

Economia circular como mecanismo de gestão ambiental: utilização de RAP em camadas de revestimento asfáltico

Lara Pereira Tavares Mendes*, Ana Leticia Ramos Bezerra, Milena Cristina Rocha de Souza, Libânia da Silva Ribeiro e Leonardo Rodrigues Guedes

Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Av. Aprígio Veloso, 882. Campina Grande-PB, Brasil (CEP 58429-900). *E-mail: lara.ptpereira@gmail.com.

Resumo. Com a crescente preocupação relacionada aos impactos ambientais causados pelas atividades do setor de infraestrutura de transportes, tem-se buscado soluções para a reutilização dos resíduos gerados pelo fim da vida útil dos pavimentos. O presente artigo tem como proposta abordar o conceito de economia circular como mecanismo da gestão ambiental incorporado na indústria da pavimentação. Foi analisado o potencial de incorporação do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) na produção de novas misturas asfálticas. Como abordagem metodológica foi utilizada uma revisão sistemática de literatura que utilizou critérios de inclusão e exclusão para seleção dos trabalhos a fins da questão de pesquisa. A partir da análise dos trabalhos selecionados constatou-se que o emprego do RAP em misturas asfálticas é capaz de oferecer benefícios ambientais, como também bom desempenho mecânico.

Palavras-chave: Resíduos asfálticos; Reciclagem de pavimentos; Índice de Circularidade do Material.

Abstract. *Circular economy as an environmental management mechanism: Use of RAP in asphalt coating layers.* With the growing concern related to the environmental impacts caused by the activities of the transportation infrastructure sector, solutions have been sought for the reuse of the waste generated by the end of the useful life of pavement. This article aims to address the concept of circular economy as a mechanism for environmental management incorporated into the paving industry. The potential for incorporating Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the production of new asphalt mixtures was analyzed. The methodological approach used was a systematic literature review that used inclusion and exclusion criteria for the selection of works address the research question. From the analysis of the

Recebido
22/03/2023

Aceito
28/04/2023

Publicado
30/04/2023



Acesso aberto



ORCID

0009-0006-8311-1225
Lara Pereira Tavares
Mendes

0000-0003-1064-2720
Ana Leticia Ramos
Bezerra

0009-0000-6050-3812
Milena Cristina Rocha
de Souza

selected papers it was found that the use of RAP in asphalt mixtures is able to offer environmental benefits, as well as good mechanical performance.

Keywords: Asphalt waste; Pavement recycling; Material Circularity Index.

0000-0002-0236-6386
Libânia da Silva
Ribeiro

0000-0002-6739-4919
Leonardo Rodrigues
Guedes

Introdução

As discussões sobre a conservação dos recursos naturais é algo que vem sendo abordado em virtude dos alertas gerados pela Conferência de Estocolmo de 1972 e de uma série de reuniões que ocorreram após, como a Eco-92 (1992), Rio+10 (2002) e a Rio+20 (2012) (Bilar et al., 2019). Essas reuniões promoveram debates a respeito da gestão ambiental e dos seus benefícios sobre a manutenção da qualidade de vida e dos recursos naturais.

De maneira geral, a gestão ambiental pode ser entendida como um mecanismo que visa planejar, gerenciar e executar ações que promovam o desenvolvimento socioeconômico de maneira equilibrada com a natureza. De acordo com Assunção (2019) é inevitável não relacionar gestão ambiental com responsabilidade social, uma vez que, para desenvolver a gestão ambiental é preciso que a sociedade tome consciência do impacto que suas ações têm sobre o meio ambiente. Como exemplos de ações antrópicas que são nocivas à natureza, Bilar et al. (2019) comentam que as empresas possuem um impacto relevante, seja tanto na captação descontrolada da matéria-prima, quanto na quantidade de resíduos gerados no processo de operação e descarte final dos produtos. Neste sentido, fazem-se necessárias reflexões a respeito do conceito de economia circular (EC), partindo de uma visão linear da cadeia produtiva para uma abordagem circular, mantendo os recursos em uso produtivo pelo maior tempo possível e assim, proporcionando maior vantagem competitiva para as empresas.

No Brasil, esse conceito de economia circular veio ganhando destaque nas discussões empresariais devido à publicação da Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta lei objetiva promover a gestão integrada dos resíduos com a adoção de tecnologias e práticas sustentáveis na produção e consumo dos bens naturais. A partir dela e com o aumento do número de fiscalizações, o mercado passou a repensar seu processo produtivo e adotar mecanismos mais sustentáveis, como é o caso, por exemplo, do reaproveitamento dos resíduos.

Diferente da economia linear que se configura como um modelo em que os recursos naturais são utilizados sem haver uma preocupação com o seu descarte final e no qual o seu ciclo consiste basicamente em extrair, produzir, consumir e descartar, a economia circular surge como uma alternativa de revolução do processo produtivo. Assim, de acordo com Assunção (2019), esse novo modelo representa uma forma restaurativa e regenerativa de valorizar todos os elementos inerentes aos processos produtivos, mantendo seu alto nível de utilidade e valor durante todo o seu tempo de vida.

Na esfera ambiental, esse modelo surge como um mecanismo que busca potencializar a redução da geração de resíduos e extração de recursos naturais no âmbito da Construção, por meio do emprego de um circuito fechado que visa a extrair o valor máximo dos materiais (Benachio, 2020). Além desses benefícios, Melo Neto et al. (2022) comentam que na pavimentação esse mecanismo de reaproveitamento e a utilização do *Recycled Asphalt Pavement* (RAP) na construção de novas rodovias acabam reduzindo os custos de produção e tornando-se uma alternativa atrativa para o alcance da sustentabilidade nesse setor.

Tendo isso em vista, o presente trabalho visa a abordar o conceito de economia circular como mecanismo da gestão ambiental incorporado na indústria da pavimentação, setor esse, responsável pelo consumo de, aproximadamente, 30% dos recursos naturais e geração de 25% dos resíduos sólidos oriundos da indústria da construção (Benachio, 2020). Com isso, será analisado o potencial de incorporação do RAP, que corresponde ao material fresado do revestimento, na produção de novas misturas asfálticas. A reutilização desse material promove, além da redução dos resíduos descartados, uma menor utilização dos materiais virgens e, portanto, minimização da extração de matérias primas.

Referencial teórico

Economia circular como mecanismo de gestão ambiental

Com a mudança do cenário socioeconômico durante o século XVIII, resultante da Revolução Industrial, sucedeu-se uma transformação na interação entre o homem e a natureza, a qual se constituiu como uma relação desequilibrada de extração dos recursos por interesses econômicos. Essa mudança foi acompanhada pelo desenvolvimento de novas cidades e crescimento populacional, o que acarretou em um consumo considerável dos produtos industriais, emissões de poluentes e geração de resíduos (Santos et al., 2019). Ainda nessa perspectiva, tem-se que os problemas ambientais são consequências de três atores associados entre si: crescimento populacional, aumento pela demanda de recursos e a alta geração de resíduos, os quais impactam negativamente o meio, tornando necessária a adoção de soluções que venham a mitigar esses impactos gerados e, assim, garantir um desenvolvimento sustentável (Braga et al., 2005; Barboza et al., 2019). Diante desse contexto, a presente pesquisa destaca a necessidade do emprego de alternativas que reduzam o quantitativo de material descartado por meio da gestão desses resíduos.

