



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

THIAGO MARQUES DA FROTA

**CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS E AMBIENTAIS SOBRE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE PARA O SUPORTE À TOMADA DE
DECISÃO**

FORTALEZA

2023

THIAGO MARQUES DA FROTA

CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS E AMBIENTAIS SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS
RECICLADAS A QUENTE PARA O SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
Coorientadora: Prof.^a Dra. Juceline Batista dos Santo Bastos.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F961c Frota, Thiago Marques da.
Considerações mecânicas e ambientais sobre misturas asfálticas recicladas a quente para o suporte à tomada de decisão / Thiago Marques da Frota. – 2023.
158 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
Coorientação: Profª. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos.
1. Reclaimed Asphalt Pavement. 2. Pavimentos sustentáveis. 3. Impactos ambientais. 4. Avaliação do Ciclo de Vida. I. Título.

CDD 388

THIAGO MARQUES DA FROTA

CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS E AMBIENTAIS SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS
RECICLADAS A QUENTE PARA O SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 17/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Iuri Sidney Bessa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Kamilla Vasconcelos Savasini
Universidade de São Paulo (USP)

Aos meus pais, Francisco e Irlania.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer de forma especial ao meu orientador Jorge Soares e coorientadora Juceline Bastos. Suas sugestões e críticas construtivas foram inestimáveis e contribuíram significativamente para a qualidade desta dissertação. Do mais, agradeço a confiança depositada em mim no desafio de trazer a temática da sustentabilidade, apresentado neste trabalho, para o grupo de pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos aos membros da comissão examinadora, Prof. Iuri Sidney Bessa e Profa. Kamilla Vasconcelos Savasini, pelo tempo dedicado à avaliação desta dissertação e pelos comentários construtivos que contribuíram para o aprimoramento desta pesquisa.

Quero expressar minha gratidão a todos os colegas e amigos do Laboratório de Mecânica de Pavimentos da UFC que compartilharam conhecimento, experiências e momentos desafiadores durante todo o período de estudos. Suas contribuições e companheirismo enriqueceram minha jornada acadêmica e pessoal.

Agradeço profundamente a minha namorada Larisse, minha mãe Irlania e meu pai Francisco pelo apoio incondicional, amor e paciência ao longo de toda a jornada.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015, pelo apoio financeiro por meio da concessão de uma bolsa de mestrado.

Cada uma dessas pessoas e instituições teve um papel fundamental nesta jornada, e sou imensamente grato por todas as contribuições que tornaram possível a conclusão desta dissertação de mestrado.

Muito obrigado a todos!

“Valeu a pena? Tudo vale a pena se a alma não é pequena.” (Fernando Pessoa).

