

MELHORIA E OTIMIZAÇÃO NO TRANSPORTE TERRESTRE ATRAVÉS DA GESTÃO DE FLUXOS REVERSOS: RAP ESPUMADO NO QUESITO LOGÍSTICO

EDUARDA DE JESUS COSTA (Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo Zona Sul - Dom Paulo Evaristo Arns)

eduarda.costa01@fatec.sp.gov.br

REBECCA SILVA DOS SANTOS (Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo Zona Sul - Dom Paulo Evaristo Arns)

rebecca.santos2@fatec.sp.gov.br

Orientador

LEÔNIDAS ALVAREZ NETO (Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo Zona Sul - Dom Paulo Evaristo Arns)

leonidas.alvarez@fatec.sp.gov.br

RESUMO

O RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) com adição de espuma de asfalto representa uma inovação logística ao integrar fluxos reversos no transporte terrestre. Essa abordagem promove a reutilização de materiais fresados, reduz custos operacionais, impactos ambientais e otimiza a cadeia de suprimentos da pavimentação rodoviária. A proposta se baseia na integração da logística reversa à cadeia de suprimentos fechada promovendo a reutilização de resíduos asfálticos. O estudo evidencia que o uso do RAP espumado reduz significativamente os impactos ambientais, como a extração de recursos naturais e a emissão de gases de efeito estufa, além de proporcionar economia de custos operacionais. São abordadas diferentes técnicas de reciclagem do asfalto quente, frio e profundo e os desafios técnicos, econômicos e institucionais para sua implementação no Brasil. O trabalho também destaca os benefícios sociais, como a geração de empregos e a conscientização ambiental. A adoção de práticas sustentáveis na pavimentação, com apoio de políticas públicas e investimentos em tecnologia, demonstra o potencial do RAP espumado para transformar a infraestrutura viária em um modelo mais eficiente e comprometido com o meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Logística reversa; RAP espumado; transporte terrestre; sustentabilidade; cadeia de suprimentos.

ABSTRACT

RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) with the addition of foam represents a logistical innovation by integrating reverse flows into land transportation. This approach promotes the reuse of milled materials, reduces operating costs, environmental impacts and optimizes the road paving supply chain. The proposal is based on integrating reverse logistics into the closed supply chain, promoting the reuse of asphalt waste. The study shows that the use of foamed bitumen significantly reduces environmental impacts, such as the extraction of natural resources and greenhouse gas emissions, as well as saving operating costs. It discusses different techniques for recycling hot, cold and deep asphalt and the technical, economic and institutional challenges of implementing them in Brazil. The work also highlights the social benefits, such as job creation and environmental awareness. The adoption of sustainable practices in paving, with the support of public policies and investments in technology, demonstrates the potential of foamed bitumen to transform road infrastructure into a more efficient model that is committed to the environment.

KEYWORDS: Reverse logistics; foamed RAP; land transportation; sustainability, supply chain.

INTRODUÇÃO

Em meio à crescente discussão dos impactos ambientais causados por atividades humanas, o setor da Construção Civil voltado para infraestrutura rodoviária e manutenção de pavimentos vem buscando alternativas para uma atualização estratégica e sustentável. Neste sentido, a logística reversa surge como uma estratégia para o reaproveitamento de resíduos promovendo a economia circular e a redução de danos ambientais.

O reprocessamento de resíduos asfálticos para elaboração do *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)* em sua forma espumada tem se mostrado uma alternativa promissora na pavimentação, proporcionando benefícios tanto econômicos quanto ambientais. Processo que preconiza o reaproveitamento de resíduos oriundos da fresagem ou da demolição de pavimentos antigos (MENDES; BEZERRA; SOUZA; RIBEIRO; GUEDES, 2023), a técnica baseia-se na estabilização de camadas por betume (BSM – *Betume Stabilizer Material*), utilizando espuma de material asfáltico que, além de ter um uso reduzido de ligantes virgens, contribui para a diminuição da extração de recursos naturais e da emissão de gases de efeito estufa, tornando-se uma solução viável. (MONTEIRO, 2015)

Este artigo busca identificar e qualificar a cadeia de reaproveitamento do material fresado, destacando a logística reversa como estratégia central para modernizar sustentavelmente a cadeia de suprimentos da pavimentação. Ao mapear os fluxos de coleta, processamento e reinserção do RAP, o estudo visa otimizar a eficiência operacional e ambiental do ciclo, reforçando a viabilidade técnica e econômica da reciclagem de pavimentos. A análise dessa cadeia é essencial para superar desafios como a padronização de materiais e a escalabilidade do processo, garantindo que a economia circular se torne um padrão no setor.

Os resultados deste trabalho poderão subsidiar políticas públicas e normativas técnicas, como as do DNIT, além de orientar empresas na adoção de práticas sustentáveis. Ao integrar logística reversa, inovação tecnológica e gestão de resíduos, a pavimentação asfáltica pode reduzir sua pegada ambiental sem comprometer a qualidade das vias, alinhando desenvolvimento infraestrutural à preservação ambiental. Assim, o artigo contribui não apenas para a discussão acadêmica, mas também para a transformação prática da indústria da construção viária.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a análise da cadeia de suprimento de pavimentos recicláveis, o presente artigo baseia-se em conceitos fundamentais de logística reversa, nas medidas de promoção da sustentabilidade em cadeias de suprimento e na definição do que é a tecnologia associada ao RAP Espumado.