Em vista disso, foi proposta uma abordagem que considera o circuito fechado de recursos, o qual tem como foco o reaproveitamento dos materiais no processo produtivo, caracterizando assim uma economia que viria a ser chamada circular. Conforme a Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2017), o objetivo da economia circular (EC) consiste em manter em alto nível todos os insumos de um processo produtivo e desvincular o desenvolvimento econômico do consumo finito dos recursos. Stival et al. (2020) também define EC como sendo um modelo oposto à tradicional economia linear, o qual seu processo não dá destaque a durabilidade dos insumos e consiste basicamente em extrair, transformar e descartar.

No Brasil, assim como foi mencionado anteriormente, as primeiras abordagens a respeito da EC iniciaram-se com a Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010). A criação de legislações que regulamente esse manejo dos resíduos permite a cooperação entre os órgãos públicos, o setor privado e a sociedade civil no desenvolvimento de práticas mais sustentáveis (Assunção, 2019). De acordo com a EMF (2017, p. 10), “o Brasil é um cenário atraente para a exploração de oportunidades que a EC poderia trazer para a construção do capital econômico, social e natural”. Sendo assim, reutilizar nos processos produtivos materiais que iriam ser descartados pode ser uma solução interessante para o desenvolvimento socioambiental do país, ao modo que promovem redução dos custos de material, do consumo energético e do impacto ambiental relacionado ao destino final.

Na construção civil, esse processo de revalorizar os Resíduos da Construção e Demolição (RCD) é uma prática que já está sendo bastante difundida nas empresas e no meio acadêmico, como por exemplo, é o caso do reaproveitamento desse material para a produção de argamassas, concretos e na construção de rodovias. Conforme a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), para o ano de 2021 foram coletados um total de 48 milhões de toneladas de RCD, representando um aumento de 2,9% se comparado ao ano de 2020. Com base nesse quantitativo gerado pelo setor da construção e sabendo que a tendência é que esse número aumente a cada

ano, fica evidente a complexidade de se falar no Brasil de desenvolvimento sustentável sem que este ramo adote práticas sustentáveis (Brasileiro e Matos, 2015).

Ao considerar a implementação de um fluxo circular, as iniciativas e processos devem ser examinados minuciosamente, para que a contribuição à sustentabilidade não seja um processo conflitante, isto é, para utilizar um determinado resíduo na produção de um novo material não devem ser gerados custos ambientais superiores ao descarte desse material (Korhonen et al., 2018). Algumas dessas iniciativas no setor da construção civil foram citadas acima, para o trabalho em questão será considerado o modal rodoviário e, nesse sentido, tem-se a utilização do material fresado (RAP) na produção de novas misturas. Quanto a isso, empresas como Tarpaper Recycling e Super Asphalt já propuseram e implementaram misturas com 100% de materiais reciclados, apesar da ausência de diretrizes mais circulares (Mantalovas e Di Mino, 2019).

Em relação à circularidade das misturas, Mantalovas e Di Mino (2019) trazem a necessidade de quantificar essa iniciativa relacionada à economia circular e estabelecer o impacto dessa utilização no meio ambiente. Para isso, em seu estudo estabeleceram um método de cálculo, o Índice de Circularidade (ICM), metodologia desenvolvida pela EMF (2017) e adaptada por ela para as misturas asfálticas. Esse índice é capaz de fornecer um rótulo de produto final que caracteriza o próprio produto. Nesse sentido, os autores destacam que a implementação dessa metodologia pode levar a uma maior conscientização das partes interessadas (como é o caso das autoridades rodoviárias e empresas de pavimentação) sobre o nível de circularidade de seus negócios e, assim, essa ferramenta pode se constituir como um método de identificação de pontos críticos para que os tomadores de decisão envolvidos avaliem seus processos e produtos, determinem o grau de sustentabilidade ambiental de suas práticas e realizem escolhas circulares.

Misturas asfálticas recicladas

A crescente preocupação com a geração de impactos ambientais e com um destino adequado para a expressiva quantidade de resíduos, provenientes da construção civil, configuram um cenário de incentivo a utilização desses resíduos como materiais alternativos em diversas áreas da construção. Assim, o uso de agregados reciclados que apresentem bom desempenho na aplicação em misturas asfálticas para camadas de revestimento de pavimentos pode ser uma alternativa para destinação desses e melhoria da qualidade dos pavimentos.

O *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) é o material fresado de revestimentos asfálticos. Sua utilização se dá na produção de misturas asfálticas e camadas granulares recicladas de pavimentos rodoviários (Rocha Segundo et al., 2016; Gaspar et al., 2020; Unger Filho et al., 2020). A fresagem consiste em uma operação pela qual é realizado o corte parcial ou total do revestimento asfáltico em um trecho de via, por meio da utilização de equipamentos específicos (Bernucci et al., 2010).

Nas misturas recicladas, os principais elementos empregados são agregados fresados, estes materiais apresentam-se envoltos por ligante asfáltico oxidado, podendo ser utilizados adicionados de material virgem, em diversos teores ou até de maneira total, sem adições (Melo Neto, 2022). Bernucci et al. (2010) mostram que a reciclagem de pavimentos é o processo de reutilização de misturas asfálticas danificadas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes provenientes da fresagem, que pode ser acrescido de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) ou Emulsões Asfálticas de Petróleo (EAP) novos, além de adição de aglomerantes hidráulicos.

O ciclo de vida de pavimentos diz respeito às principais atividades no decorrer da sua vida útil, que vão desde a aquisição de materiais, construção, utilização e manutenção até a destinação final (Aurangzeb et al., 2014). Geralmente, os materiais de pavimentação removidos são depositados em aterros, o que gera preocupações ambientais (Saride et al.,

2015). A operação de fresagem do revestimento asfáltico pode ser seguida de reinserção dos resíduos gerados no processo de produção de novas misturas asfálticas. A reciclagem da camada de revestimento asfáltico ocorre ao adicionar o RAP à mistura asfáltica nova, de modo que o material fresado reciclado, os agregados e o ligante virgem ofereçam desempenho semelhante ao emprego original (Melo Neto, 2022).

Nesse contexto, os benefícios ambientais que podem ser obtidos com o emprego do material fresado de pavimentos em misturas asfálticas, são evidenciados em Aurangzeb et al. (2014), nesse trabalho os autores concluíram que a utilização do RAP pode diminuir de forma significativa as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e o consumo de energia. Lee et al. (2012) chegaram à conclusão de que misturas asfálticas de 30% de RAP são responsáveis por emitir 80% de dióxido de carbono e requerem 84% de energia quando comparado às misturas produzidas de forma convencional, sem emprego de material reciclado. No estudo realizado por Vidal et al. (2013), a incorporação de 15% de material RAP levou a uma diminuição de impactos: nas mudanças climáticas em 13% e no esgotamento de fontes fósseis em 14%.

