). *Life Cycle Inventories of Cement, Concrete and Related Industries - Brazil*; Ecoinvent Association: Zürich, Switzerland.

Suzuki, K., Vasconcelos, K., Klinsky, L. M., Bessa, I. (2023). Evaluation of recycled asphalt mixtures with different RAP contents and the effect of recycling agent. *Road Materials and Pavement Design*, 1-13.

Tushar, Q., Santos, J., Zhang, G., Bhuiyan, M. A., Giustozzi, F. (2022). Recycling waste vehicle tyres into crumb rubber and the transition to renewable energy sources: A comprehensive life cycle assessment. *Journal of environmental management*, 323, 116289.

Vidal, R., Moliner, E., Martinez, G., Rubio, M. C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 74, p. 101-114.

West, R., Willis, J.R., Marasteanu, M. (2013). Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, Report Number NCHRP 752, Project Number 09-46.