Conceitos de Logística Reversa

Conforme Barbosa (2025) a logística reversa tem como característica uma atividade que objetiva o retorno de resíduos do consumidor final ao ciclo de produção, promovendo uma responsabilidade e sustentabilidade ambiental. Esta cadeia envolve etapas iniciais como coleta e triagem, as etapas finais contam com transporte e o atendimento das legislações públicas para destinação final que pré estabelece responsabilidades entre fabricantes, distribuidoras, consumidores e governo.

Segundo Souza, Vasconcelos e Pereira (2006) para uma implementação eficaz do sistema logístico reverso com benefícios significativos, é necessária, além de uma visão ambiental, uma abordagem econômica e competitiva a respeito das atividades posteriores ao processo produtivo inicial, pois esta prática pode resultar em economias fundamentais, melhoria de imagens corporativas satisfação na exigência dos consumidores finais, assim influenciando

na economia circular dos resíduos que são reintegrados ao ciclo produtivo reduzindo-se a necessidade de recursos naturais e diminuindo assim porvindouros de resíduos.

Partindo da percepção temporal de retorno de produtos aos processos produtivos (pós-venda ou pós consumo), Leite (2017) explica que os canais de distribuição reversos são aqueles que buscam reaproveitamento econômico de resíduos parcial ou totalmente consumidos. Conforme figura 1, o reaproveitamento de resíduos pode ser feito por remanufatura, por manufatura reversa, reúso ou reciclagem de materiais para outras finalidades em mercado secundário (Leite, 2017).

A definição sobre o canal de distribuição pós-consumo mais adequado depende da composição do material a ser reaproveito e do esforço para tornar aquele material reaproveitável nos processos de produção. Leite (2017) afirma que a reciclabilidade de um material, ou seja, a capacidade deste material ser reaproveitado, define toda a cadeia de suprimento reversa e como ele será reutilizado nas ações humanas.

Na cadeia de suprimentos reversas, um ciclo aberto pode reaproveitar os materiais pós-consumo em diversas cadeias produtivas, sendo transformados em produtos diferentes do seu primeiro ciclo de vida — por exemplo, o uso de pneus velhos como combustível em cimenteiras. Já nas cadeias de ciclo fechado, materiais ou produtos, após seu uso, retornam à própria cadeia produtiva para serem reutilizados ou reciclados na fabricação do mesmo tipo de produto, como no caso de latinhas de alumínio estanhado ou resíduos derivados de material fresado das ruas, que é reaproveitado na produção de novos pavimentos asfálticos. Enquanto o ciclo fechado favorece a economia circular ao manter os recursos dentro do mesmo sistema produtivo, o ciclo aberto busca aproveitar os resíduos de forma sustentável, mas sem reintegrá-los à cadeia original (Leite, 2017).

Conforme Dantas et al. (2007), durante a produção e uso da mistura asfáltica, assim como ao longo de sua vida útil, os componentes passam por várias mudanças. Isso acontece devido a fatores como a exposição ao ar, calor, luz e umidade. Essas condições podem diminuir a maleabilidade do ligante, aumentando sua rigidez e tornando-o mais quebradiço com o tempo, um processo que chamamos de "envelhecimento" do ligante.

O RAP, ou pavimento asfáltico reciclado, é um material proveniente da fresagem de pavimentos antigos, após a coleta realizada com o maquinário fresadora em uma via que já possui pavimentos flexíveis antigos, os caminhões saem dos canteiros de obras até as usinas onde realiza a triagem de reciclagem do material fresado passando por peneiramento para separação por dimensionamento dos materiais granulares e classificação dos materiais e traços encontrados.

Com rotas otimizadas e reaproveitamento de materiais próximos aos locais de obra, a logística reversa reduz custos com transporte de matéria-prima virgem e descarte de resíduos, a reincorporação desse material em novas composições asfálticas tem um impacto positivo na diminuição da necessidade de recursos naturais, reduz o total de resíduos enviados a aterros e ameniza as emissões de gases de efeito estufa relacionadas à fabricação de asfalto tradicional. (MENDES; BEZERRA; SOUZA; RIBEIRO; GUEDES, 2023)

Do ponto de vista econômico, usar materiais reciclados pode ajudar a cortar custos com a compra e o transporte de insumos. De acordo com Toffolo (2015), os pavimentos feitos com esses materiais reciclados podem ter um desempenho técnico igual ou até melhor que os tradicionais, oferecendo durabilidade e exigindo menos manutenção. Essas iniciativas reforçam os três pilares da sustentabilidade: o ambiental, o social e o econômico.