A tecnologia de reciclagem de pavimentos vem atraindo atenção, cada vez mais, pois se mostra vantajosa para diminuição do consumo de asfalto e agregados novos, proporcionando sustentabilidade ambiental e benefícios econômicos (Wang et al., 2020a,b). Assim, com o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem e devido à expressiva quantidade de RAP gerada, há uma demanda por aumento do teor de RAP a ser empregado em misturas asfálticas recicladas (Wang et al., 2020b).

Metodologia

Como abordagem metodológica foi utilizado uma revisão sistemática de literatura. Segundo Galvão e Ricarte (2019), uma revisão sistemática consiste em definir procedimentos lógicos na busca e seleção dos materiais que irão compor a pesquisa. Trata-se de uma busca criteriosa, que visa fazer uma seleção, avaliação e sintetização das informações mais relevantes disponíveis sobre um determinado assunto (Galvão e Pereira, 2014). As fases para o desenvolvimento da pesquisa são apresentadas na Figura 1.

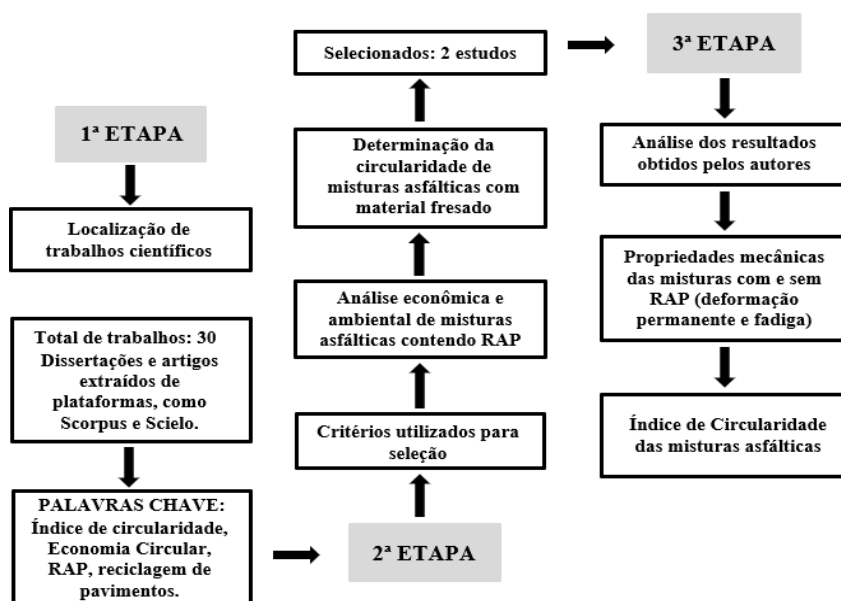


Figura 1. Fases adotadas para o desenvolvimento da pesquisa.

Então, conforme a primeira etapa, para a realização dessa revisão foram utilizados a base de dados da Scopus, Scielo e o Google Acadêmico. As palavras-chave utilizadas foram: “índice de circularidade”, “economia circular”, “material fresado” e “reciclagem de pavimentos”. Foram selecionados para a pesquisa, artigos de revistas nacionais e internacionais, dissertações e teses com filtro temporal de publicação a partir de 2018 (últimos cinco anos).

A triagem dos materiais encontrados foi feita com base no título e nos resumos de cada trabalho. Nessa seleção optou-se por salvar apenas as pesquisas que mais se aproximavam do tema do artigo, levando em consideração os critérios de inclusão e exclusão conforme mostra a Tabela 1. Em sequência foi escolhido os materiais que iriam compor efetivamente a estrutura da pesquisa. Para isso foram lidos na íntegra todos os materiais selecionados pela triagem, no qual foi escolhido aqueles que mais se aproximavam da resposta da pergunta da pesquisa, ou seja, os que mais se adequavam ao tema.

Tabela 1. Critérios de inclusão e exclusão.

Critérios de inclusão dos trabalhos analisados	Pesquisas desenvolvidas depois de 2018; Pesquisas sobre gestão ambiental e pavimentos asfálticos; Pesquisas que aplicam misturas asfálticas a quente; Pesquisas que aplicam o RAP; Pesquisas que abordam o Índice de Circularidade aplicado à pavimentação.
Critérios de exclusão dos trabalhos analisados	Pesquisas desenvolvidas anteriormente a 2018; Pesquisas que avaliam o desempenho do RAP com outras substâncias, como é o caso de algum agente rejuvenescedor.

A respeito da segunda etapa do estudo, foram selecionados os trabalhos a serem analisados quanto aos resultados e, assim, foram escolhidos aqueles que estabeleceram o potencial de circularidade do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) de misturas asfálticas a quente com material fresado e sem utilização de agente rejuvenescedor (AR). Dessa forma, foram selecionados os seguintes estudos (Tabela 2).

Tabela 2. Pesquisas selecionadas para análise da incorporação de RAP em novas misturas asfálticas.

Autoria	Título
Mantalovas e Di Mino (2020)	Integrating circularity in the sustainability assessment of asphalt mixture
Melo Neto (2022)	Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja

Foram encontrados apenas dois estudos que englobam as características pré-estabelecidas e relatadas acima, em que estabeleceram a circularidade da mistura com

base na metodologia de Índice de Circularidade do Material (ICM), apresentada por Mantalovas e Di Mino (2019) com aplicação para misturas asfálticas.

Para a determinação do Índice de Circularidade, metodologia desenvolvida pela EMF (2013), a qual conforme Melo Neto (2022) pode ser empregada para estabelecer a valoração ambiental da utilização de RAP, deve ser considerado o seguinte fluxo (Figura 2).