RESUMO

A indústria de pavimentação rodoviária tem buscado mitigar os impactos ambientais por meio da adoção de medidas sustentáveis. Uma alternativa amplamente difundida é a utilização de fresado asfáltico, conhecido como RAP (do inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement*). O objetivo geral desta dissertação foi contribuir para o entendimento dos impactos ambientais e para a previsão de desempenho no pavimento ao substituir parte dos agregados virgens e do ligante asfáltico por RAP em misturas asfálticas a quente. A adição do material fresado foi baseada no parâmetro *RAP Binder Ratio* (RBR), ou seja, a proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. Diferentes misturas recicladas, contendo até 30% de RBR, foram analisadas, incluindo os ensaios *Stress Sweep Rutting* (SSR) e Fadiga à Tração/Compressão, que forneceram dados para um programa de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos. Por fim, foi realizada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma técnica de gestão ambiental para avaliar os potenciais impactos ambientais na produção dessas misturas em usinas asfálticas. A dissertação foi organizada na forma de uma compilação de publicações acadêmicas. No primeiro documento, foram relacionados os impactos ambientais das misturas asfálticas recicladas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Concluiu-se que a reciclagem contribui de forma significativa para o alcance dos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil em prol do desenvolvimento sustentável. O segundo documento abordou os efeitos da fração miúda do RAP na rigidez e na Resistência à Tração (RT) em misturas asfálticas a quente. Observou-se que o uso da fração fina do RAP aumentou a RT com o aumento do RBR, mas essa relação para rigidez só se manifestou nas misturas com maiores proporções de RBR. O terceiro documento apresentou um questionário estruturado destinado a auxiliar na elaboração do inventário do ciclo de vida de pavimentos asfálticos. Este instrumento pode ser aplicado por produtores de misturas asfálticas, empresas e órgãos responsáveis pela construção e manutenção de pavimentos. No quarto documento, foi realizada uma ACV da produção de misturas asfálticas. Destacou-se que a etapa de extração de matérias-primas virgens representou os maiores impactos ambientais negativos. Portanto, quanto maior a proporção de RAP na mistura, maiores são os benefícios ambientais. O quinto documento analisou a influência do RAP na resistência à deformação permanente e na previsão do desempenho ao Afundamento de Trilha de Roda (ATR) na camada asfáltica. Observou-se que as misturas recicladas apresentaram previsão de ATR menor que 11mm ao final do período simulado de 10 anos. O sexto documento avaliou as respostas ambientais e estruturais de misturas asfálticas recicladas. Concluiu-se que o RAP

é viável, especialmente em cenários de tráfego médio, e que sua substituição contribui para reduzir os impactos ambientais negativos, principalmente na fase de extração de matérias-primas. De forma geral, a pesquisa apontou que o uso de programas de modelagem permite tomadas de decisões mais sustentáveis ainda na fase de projeto. Assim, a partir desses programas, as misturas recicladas apresentaram viabilidade, tanto ambiental quanto estrutural, na utilização em camadas de rolamento.

Palavras-chave: *Reclaimed Asphalt Pavement*; pavimentos sustentáveis; impactos ambientais; Avaliação do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

The road pavement industry has been striving to mitigate environmental impacts through the adoption of sustainable measures. One widely adopted alternative is the use of reclaimed asphalt pavement, known as RAP. The overall objective of this thesis was to contribute to the understanding of environmental impacts and performance prediction in pavement by replacing part of the virgin aggregates and asphalt binder with RAP in hot asphalt mixtures. The addition of the milled material was based on the RAP Binder Ratio (RBR) parameter, i.e., the proportion of binder derived from RAP in relation to the total asphalt binder in the mixture. Various recycled mixtures containing up to 30% RBR were analyzed, including Stress Sweep Rutting (SSR) and Tensile/Compression Fatigue tests, which provided data for an analysis and design program for asphalt pavements. Finally, a Life Cycle Assessment (LCA) was conducted, an environmental management technique to assess the potential environmental impacts of producing these mixtures in asphalt plants. The dissertation was organized in the form of a compilation of academic publications. In the first document, the environmental impacts of recycled asphalt mixtures were related to the Sustainable Development Goals (SDGs). It was concluded that recycling significantly contributes to Brazil's international commitments towards sustainable development. The second document addressed the effects of the fine fraction of RAP on stiffness and Tensile Strength (TS) in hot asphalt mixtures. It was observed that the use of the fine fraction of RAP increased TS with an increase in RBR, but this relationship for stiffness only manifested in mixtures with higher RBR proportions. The third document presented a structured questionnaire designed to assist in the life cycle inventory of asphalt pavements. This tool can be applied by producers of asphalt mixtures, companies, and organizations responsible for the construction and maintenance of pavements. In the fourth document, an LCA of asphalt mixture production was conducted. It was highlighted that the extraction of virgin raw materials represented the largest negative environmental impacts. Therefore, the higher the proportion of RAP in the mixture, the greater the environmental benefits. The fifth document analyzed the influence of RAP on resistance to permanent deformation and the prediction of performance in terms of Wheel Track Rutting (WTR) in the asphalt layer. It was observed that recycled mixtures had a predicted WTR of less than 11mm at the end of a simulated 10-year period. The sixth document evaluated the environmental and structural responses of recycled asphalt mixtures. It was concluded that RAP is viable, especially in scenarios of medium traffic, and that its substitution contributes to reducing negative environmental impacts, particularly in the phase