Desta forma, a conceituação da reciclabilidade e do mercado em que este produto reciclado pode ser utilizado impacta na efetividade da sustentabilidade almejada pelo mercado atualmente. Na pavimentação, o RAP representa uma aplicação clara da lógica de ciclo fechado, pois o material é reintegrado ao processo para gerar o mesmo tipo de produto.

Logística reversa como estratégia para a cadeia de suprimentos rodoviária

A preservação e a manutenção eficiente das rodovias revelam-se de fundamental importância, tendo em vista o seu elevado valor econômico e patrimonial. Da mesma forma, a conservação e a manutenção adequadas das vias urbanas constituem fatores essenciais para o desenvolvimento das cidades, exigindo atenção prioritária por parte do poder público e das instituições competentes. (CASTRO, 2003)

Conforme Pasche (2016), historicamente, os órgãos responsáveis pela gestão da malha viária, tanto em âmbito nacional quanto internacional, têm recorrido à aplicação de camadas sucessivas de concreto asfáltico sobre pavimentos existentes, sejam eles compostos por concreto de cimento Portland ou concreto asfáltico. No entanto, a efetividade dessas intervenções tem sido comprometida por diversos obstáculos, entre os quais se destacam a redução de recursos orçamentários, as crises econômicas recorrentes e as deficiências técnicas e operacionais no planejamento e execução das obras de manutenção. operacionais no planejamento e execução das obras de manutenção. (IPEA, 2010)

Essas limitações têm resultado no agravamento das condições estruturais de importantes trechos rodoviários e urbanos, gerando quilômetros de pavimentos em situação crítica. Como consequência, observa-se um crescente nível de insatisfação por parte dos usuários, o que reforça a necessidade urgente de políticas públicas mais eficazes voltadas à infraestrutura viária. (SILVA, 2011).

Além disso, de acordo com Garcia, Rodgher e Florian (2021) o uso desmesurado de recursos naturais como agregados minerais e ligantes betuminosos variados de petróleo, contribuem para exorbitante produção de gases poluentes em nossa atmosfera, além da degradação ambiental em pedreiras e a retirada excessiva de túneis de petróleos em alto-mar. Outro impacto vultoso é a impermeabilização do solo, que compromete o ciclo hidrológico urbano e aumenta o risco de enchentes e erosão (Ribeiro; Coelho e Silva, 2024).

Uma alternativa tecnicamente viável para mitigar os problemas associados à degradação de pavimentos asfálticos é a adoção do método de fresagem, o qual consiste na remoção de parte da espessura da camada existente, seguida da aplicação de uma nova camada de revestimento. Essa técnica evita a sobreposição excessiva de camadas, que pode comprometer a geometria e a funcionalidade da via. Ademais, o material fresado pode ser reciclado e incorporado à nova camada asfáltica, contribuindo significativamente para a redução da exploração de jazidas minerais e, conseqüentemente, para a preservação ambiental. (DANTAS, 2007)

Certamente a logística reversa no setor da pavimentação tem se consolidado como uma estratégia eficaz para promover a economia circular. A crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado mudanças significativas na forma como os setores produtivos lidam com seus resíduos, especialmente na construção civil e rodoviária. A dependência em relação à infraestrutura rodoviária, a urgência na conservação e eficácia das superfícies de rolamento e questões ambientais derivadas da promoção da sustentabilidade no consumos de materiais na pavimentação encontram-se entre os fatores que influenciam as estratégias de conservação viária no Brasil. Conforme Ribeiro *et al*,

os setores responsáveis pela construção estão cada vez mais preocupados em atender aos critérios de desenvolvimento sustentável das comunidades e cidades. Eles buscam adotar práticas que resultem na redução do consumo de recursos naturais, na redução da produção de resíduos e na limitação das emissões de gases poluentes na atmosfera terrestre. (RIBEIRO et al, 2016, p. 7)

Um dos conceitos centrais para a abordagem estratégica da logística reversa é o de cadeia de suprimentos, que pode ser definida como a rede integrada de atividades que envolve fornecedores, operações internas, distribuidores e clientes: “A Gestão da Cadeia de Suprimentos engloba o conjunto de atividades relacionadas à extração da matéria-prima,

passando pelos processos de elaboração do produto até chegar ao consumidor final.” (Platt, 2013, p. 73). Essa cadeia inclui os fluxos de materiais, informações e recursos financeiros, desde a extração de matérias-primas até o consumidor final — e, cada vez mais, do consumidor de volta ao ciclo produtivo, por meio da logística reversa.

Segundo os conceitos de Platt (2013), a cadeia de suprimentos moderna deve integrar os fluxos de materiais, informações e recursos financeiros, desde o fornecimento de insumos até a entrega ao consumidor final. No caso do RAP, essa cadeia se expande no sentido reverso: os resíduos gerados nas obras de recapeamento são coletados, triados, moídos e reprocessados, retornando ao início do ciclo como matéria-prima secundária.