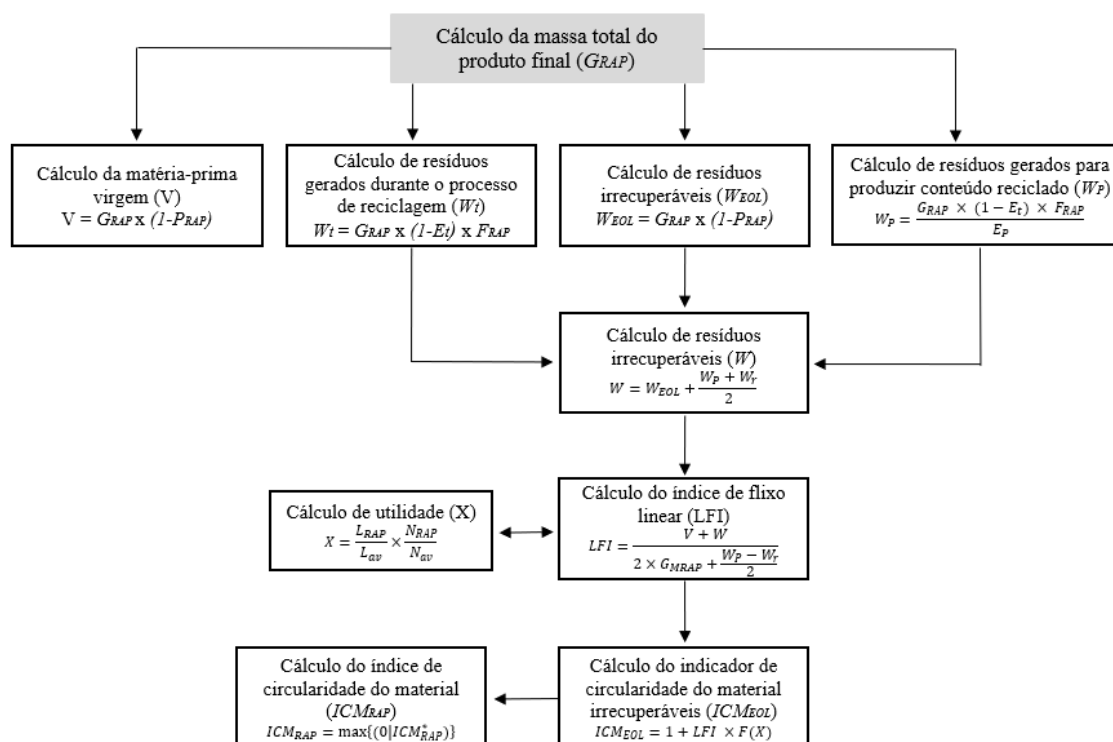


Figura 2. Definição do fluxo de cálculo dos parâmetros do ICM. Fonte: Adaptado de Mantalovas e Di Mino (2019).

Sendo:

LRAP, é a vida útil média real do produto;

LAV, é a vida útil média real de um produto médio da indústria;

NRAP, é o número de ciclos de carregamento antes da falha em termos de fadiga;

NAV, é o número equivalente de ciclos de carregamento de um produto médio da indústria de um tipo semelhante;

PRAP, é a fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas;

FRAP, é a fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida;

F(X), é o fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas;

ET, é a eficiência do processo de reciclagem como tratamento;

EP, é a eficiência do processo de reciclagem como produção;

ICMRAP, é o índice de circularidade de RAP.

Vale destacar que, para a determinação do Fator de Utilidade (X), são necessários os resultados de resistência à fadiga e deformação permanente obtidos em testes laboratoriais. Com relação a isso, Mantalovas e Di Mino (2020) trazem que para um maior

valor desse fator é preferível que, em relação à resistência à fadiga, para um mesmo valor de microdeformação se consiga uma maior quantidade de ciclos de carregamento, e em termos de deformação permanente, uma menor profundidade de sulco para a mesma quantidade de ciclos de carregamento. Nesse sentido, passando a quantificar o ICM em nível de produção das misturas com RAP, o Fator de Utilidade passa a ser calculado conforme as Equações 1 e 2.

$$P_F = \frac{F}{F_{av}} \quad \text{Equação 1}$$

$$P_{PD} = \frac{1}{\frac{PD}{PD_{av}}} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

F o número médio de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga;

Fav, o tempo de vida média real de uma mistura de uma mistura asfáltica média da indústria (mistura referência, sem RAP);

PD, número médio de ciclos de carregamento antes de atingir um valor de profundidade de sulco específico;

PDav, o número equivalente de ciclos de carregamento de uma mistura asfáltica média da indústria antes de atingir antes de atingir o mesmo valor de profundidade do sulco.

Determinados esses componentes, o fator é calculado com base na Equação 3.

$$X = \prod_{i=1}^n [P_i] \quad \text{Equação 3}$$

Sendo, portanto, equivalente ao produto dos desempenhos quantificados.

Obtido o valor de Fator de Utilidade (X), com base nos resultados apresentados, calcula-se o Índice de Circularidade do Material (ICM) referente à composição de cada mistura asfáltica produzida.

Resultados e discussão

Visando a contribuir com os estudos acerca da utilização do RAP como matéria-prima para a produção de novas misturas sob a perspectiva da economia circular, serão abordados neste item os resultados experimentais apresentados por outros autores quanto às propriedades mecânicas das diferentes composições de misturas asfálticas com material fresado por eles produzidas (deformação permanente e fadiga) e quanto ao Índice de Circularidade de suas misturas, o qual é desenvolvido considerando os ciclos técnicos e a mistura com RAP é avaliada considerando a recirculação do material fresado no processo de construção de revestimentos asfálticos por meio da reciclagem, configurando-se, dessa maneira, como uma ferramenta de análise ambiental, determinando a circularidade das misturas, conforme apresentado na pesquisa de Melo Neto et al. (2022). Quanto a isso, serão apresentados neste tópico os resultados dos estudos de Mantalovas e Di Mino (2020) e Melo Neto et al. (2022).

Caracterização dos estudos

No que diz respeito a Mantalovas e Di Mino (2020), eles apresentaram como objetivo desenvolver um indicador de sustentabilidade ambiental e circularidade para investigar os potenciais efeitos que o aumento da circularidade pode proporcionar no âmbito da sustentabilidade das misturas asfálticas. Para isso, realizaram uma abordagem combinada que incluiu a análise de ciclo de vida, de modo a estabelecer os impactos ambientais do ciclo de vida das misturas asfálticas, e os níveis de circularidade. Para estabelecer o ICM, neste estudo foram produzidas quatro misturas com diferentes quantitativos de RAP e os impactos ambientais foram estabelecidos considerando uma modelação de ciclo de vida do “berço ao portão” - extração de matérias-primas, transporte até a usina e produção. Quanto à apresentação dos resultados de Mantalovas e Di Mino (2020), nesta pesquisa serão relatados apenas os níveis de circularidade das misturas, uma vez que o foco da mesma é apresentar o ICM como uma ferramenta de gestão ambiental - auxiliando os tomadores de decisões a incorporar alternativas mais circulares as suas atividades.

Dessa forma, Mantalovas e Di Mino (2020) produziram as seguintes misturas, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Misturas asfálticas produzidas no estudo de Mantalovas e Di Mino (2020).

Misturas asfálticas produzidas
Misturas Referência (sem RAP)
Mistura com 30 % de RAP
Mistura com 60 % de RAP
Mistura com 90 % de RAP

Fonte: Mantalovas e Di Mino (2020).

As quais apresentaram a seguinte composição - a ser visualizada na Tabela 4.

Tabela 4. Composição das misturas asfálticas.

Mistura	0% RAP	30% RAP	60% RAP	90% RAP
	Mistura asfáltica para camadas de desgaste, faixa granulométrica Tipo A, seguindo as especificações ANAS			
Agregados grosseiros (kg)	505,5	399,69	238,4	88,5
Agregados finos (kg)	368,1	223,40	95,8	-
Filler (kg)	65,4	36,40	38,5	-
Ligante virgem (kg)	61,0	40,51	27,3	11,5
RAP (kg)	0,0	300,00	600,0	900,0

Fonte: Adaptado de Mantalovas e Di Mino (2020).

Quanto a Melo Neto (2022), em sua dissertação, objetivou realizar uma avaliação mecânica, econômica e ambiental quanto à circularidade das misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja. Sendo esse ácido analisado como possível agente rejuvenecedor, nesse caso, apesar de um dos critérios de exclusão da pesquisa ser a utilização de AR, em seu estudo, o autor produziu uma composição de mistura asfáltica de

referência e uma com RAP sem AR. Portanto, essas misturas serão apresentadas nos resultados desta pesquisa.