Na cadeia de suprimentos aberta, também chamada de tradicional, o processo é simples e segue um caminho direto os materiais são extraídos da natureza, transformados em produtos e levados até os consumidores. No caso das rodovias, o asfalto é produzido, aplicado nas pistas e, quando essas pistas são reformadas, o material antigo normalmente é descartado. Esse tipo de cadeia busca fechar o ciclo de vida dos produtos, reutilizando resíduos e devoluções para criar novos produtos ou recondicionados. O foco principal é produzir, transportar e entregar com eficiência e rapidez (Vasconcelos, 2021).

Com relação a cadeia de suprimentos fechada, conhecida como Closed-Loop Supply Chain (CLSC), funciona de forma diferente. Além de levar o produto até o consumidor, ela também inclui o retorno dos materiais usados para o sistema de produção. Com o RAP espumado, por exemplo, o asfalto retirado das estradas é recolhido, tratado e reutilizado com a ajuda de ligantes espumados, que ajudam a recuperar parte das suas propriedades originais. Assim, o material volta a ser útil para a mesma função, reduzindo o desperdício e o uso de novos recursos (Santibanez Gonzalez et al., 2012).

Para que essa cadeia fechada funcione bem na produção de RAP espumado, é necessário um bom planejamento. É preciso ter pontos de coleta do asfalto antigo, locais para separação e tratamento dos materiais e usinas que consigam produzir o novo asfalto reciclado com qualidade. Segundo Vasconcelos (2021), com essa estrutura bem organizada, o material reciclado pode ser tão bom quanto o novo, servindo para as mesmas aplicações sem perder desempenho

Definição tecnológica do RAP e aplicação no Brasil

A reciclagem de pavimentos constitui um processo no qual os materiais do revestimento existente são reaproveitados, geralmente sem alterações significativas em sua composição, após serem desagregados mecanicamente. Esses materiais reciclados podem ser combinados com ligantes, agentes rejuvenescedores e, quando necessário, ajustados granulometricamente, a fim de garantir a qualidade e a durabilidade do novo revestimento. (SILVA, 2011) A mistura resultante pode ser produzida no próprio local da intervenção (in situ) ou em usinas estacionárias. Durante esse processo, são adicionados novos agregados minerais, ligantes asfálticos e agentes rejuvenescedores, com o objetivo de restaurar as propriedades mecânicas e reológicas do material. (SILVA, 2011)

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), instituiu as diretrizes para o reaproveitamento desse material em obras rodoviárias federais através Norma DNIT 033/2021 (PAVIMENTOS FLEXÍVEIS - CONCRETO ASFÁLTICO REICLADO EM USINA A QUENTE), por meio da resolução de número 14, A nova diretriz define as ações que devem ser adotadas para a aplicação da camada de pavimento, utilizando a fabricação de mistura asfáltica reciclada em uma usina a quente, com base em material de pavimento asfáltico fresado ou removido, conhecido como RAP. Com essa atualização, os métodos mais recentes para a gestão do material fresado foram integrados à versão de 2005 desse documento. A avaliação final da qualidade do revestimento de concreto asfáltico reciclado (produto) precisa obedecer às orientações apresentadas na especificação de serviço

DNIT 031 – ES em vigor ou às que foram estabelecidas no projeto. (DNIT,2021)

Na cidade de São Paulo desde outubro de 2021 em seu projeto de recapeamento, em alguns pontos específicos tem adotado o RAP espumado com intuito de substituir parcialmente a brita graduada tratada com cimento (BGTC) por materiais recicláveis para se base ou sub-base de novas pavimentações, assim diminuindo a extração de recursos naturais na cidade e no estado, mas também promove a reutilização de resíduos da construção civil, alinhando-se aos princípios da economia circular e contribuindo para a conservação ambiental (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2022)

A CCR Via Costeira (2024), por exemplo, implementou um projeto de reciclagem de pavimento que utiliza o material removido da rodovia em novas restaurações, resultando em uma redução de 20% no uso de material pétreo virgem e 9% no consumo de ligante asfáltico, ambos recursos não renováveis. Além disso, o processo de reciclagem a frio, que incorpora espuma de asfalto ao RAP, permite a reutilização integral dos resíduos asfálticos, com desempenho igual ou superior ao material feito com agregados virgens.

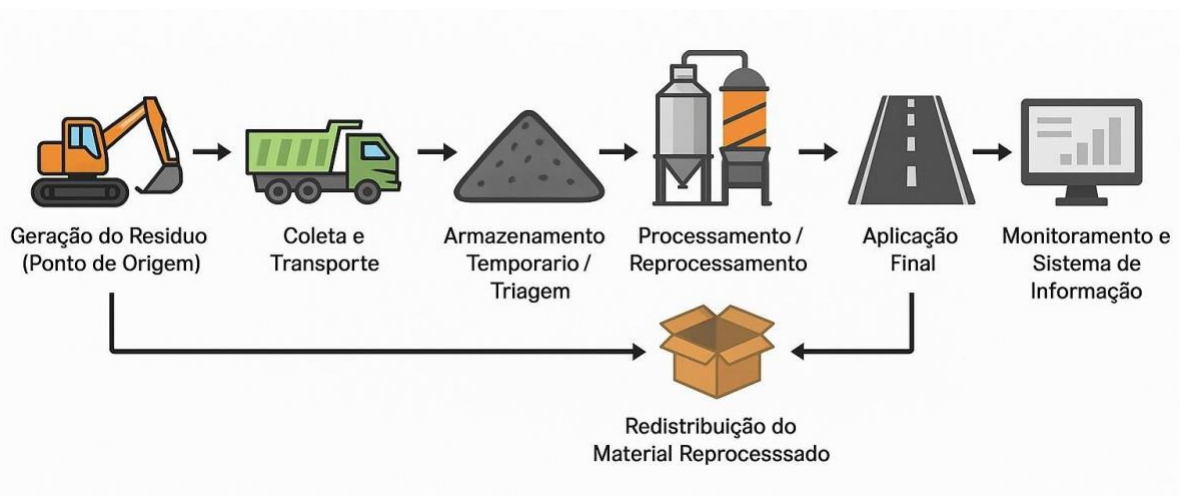
METODOLOGIA

Metodologicamente, este estudo baseou-se em uma revisão bibliográfica sistemática dos conceitos de logística reversa, cadeia de suprimentos sustentável e reciclagem de pavimentos com o objetivo de analisar a eficiência sustentável e tecnológica do reaproveitamento do material fresado. Foram consultadas fontes acadêmicas, normas técnicas e estudos de caso que abordam desde a coleta e processamento do RAP até sua reinserção na cadeia produtiva. A análise concentrou-se em ilustrar a cadeia de suprimentos do RAP, caracterizada como uma cadeia de suprimento reversa e fechada, ou seja, que reaproveita material proveniente de reciclagem para um mesmo fim, no caso, a pavimentação viária.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na pesquisa de revisão bibliográfica, é possível informar que a cadeia de suprimentos de RAP se baseia no método de reciclagem: seja ele a frio ou a quente, isso porque o método de reciclagem a quente exige a estocagem do material fresado, enquanto a reciclagem a frio reutiliza no mesmo momento a reciclagem.

Figura 1: Cadeia fechada do RAP espumado



Fonte: Elaborada pelos autores 2025

Essas iniciativas refletem os esforços para promover mudanças e encontrar soluções que melhorem nosso futuro. Segundo Bernucci et al. (2010), a reciclagem de pavimentos consiste

em reaproveitar misturas asfálticas danificadas na produção de novas misturas, utilizando os agregados e ligantes que sobraram da fresagem. Em algumas situações, é necessário adicionar agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, CAP ou EAP novos, além de aglomerantes hidráulicos. Essa nova camada é aplicada no lugar da antiga, evitando o acúmulo de camadas

Ao favorecer a reutilização de materiais já utilizados, como o Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), a logística reversa contribui para a redução da extração de recursos naturais, minimizando o impacto ambiental gerado pela obtenção de matérias-primas. Além disso, há uma significativa diminuição do volume de resíduos destinados a aterros sanitários, o que colabora para a conservação dos ecossistemas e o uso racional do solo urbano. Estudos recentes apontam que a incorporação de resíduos da construção civil, especialmente o RAP, pode reduzir a demanda por novos insumos e diminuir de forma relevante a emissão de gases de efeito estufa, reforçando o papel da pavimentação reciclada no combate às mudanças climáticas (Almeida, 2023).

A reciclagem a quente caracteriza-se pela combinação do material fresado, conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), com ligante asfáltico virgem previamente aquecido. Essa técnica permite o reaproveitamento de materiais previamente utilizados, promovendo uma alternativa sustentável na produção de novas camadas de pavimento. Estudos realizados por Suzuki (2019) apontam que a utilização de RAP em proporções de até 50% pode resultar em misturas com desempenho mecânico satisfatório, especialmente quando associadas à aplicação de agentes rejuvenescedores, que ajudam a restaurar as propriedades do ligante envelhecido.

Já a reciclagem a frio é geralmente executada in loco, sendo empregadas emulsões asfálticas ou aditivos rejuvenescedores com o objetivo de recuperar a trabalhabilidade e a coesão do RAP. De acordo com Silva (2011), a introdução de emulsões modificadas com polímeros pode contribuir significativamente para a melhoria do desempenho mecânico das misturas recicladas a frio, tornando essa técnica viável tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental.

Por sua vez, a reciclagem profunda compreende a incorporação direta do RAP à estrutura do pavimento existente, com ou sem o uso de agentes estabilizantes, como cimento Portland ou cal. Essa metodologia tem se mostrado particularmente eficaz em intervenções mais complexas, especialmente na reabilitação de pavimentos que apresentam danos estruturais severos. Ao integrar materiais reciclados diretamente à base do pavimento, a técnica promove não apenas a recuperação da estrutura, mas também a economia de recursos naturais e a redução de resíduos. (KANDHAL E MALLICK, 1997)

Figura 2: Misturas Asfálticas Recicladas a Quente



Fonte: LAPAV - laboratório de pavimentação UFRGS

Sob a perspectiva econômica, a reciclagem de resíduos asfálticos por meio da logística reversa representa uma oportunidade de redução de custos operacionais para as empresas do setor. A diminuição da necessidade de aquisição de materiais virgens, associada à redução de despesas com transporte e destinação final de resíduos, torna o processo mais eficiente e financeiramente viável. De acordo com estudos de caso citados por Pimentel e Silva (2019), o uso de agregados reciclados pode reduzir os custos em até 40% quando comparado à utilização de materiais convencionais. Tais economias podem ser reinvestidas em inovações tecnológicas, capacitação de equipes e expansão das operações, promovendo maior competitividade e sustentabilidade ao setor de engenharia.