Ainda segundo Melo Neto (2022), a aplicação de elevados percentuais de RAP, com base na literatura, depende da sua suscetibilidade a falhas sob baixas temperaturas e do dano por fadiga. Assim, a adição de agentes rejuvenescedores surge como possível material restaurador de parte das propriedades envelhecidas do ligante recuperado. Dessa forma, realiza a caracterização do ligante, análise mecânica das misturas, análise de circularidade e, por fim, o estudo comparativo analisando o custo de produção das diferentes misturas asfálticas produzidas. Ademais, foram produzidas as misturas informadas na Tabela 5.

Tabela 5. Misturas asfálticas produzidas no estudo de Melo Neto (2022).

Misturas asfálticas produzidas
Misturas Referência (sem RAP)
Mistura com 40 % de RAP
Mistura com 40 % de RAP e 3 % de modificador
Mistura com 40 % e 5 % de modificador

As misturas asfálticas produzidas por Melo Neto (2022) apresentaram as proporções de materiais mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Proporções dos materiais empregados nas diferentes composições de misturas asfálticas.

Mistura	0% RAP	30% RAP
	Percentuais dos materiais utilizados (%)	
Brita 19,9 mm (%)	15	15
Brita 12,5 mm (%)	27	18
Pó de pedra (%)	51	25
Areia (%)	5	1
Cal (%)	2	1
RAP (%)	-	40

Fonte: Adaptado de Melo Neto (2022).

Como as misturas com AR são irrelevantes para essa pesquisa, os resultados mecânicos por elas apresentados não serão relatados e discutidos nesta revisão.

Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

As propriedades mecânicas que serão apresentadas neste tópico correspondem à deformação permanente e fadiga - que servem de parâmetros para estabelecer a circularidade das misturas asfálticas, uma vez que, são duas características independentes dos produtos finais que correspondem a diferentes tensões mecânicas.

Para Mantalovas e Di Mino (2020), o ensaio de deformação permanente foi realizado de acordo com a Norma Britânica de 1998 (*Sampling and Examination of Bituminous Mixtures for Roads and Other Paved Areas - Part 110: Methods of Test for the*

Determination of Wheel - Tracking Rate and Depth), utilizando aparelho de rastreamento de rodas. Dessa forma, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 3.

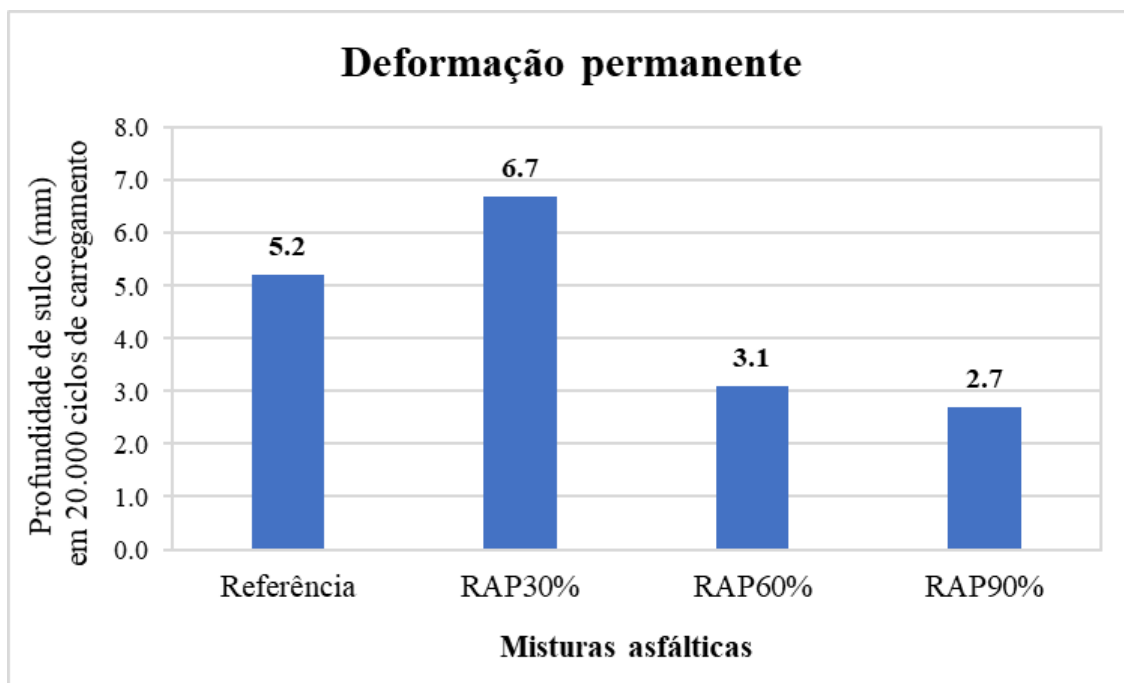


Figura 3. Resultados referentes à profundidade de sulco após 20.000 ciclos de carregamento para deformação permanente. Fonte: Adaptado de Mantalovas e Di Mino (2020).

Para Melo Neto (2022), o ensaio de deformação permanente seguiu conforme o Método DNIT 184:2018 (Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente), sendo o procedimento realizado usando a *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT) da marca IPC Global®.

Em relação a Mantalovas e Di Mino (2020), como se pode observar na Figura 3, as misturas asfálticas recicladas apresentaram menor profundidade de sulco em relação à mistura asfáltica de referência para o mesmo número de ciclos de carregamento, ou seja, apresentaram maior resistência à deformação permanente. Quanto a isso, o efeito do enrijecimento do RAP pode ser a justificativa do ganho na resistência à deformação permanente em relação à mistura de referência. Essa mesma tendência foi observada para o estudo de Melo Neto (2020), conforme Figura 5, para o qual houve um aumento de quase 85% do número de ciclos de carregamento da mistura com 40% de RAP em relação à mistura asfáltica sem material reciclado.

De acordo com Copeland (2011) e Mogawer et al. (2012), misturas asfálticas que incorporam RAP são geralmente mais rígidas e quebradiças em comparação com misturas asfálticas virgens, tendendo a uma maior resistência à deformação permanente, porém, é mais suscetível a trincas.