A utilização do rap espumado (reclaimed asphalt pavement) na pavimentação tem se consolidado como uma alternativa sustentável e economicamente viável, especialmente quando se busca soluções mais responsáveis para a construção e manutenção de rodovias. Segundo Davanzo (2023), essa técnica representa uma inovação significativa ao permitir o reaproveitamento de materiais asfálticos por meio da espuma do cimento asfáltico de petróleo (cap), contribuindo diretamente para a redução do consumo de recursos naturais e a emissão de poluentes.

Apesar de seu grande potencial, a aplicação do rap espumado no Brasil ainda esbarra em diversos desafios. Em termos técnicos, a produção desse tipo de mistura exige equipamentos adequados e um conhecimento específico por parte das equipes envolvidas. A capacidade de espuma do cap, por exemplo, pode variar conforme sua origem e composição, exigindo ajustes precisos nas usinas para garantir a qualidade do produto final. Como destaca Davanzo (2023), a falta de familiaridade com essas variáveis pode comprometer o desempenho das misturas, resultando em pavimentos com menor durabilidade e desempenho insatisfatório.

Do ponto de vista econômico, embora o uso de rap espumado possa gerar economias expressivas no longo prazo, como a redução na compra de materiais virgens e menor necessidade de transporte, sua adoção inicial envolve investimentos consideráveis. Conforme observa Zubaran (2021), adaptar usinas e adquirir novas tecnologias pode representar um custo elevado, especialmente para empresas que priorizam resultados imediatos e operam com uma visão de curto prazo.

Além dos obstáculos técnicos e financeiros, existem também barreiras culturais e institucionais que dificultam a disseminação dessa tecnologia no país. A resistência à inovação, somada à falta de conhecimento sobre os benefícios do rap espumado, ainda é um fator limitante. Outro ponto importante é a ausência de regulamentações claras e diretrizes técnicas específicas, o que dificulta a padronização e gera incertezas quanto à sua aplicação em larga escala. Bernucci (2024) ressalta ainda que a escassez de dados consolidados sobre a geração e o uso do rap no Brasil contribui para essa resistência institucional, tornando mais difícil a tomada de decisões baseadas em evidências.

Diante desse cenário, é possível afirmar que a efetiva implementação do rap espumado no Brasil depende de uma série de ações integradas. É necessário investir na formação de profissionais, oferecer incentivos econômicos para empresas que adotam práticas sustentáveis e, sobretudo, desenvolver políticas públicas que incentivem a inovação e tornem a sustentabilidade um pilar central da infraestrutura viária nacional. Somente assim será possível transformar esse potencial em realidade, promovendo rodovias mais eficientes, duráveis e comprometidas com o futuro do meio ambiente e da sociedade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho, foi possível perceber que a busca por soluções sustentáveis na construção civil não se trata apenas de uma tendência passageira, mas sim de uma necessidade urgente frente aos desafios ambientais, econômicos e sociais do nosso tempo. A utilização do asfalto reciclado (RAP) se apresenta como uma alternativa concreta e viável, tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental, contribuindo significativamente para a preservação dos recursos naturais, a redução de resíduos e a eficiência dos investimentos em infraestrutura rodoviária.

Através da revisão da literatura, constatou-se que a aplicação do RAP pode oferecer benefícios expressivos, como a diminuição do consumo de ligantes novos, o reaproveitamento de materiais fresados e a melhora das características mecânicas das misturas asfálticas. Além disso, o processo de reciclagem de pavimentos, quando bem planejado e executado, é capaz de manter os níveis de desempenho exigidos pelas normas técnicas, ao mesmo tempo em que promove práticas construtivas mais responsáveis.

É importante destacar que o desenvolvimento sustentável não deve ser entendido como um obstáculo à engenharia, mas sim como um campo fértil para a inovação e o aprimoramento profissional. Cabe aos futuros engenheiros e engenheiras o compromisso ético de pensar, projetar e executar obras que atendam às demandas atuais sem comprometer as possibilidades das próximas gerações. Que este trabalho possa inspirar não apenas a continuidade de estudos sobre o tema, mas também uma mudança de postura frente ao papel da engenharia civil como agente transformador da sociedade e do meio ambiente,

Em suma, o Reclaimed Asphalt Pavement representa uma convergência entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental. Ao incorporar práticas de logística reversa e promover o ciclo fechado de materiais, o RAP fortalece a sustentabilidade da pavimentação asfáltica e exemplifica como a gestão eficiente da cadeia de suprimentos pode contribuir para um futuro mais equilibrado entre desenvolvimento e preservação dos recursos naturais (Leite, 2017).