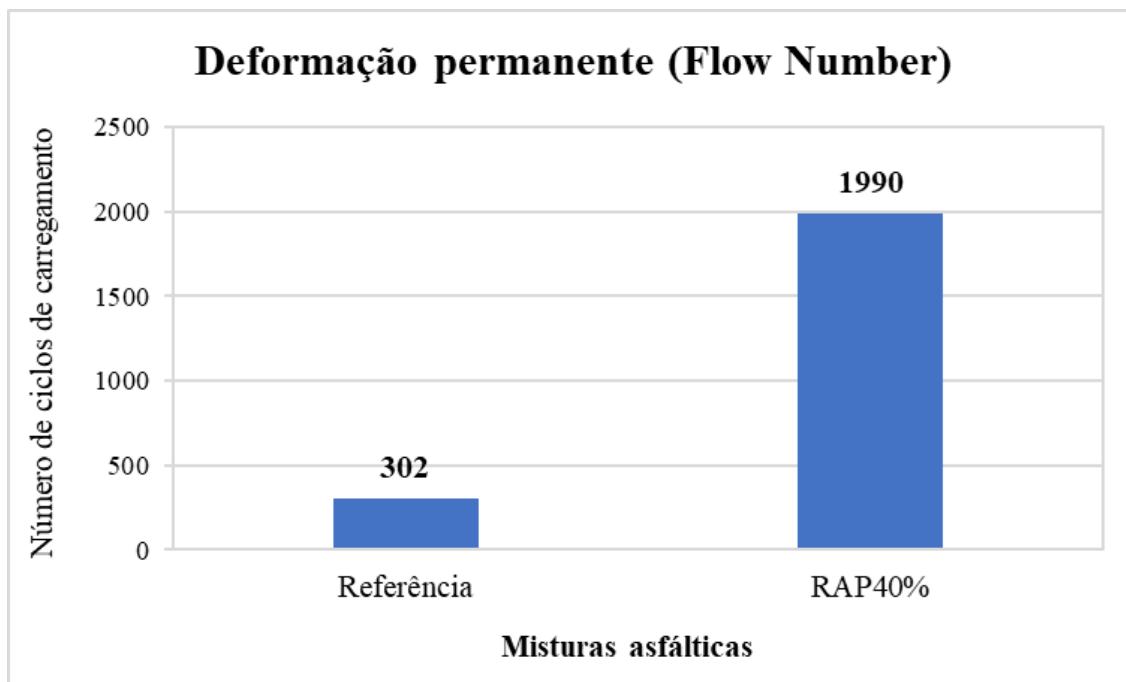


Figura 4. Resultados referentes aos valores médios do Flow Number (FN) das misturas asfálticas analisadas. Fonte: Adaptado de Melo Neto (2022).

Para a determinação da resistência à fadiga, Mantalovas e Di Mino (2020) realizaram o teste de flexão a quatro pontos em amostras prismáticas de asfalto, conforme a Norma Britânica de 2001 (*Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 24: Resistance to Fatigue*) e obtiveram os resultados apresentados na Figura 5.

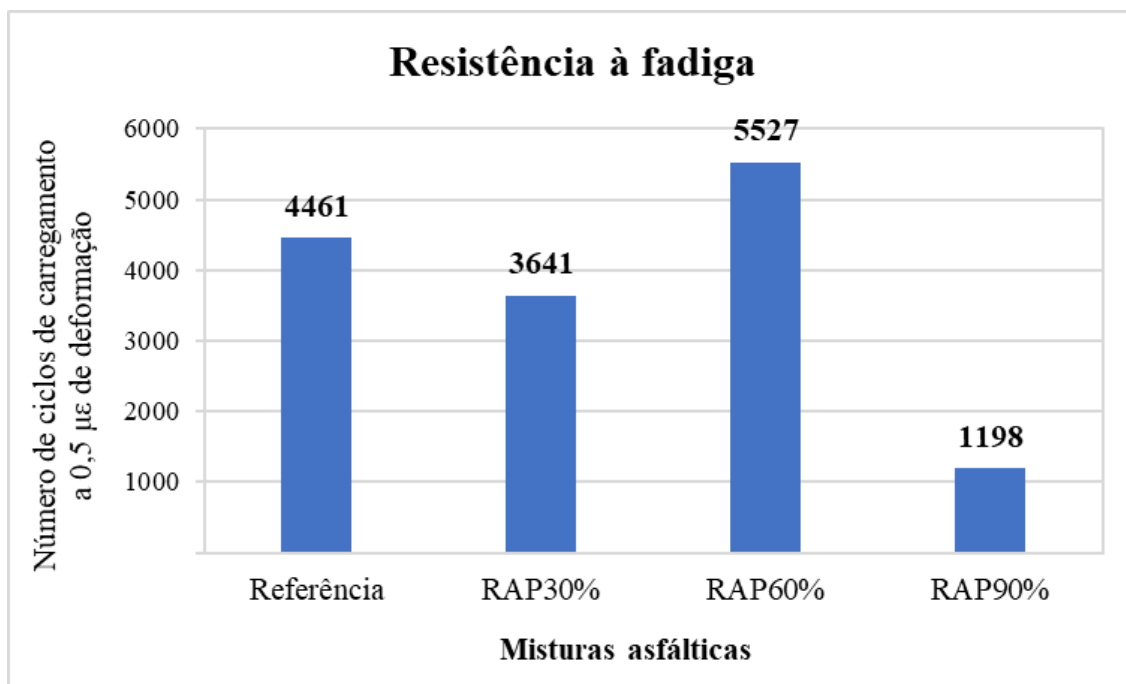


Figura 5. Resultados referentes ao número de ciclos de carga quando 0,5 με de deformação foi atingido para a fadiga. Fonte: Adaptado de Mantalovas e Di Mino (2020).

Enquanto Melo Neto (2022) analisaram essa propriedade por meio do Método de Ensaio DNIT 183:2018 (Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada), em que a aplicação da carga foi feita usando a UTM-25 (quatro cargas diferentes foram aplicadas para gerar quatro níveis de tensão) e a deformação dos CPs foi medida por meio do sensor de deslocamento do atuador da UTM. Sendo assim, o autor obteve os resultados ilustrados na Figura 6.

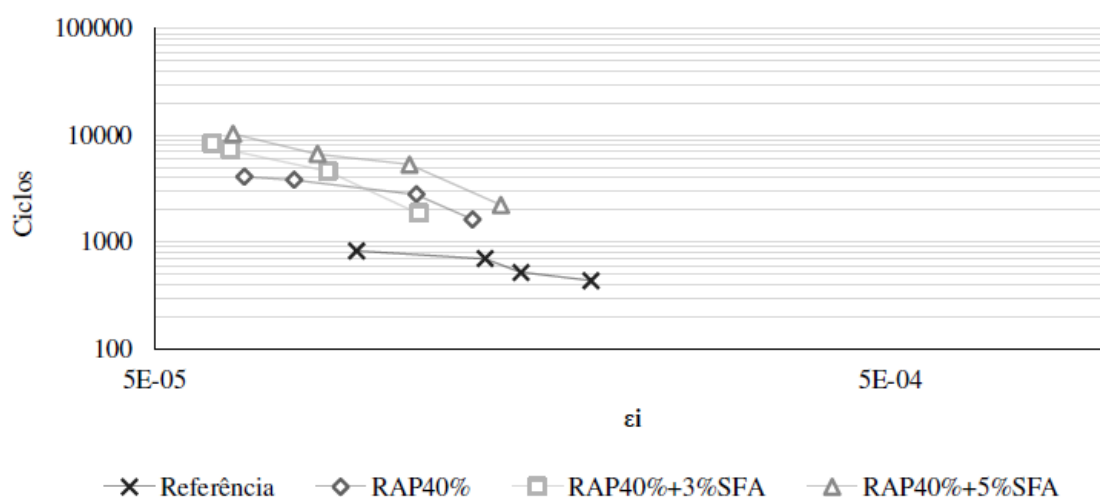


Figura 6. Resultados referentes ao ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em um diagrama log-log de N versus ϵ_i . Fonte: Melo Neto (2022).

A falta de informação dos valores de número de ciclos e deformação impossibilitou a adaptação da Figura 6.