REFERÊNCIAS

Almeida, a. W. M.; gomes, r. L. R. **A perspectiva da logística reversa na industrialização do pavimento reciclado: uma contribuição para conservação do meio ambiente. Contribuciones a la economía**, v. 21, n. 1, p. 16–26, 2023. Disponível em: <https://ojs.eumed.net/rev/index.php/contribuciones-economia/article/view/pavimento-reciclad> o. Acesso em: 10 abr. 2025.

ALMEIDA, A. W. M.; GOMES, R. L. R. **A perspectiva da logística reversa na industrialização do pavimento reciclado: uma contribuição para conservação do meio ambiente. Contribuciones a la Economía**, 2023. Disponível em: <https://ojs.eumed.net/rev/index.php/contribuciones-economia/article/view/pavimento-reciclad> o. Acesso em: 25 abril 2025.

Batista, r. S. **Reciclagem do resíduo pela fresagem do concreto asfáltico**. 2016. 3,27 mb. Monografia (especialização em construção civil) — universidade federal de minas gerais, belo horizonte, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/bubd-aguq4l>. Acesso em: 27 de março de 2025.

Bernucci, liedi b.; motta, laura m. G.; ceratti, jorge a. P.; soares, jorge b. **Pavimentação asfáltica– formação básica para engenheiros**. 3ª ed. Rio de janeiro: imprinta, 2010. – Disponível em: biblioteca jba engenharia. Acesso em: 27 de março de 2025.

BARBOSA, J. W. de Q. et al. **A logística reversa no Brasil: reflexões bibliográficas. Meio Ambiente (Brasil)**, 2025. Disponível em: <https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/503>. Acesso em: 25 abril 2025.

Costa, c.; pinto, s. **O uso de reciclagem de pavimentos como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no brasil**. Revista engenharia, são Paulo, 2011. Acesso em: 27 de março de 2025.

Davanzo lopes, a. F.; vasconcelos savasini, k.; de souza almeida, m. S.; legi bariani bernucci, l. G. **Geração e utilização do rap no brasil**. Revista eninfra, v. 3, n. 3, p. 201–217, 2024. Disponível em: <https://revistaeninfra.dnit.gov.br/index.php/inicio/article/view/126>. Acesso em: 10 de março de 2025.

Departamento nacional de infraestrutura de transportes (dnit). **Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico reciclado em usina a quente – especificação de serviço** disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/cole-tanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_434_2021_me.pdf acesso em 31 de março de 2025

Departamento nacional de infraestrutura de transportes. **Reciclagem de material asfáltico reduz custos e impactos ambientais**. Revista caminhoneiro, 12 jul. 2021. Disponível em: <https://www.revistacaminhoneiro.com.br/reciclagem-de-material-asfaltico-reduz-custos-e-impactos-ambientais>.> acesso em 31 de março de 2025

Filho, unger. **Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado**. Dissertação de mestrado. Escola politécnica. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/d.3.2019.tde-25032019-102457>. Acesso em 05 de abril de 2025.

Garcia, e. B. Da s., rodgher, s. F., & florian, f. (2021). **Pavimentação permeável: mitigação de impactos ambientais e melhorias na qualidade de vida urbana**. Recima21 - revista científica multidisciplinar, 5(1). Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v5i1.6063>. Acesso em 31 de março de 2025

Ipea; departamentonacionaldetrânsito(denatran). **Brasil em desenvolvimento: estado, planejamento e políticas públicas: relatório executivo**. Brasília, dez. 2010. Acesso em 31 de março de 2025

LAPAV - laboratório de pavimentação UFRGS. **Figura 1: Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Publicado em: Facebook, 1 de abril de 2020. Disponível em: <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=3094571353928022&id=764872176897963&set=a.765803210138193>. Acesso em: 25 maio 2025.

Leite, p. R. Logística Reversa: **Meio ambiente e competitividade**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2017.

Kandhal, p. S.; mallick, r. B. **Fhwa pavement recycling guidelines for state and local governments. Federal highway administration**, u. S. Department of transportation. Fhwa-sa-98-042. Washington, 1997 acesso em 05 de abril de 2025.

Melo, a. L. R.; ferreira, m. L.; rodrigues, r. D. C. **Utilização de resíduos da construção civil na pavimentação: uma revisão sistemática**. Engineering sciences, v. 9, n. 1, p. 102-113, mar. 2021. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/354602201_utilizacao_de_residuos_da_construcao_civil_na_pavimentacao_uma_revisao_sistematica> acesso em: 14 abril de 2025.

Mendes, l. P. T.; bezerra, a. L. R.; souza, m. C. R.; ribeiro, l. S.; guedes, l. R. **Economia circular como mecanismo de gestão ambiental: utilização de rap em camadas de revestimento asfáltico**. Revista brasileira de gestão ambiental e sustentabilidade, v. 10, n. 24, p. 151-169, 2023. Disponível em: <<https://revista.ecogestaobrasil.net/>>. Acesso em 31 de março de 2025

Pasche, e. Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado asfáltico e pó-de-pedra com a adição de cimento. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – ufrgs– universidade federal do rio grande do Sul, porto alegre, 2016. Acesso em: 10 de abril de 2025.

Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros / liedi bariani bernucci... [et al.]. – rio de janeiro: petrobras: abeda, 2006. Disponível em: biblioteca jba engenharia. Acesso em: 10 de abril de 2025.

Pimentel, m. S.; silva, a. M. G. Da. **Logística reversa na construção civil: um estudo de caso sobre o gerenciamento dos resíduos de construção civil e sua reintegração na cadeia de valor**. Revista refas, v. 6, n. 2, p. 19–36, 2019. Disponível em: <https://www.revistarefas.com.br/index.php/revfateczs/article/view/356>. Acesso em: 10 abr. 2025.

Platt, a. A. **Logística e Cadeia de Suprimentos**. 2. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

Prefeitura de são paulo. **Recapeamento ganha novos trechos e avança na capital paulista**. Disponível em: <<https://capital.sp.gov.br/w/noticia/recapamento-ganha-novos-trechos-e-avanca-na-capital-paulista>>. Acesso em 31 de março de 2025

Ribeiro, m. A.; cruz, m. B. D.; monteiro, i. P. C. **O desafio da sustentabilidade na construção civil: aspectos legais e jurisprudenciais**. Revista do ceds (revista científica do centro de estudos em desenvolvimento sustentável da undb) número 5 volume 1– ago/dez 2016 periodicidade semestral. Acesso em 31 de março de 2025

Santos, carolina lima dos. **Estudo de projeto da reabilitação de pavimento de trecho da rodovia rsc-453 com a técnica da reciclagem com cimento**. 2015. Trabalho de conclusão de curso – universidade federal do rio grande do sul, porto alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/127685>. Acesso em: 10 abr. 2025.

Silva, j. S. Da, & pimentel, m. G. R. F. (2021). **Uso de resíduos na pavimentação rodoviária**. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/355932682_uso_de_residuos_na_pavimentacao_rodoviaria. Acesso em 05 de abril de 2025.

Silva, m. H. S.; marchesini, m. M. P. **Logística reversa para a destinação ambientalmente sustentável dos resíduos de construção e demolição (rcd)**. Revista metropolitana de sustentabilidade, v. 7, n. 1, p. 1–15, 2020. Disponível em:

<https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/1359>. Acesso em: 10 abr. 2025.

Santibanez Gonzalez, Ernesto Del R. Et Al. **Modelos de otimização para resolver o problema de projeto de cadeia de suprimentos reversa**. Anais Do Spolm – Simpósio de pesquisa operacional e logística da marinha, 2012. Disponível Em: https://Www.Researchgate.Net/Profile/Marcone-Souza-2/Publication/236259931_modelos_d_e_otimizacao_para_resolver_o_problema_de_projeto_de_cadeia_de_suprimentos_reversa/Links/5cd21ff5299bf14d957e74cc/Modelos-De-Otimizacao-Para-Resolver-O-Problema-De-Projeto-De-Cadeia-De-Suprimentos-Reversa.Pdf. Acesso em 12 de maio de 2025.

Souza, R. G.; Vasconcelos, F. C.; Pereira, C. R. **Logística Reversa De Latas De Alumínio: Um Estudo De Caso**. *Gestão & Produção*, V. 13, N. 1, P. 61-72, 2006.

Suzuki, karina yuriko. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. Dissertação (mestrado em engenharia de transportes) – universidade de são paulo, são paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21082019-141957/pt-br.php>. Acesso em 05 de abril de 2025.

Toffolo, r. V. M. **Pavimentos sustentáveis**. **Dissertação** (mestrado em engenharia civil) – universidade federal de ouro preto, 2015. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/5293> acesso em 05 de abril de 2025.

Vasconcelos, Jéssica Diogo de. **Projeto de rede de cadeia de suprimentos multiproduto, capacitada e em circuito fechado**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2021. Disponível em:

https://sig-arquivos.cefetmg.br/arquivos/2022015219e4d939577430cf8ad63904f/Dissertacao_J_ssicajunho2021_ficha_folha_aprovao.pdf. Acesso em 12 de maio de 2025.

Zubaran, m. **As vantagens do reaproveitamento**. Revista mt. Disponível em: <https://revistamt.com.br/materias/exibir/as-vantagens-do-reaproveitamento>. Acesso em: 10 mar. 2025.

"Os conteúdos expressos no trabalho, bem como sua revisão ortográfica e adequação às normas ABNT são de inteira responsabilidade dos autores."

«Declaração de IA generativa e tecnologias assistidas por IA no processo de redação»

“Declara-se pelos autores que durante a preparação deste trabalho foram utilizados Google Acadêmico para pesquisas. Após utilizar esta ferramenta/serviço, os autores editaram e revisaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo da publicação.”