No que diz respeito à resistência à fadiga, pode ser observado no estudo de Mantalovas e Di Mino, conforme apresentado na Figura 5, que a mistura com 60% de RAP apresentou o melhor comportamento, com desempenho à fadiga até mesmo superior à mistura asfáltica de referência, com uma diferença equivalente a aproximadamente, 20%. Enquanto que a mistura de 30% e 90% de RAP apresentaram desempenho inferior a ambas.

Já em Melo Neto (2022) pode ser observado que a mistura com 40% de material fresado também apresentou desempenho superior à mistura de referência conforme visualizado na Figura 6.

A respeito dessa propriedade, Santos (2005) informa que misturas que possuem maior rigidez tendem a exibir, nos ensaios à tensão controlada, maior vida de fadiga, no entanto, como vimos isso dependerá do quantitativo de material empregado, o que mostra a necessidade de estudos para estabelecer o melhor percentual de RAP a ser adicionado à produção de novas misturas.

Índice de Circularidade

Para o cálculo dos Índices de Circularidade realizados nos estudos selecionados, seguiram conforme descrito na metodologia, e como a abordagem adotada foi a do “berço ao portão” a unidade definida para a determinação desse índice foi de uma tonelada de

mistura asfáltica produzida. Sendo assim, foram obtidos os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Resultados referentes ao cálculo do ICM do estudo de Mantalovas e Di Mino (2020).

ICM das misturas asfálticas		Referência	30% RAP	60% RAP	90% RAP
Definição	Símbolo	Valor			
Massa de matéria-prima virgem usada	V (kg)	1.000,00	700,00	400,00	100,00
Fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas	PRAP	0,00	0,30	0,60	0,90
Massa do produto final	GMRAP	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida	FRAP	0,00	0,00	0,00	0,00
Quantidade de resíduos que vai para aterro ou recuperação de energia	WEOL (kg)	1.000,00	700,00	400,00	100,00
Quant. de resíduos gerados no processo de reciclagem	WT (kg)	0,00	0,00	0,00	0,00
Quantidade de resíduos gerados para produzir qualquer material reciclado contendo matéria-prima	WP (kg)	0,00	6,12	12,24	18,37
Eficiência do processo de reciclagem como tratamento	ET	98%	98%	98%	98%
Eficiência do processo de reciclagem como produção	EP	100%	100%	100%	100%
Quant. total de resíduos irrecuperáveis	W (kg)	1.000,00	703,06	406,12	109,18
Índice de fluxo linear	LFI	1,00	0,70	0,40	0,10
Fator de utilidade das misturas asfálticas	X	1,00	0,63	2,08	0,52
Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	F (X)	0,90	1,43	0,43	1,73
Índice de circularidade	ICMRAP	0,10	0,10	0,83	0,82

Fonte: Adaptado de Mantalovas e Di Mino (2020).

Referindo-se à fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida (FRAP), o qual, de acordo com Mantalovas e Di Mino (2020), corresponde à relação entre o total de AR (asfalto reciclado) disponível e o total que está sendo empregado no sistema, foi considerado equivalente a zero, uma vez que não foi realizado levantamentos em relação à quantidade de material disponível, apenas foi feita uma estimativa de material produzido para realizar os cálculos dos parâmetros do ICM e do valor desse índice para cada composição.

Ademais, ao adotar-se a eficiência de 100% para o processo de reciclagem como produção está sendo considerado que todo o material reciclado tratado é utilizado no processo de confecção da mistura. Enquanto que foi considerado por Mantalovas e Di

Mino (2019), que adaptaram a metodologia do ICM para as misturas asfálticas, e adotado pelos dois estudos selecionados, perda de 2% no processo de tratamento do RAP.

Tabela 8. Resultados referentes ao cálculo do ICM de Melo Neto (2022).

ICM das misturas asfálticas	Símbolo	Referência	30% RAP
Definição		Valor	
Massa de matéria-prima virgem usada	V (kg)	1.000,00	600,00
Fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas	PRAP	0,00	0,40
Massa do produto final	GMRAP	1.000,00	1.000,00
Fração da massa do produto coletado por reciclagem no fim da vida	FRAP	0,00	0,40
Quantidade de resíduos que vai para aterro ou recuperação de energia	WEOL (kg)	1.000,00	600,00
Quantidade de resíduos gerados no processo de reciclagem	WT (kg)	0,00	0,00
Quantidade de resíduos gerados para produzir qualquer material reciclado contendo matéria-prima	WP (kg)	0,00	8,16
Eficiência do processo de reciclagem como tratamento	ET	98%	98%
Eficiência do processo de reciclagem como produção	EP	100%	100%
Quantidade total de resíduos irre recuperáveis	W (kg)	1.000,00	604,08
Índice de fluxo linear	LFI	1,00	0,60
Fator de utilidade das misturas asfálticas	X	1,00	0,75
Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade das misturas asfálticas	F (X)	0,90	1,20
Índice de circularidade	ICMRAP	0,10	0,28

Para ambos os estudos pode-se observar que quanto maior o percentual de material fresado maior é o Índice de Circularidade das misturas, mas isso ocorre até certo percentual de RAP, como mostram Mantalovas e Di Mino (2020), estando relacionadas às propriedades mecânicas das misturas (deformação permanente e fadiga), consideradas parâmetros para determinação do ICM. Acontece que, com o aumento do material reciclado, a mistura torna-se mais rígida em detrimento do ligante envelhecido - responsável por tornar os pavimentos duros e quebradiços -, o que prejudica a deformação por fadiga, reduzindo essa característica das misturas, ao mesmo tempo que contribui para um maior desempenho quanto à deformação permanente, como pôde ser observado nos resultados das características mecânicas.

Em Mantalovas e Di Mino (2020), que analisaram diferentes percentuais de misturas com RAP, é possível identificar o papel essencial que o desempenho técnico exerce na circularidade das misturas asfálticas, para o qual a mistura referência e com 30% de RAP apresentaram o mesmo Índice de Circularidade, já a mistura com 60% de RAP apresentou um aumento de 0,01 de ICM em relação à mistura com 90% de RAP apesar de uma diferença de 30% de material fresado de uma para a outra.

O aumento do quantitativo de asfalto reciclado reduz o emprego de materiais virgens, o que contribui para a minimização dos impactos relacionados à extração de recursos naturais, transporte e beneficiamento dos agregados. No entanto, com relação à sustentabilidade, é necessário que seja realizada análise mais específica que quantifique os impactos negativos oriundos da produção de misturas asfálticas, como é o caso de Mantalovas e Di Mino (2020), que realizaram uma ACV e, por meio do desenvolvimento de um indicador, estabeleceram relação entre a sustentabilidade das misturas e a

circularidade, comprovando que a utilização de RAP é uma alternativa viável para tornar o setor mais sustentável, aliando-o a uma gestão de resíduos eficiente e contribuindo para a gestão ambiental da indústria asfáltica. Além do mais, o Índice de Circularidade já é uma metodologia que pode ser adotada para proporcionar escolhas mais circulares no modal rodoviário.

Conclusão

Após a análise das duas pesquisas, tem-se que os teores e o tipo de RAP utilizado acarretaram em um bom desempenho mecânico às misturas asfálticas, destacando-se a mistura com 60% de RAP produzida por Mantalovas e Di Mino (2020). Consequentemente, foram obtidos bons índices de circularidade que, para tanto, viabilizam o uso desses materiais nas composições de misturas asfálticas. Além do mais, quanto maior o quantitativo de RAP empregado menores são os impactos ambientais associados ao setor da pavimentação, pois promove redução na extração de recursos naturais, transporte, beneficiamento dos agregados e, portanto, consumo energético.

Ainda, por meio desse estudo, foi possível concluir que, pesquisas científicas que tratam sobre economia circular e o índice de circularidade empregando material asfáltico fresado como insumo para a produção de misturas asfálticas utilizadas em camadas de revestimento de pavimentos ainda são escassas. Sendo assim, a gestão ambiental de resíduos provenientes da construção civil é um campo do conhecimento que carece da realização de mais estudos a fim de averiguar a viabilidade técnica, econômica e ambiental no que se refere a reinserção de resíduos na cadeia produtiva.

De tal modo, o desenvolvimento de pesquisas nesse âmbito pode desencadear mudanças no cenário econômico, tendo em vista que, a obtenção de resultados satisfatórios ao realizar análises de viabilidade, representa um incentivo de caráter técnico à reutilização dos resíduos, nesse caso o RAP, possibilitando, assim, uma realidade em que a economia passe do modelo linear para o circular, ao modo que proporciona um incremento as receitas, redução de consumo energético e de recursos naturais, contribuindo efetivamente com a gestão desses materiais que normalmente são descartados.

Além disso, o Índice de Circularidade do Material mostra o potencial de circularidade das misturas analisadas com RAP e surge como uma metodologia que estabelece uma análise ambiental na perspectiva da economia circular. Por fim, destaca-se que vincular esse método a uma análise de ciclo de vida do produto permite aos responsáveis pelo setor da indústria asfáltica tomar decisões mais sustentáveis.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 18 jan. 2023.
- Assunção, G. M. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 2, p. 223-231, 2019. <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2019.v14n2.1543>

- Aurangzeb, Q.; Al-Qadi, I. L.; Ozer, H.; Yang, R. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 77-86, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>
- Barboza, D. V.; Silva, F. A.; Motta, W. H.; Meiriño, M. J.; Faria, A. V. Aplicação da economia circular na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 7, p. 1-19, 2019. <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i7.11102>
- Benachio, G. L. F.; Freitas, M. C. D.; Tavares, S. F. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- Bernucci, L. L. B.; Motta, L. M. G. D.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Imprinta, 2010.
- Bilar, A. B. C.; Silva, A. H. G.; Silva, A. C. S.; Silva, C. M.; Souza, E. K.; Santos, I. B.; Moura, F. F. S.; Albuquerque, C. R. S. Gestão ambiental em publicações científicas nacionais: uma revisão sistemática. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4, n. 4, p. 290-296, 2019. <https://doi.org/10.24221/jeap.4.4.2019.2822.290-296>
- Braga, B.; Hespanhol, I.; Conejo, J. G. L.; Barros, M. T. L.; Veras Junior, M. S.; Porto, M. F. A.; Nucci, N. L. R.; Eiger, S.; Juliano, N. M. A. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- Brasil. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 18 jan. 2023.
- Brasileiro, L. L.; Matos, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178-189, 2015. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>
- Copeland, A. **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice**. United States: Federal Highway Administration, Office of Research, Development, and Technology, 2011. Disponível em: <<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40918>>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- EMF - Ellen MacArthur Foundation. **Uma economia circular no Brasil: uma abordagem exploratória inicial**. 2017. Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Apêndice-de-Estudos-de-Caso.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- Galvão, M. C. B.; Ricarte, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019. <https://doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73>
- Galvão, T. F.; Pereira, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 23, n. 1, p. 183-184, 2014. <https://doi.org/10.5123/s1679-49742014000100018>
- Gaspar, M. S.; Vasconcelos, K. L.; Lopes, M. M.; Bernucci, L. L. B. Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling. **Transportes**, v. 28, n. 2, p. 87-99, 2020. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i2.2133>
- Korhonen, J.; Honkasalo, A.; Seppälä, J. Circular economy: The concept and its limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37-46, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

Lee, N.; Chou, C.; Chen, K. Benefits in energy savings and CO₂ reduction by using reclaimed asphalt pavement. Proceedings of the 91th, Annual Reunion of the Transportation Research Board, Washington, 2012.

Mantalovas, K.; Di Mino, G. The sustainability of reclaimed asphalt as a resource for road pavement management through a circular economic model. **Sustainability**, v. 11, n. 8, p. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11082234>

Mantalovas, K.; Di Mino, G. Integrating circularity in the sustainability assessment of asphalt mixtures. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12020594>

Melo Neto, O. M. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2022. (Dissertação de mestrado).

Melo Neto, O. D. M.; Silva, I. M.; Lucena, L. C. D. F. L.; Lucena, L. D. F. L.; Mendonça, A. M. G. D.; Lima, R. K. B. Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. **Construction and Building Materials**, v. 349, 128728, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128728>

Mogawer, W.; Bennert, T.; Daniel, J. S.; Bonaquist, R.; Austerman, A.; Booshehrian, A. Performance characteristics of plant produced high rap mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. 1, p. 183-208, 2012. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657070>

Rocha Segundo, I. G.; Branco, V. T. F. C.; Vasconcelos, K. L.; Holanda, Á. S. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. **Transportes**, v. 24, n. 4, p. 85-94, 2016. <https://doi.org/10.14295/transportes.v24i4.1148>

Santos, C. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2005. (Dissertação de mestrado).

Santos, M. R.; Shibao, F. Y.; Silva, F. C. Economia circular: conceitos e aplicação. **Revista Eletrônica Gestão e Serviços**, v. 10, n. 2, p. 2808-2826, 2019. <https://doi.org/10.15603/2177-7284/regs.v10n2p2808-2826>

Saride, S.; Avirneni, D.; Javvadi, S. C. P.; Puppala, A. J.; Hoyos, L. R. Evaluation of fly ash treated reclaimed asphalt pavement for base/subbase applications. **Indian Geotechnical Journal**, v. 45, n. 4, p. 401-411, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40098-014-0137-z>

Stival, L. T.; Barros, R. G.; Veiga, R. M. Os instrumentos legais de gestão ambiental e sua relação com os princípios da economia circular. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 73, p. 70-85, 2020. <https://doi.org/10.14393/RCG217347214>

Unger Filho, W.; Klinsky, L. M. G.; Motta, R.; Bernucci, L. L. B. Cold recycled asphalt mixture using 100% RAP with emulsified asphalt-recycling agent as a new pavement base course. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5863458>

Vidal, R.; Moliner, E.; Martínez, G.; Rubio, M. C. 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, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>

Wang, W.; Huang, S.; Qin, Y.; Sun, Y.; Chen, J. Multi-scale study on the high percentage warm-mix recycled asphalt binder based on chemical experiments. **Construction and Building Materials**, v. 252, 119124, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119124>

Wang, W.; Huang, S.; Qin, Y.; Sun, Y.; Chen, J. Research on rheological properties of high-percentage artificial RAP binder with WMA additives. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, p. 1-24, 2020b. <https://doi.org/10.1155/2020/1238378>



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.