of raw material extraction. In general, the research pointed out that the use of modeling programs allows for more sustainable decision-making, even in the design phase. Thus, based on these programs, recycled mixtures demonstrated both environmental and structural viability for use in pavement wearing courses.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement; sustainable pavements; environmental impacts; Life Cycle Assessment.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações iniciais	15
1.2	Problema de pesquisa	16
1.3	Objetivos	17
1.4	Estrutura da dissertação	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Considerações iniciais	20
2.2	Reciclagem de pavimentos	20
2.3	Reciclagem de pavimentos de misturas asfálticas a quente	23
2.3.1	<i>Limitações do uso do RAP</i>	23
2.3.2.1	<i>Superaquecimento do RAP</i>	23
2.3.2.2	<i>Heterogeneidade do RAP</i>	24
2.3.2.3	<i>Remobilização/Reativação do Ligante do RAP</i>	26
2.4	Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente (MARQ)	26
2.5	Comportamento mecânico e desempenho de MARQs	27
2.6	Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos	30
2.7	Tomada de decisões sustentáveis	34
2.8	Considerações finais	35
3	ESTUDO DA ADERÊNCIA DOS GANHOS AMBIENTAIS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM RAP AOS ODS	37
3.1	Introdução	37
3.2	Fundamentação teórica	39
3.3	Metodologia	41
3.4	Resultados e discussões	42
3.5	Conclusões	47
	REFERÊNCIAS	47
4	EFEITO DA FRAÇÃO FINA DO RAP NA RESISTÊNCIA MECÂNICA E NA RIGIDEZ DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE	50
4.1	Introdução	50

4.2	 Materiais e métodos	52
4.3	 Resultados e discussão	55
4.3.1	<i> Grau de ativação do ligante do RAP</i>	55
4.3.2	<i> Dosagem e parâmetros volumétricos</i>	55
4.3.3	<i> Módulo Dinâmico</i>	56
4.3.4	<i> Resistência Mecânica</i>	61
4.4	 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros	62
	 REFERÊNCIAS	63
5	 EFEITO DO RAP NA EVOLUÇÃO DE AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA EM CAMADAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE	66
5.1	 Introdução	66
5.2	 Materiais e métodos	68
5.2.1	<i> Materiais</i>	68
5.2.2	<i> Métodos</i>	69
5.2.2.1	<i> O Ensaio SSR e o shift model</i>	69
5.2.2.2	<i> Programa de dimensionamento CAP 3D-D</i>	70
5.3	 Resultados e discussões	72
5.3.1	<i> Módulo Dinâmico</i>	72
5.3.2	<i> Deformação permanente</i>	73
5.3.3	<i> Simulações de dimensionamento dos pavimentos</i>	75
5.4	 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros	76
	 REFERÊNCIAS	77
6	 PROPOSTA DE QUESTIONÁRIO PARA AUXILIAR O ESTUDO DE AVALIAÇÃO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	80
6.1	 Considerações iniciais	80
6.2	 Análise dos procedimentos	82
6.3	 Considerações finais	84
	 REFERÊNCIAS	85
7	 AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS PARA A CIDADE DE FORTALEZA	87
7.1	 Introdução	87

7.2	Metodologia	89
7.2.1	<i>Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)</i>	90
7.2.2	<i>Objetivo e escopo</i>	90
7.2.3	<i>Inventário do Ciclo de Vida (ICV)</i>	92
7.2.4	<i>Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)</i>	95
7.3	Resultados	96
7.4	Conclusões	99
	REFERÊNCIAS	101
8	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO, AMBIENTAL E ESTRUTURAL, DE MISTURAS RECICLADAS A QUENTE PARA TOMADA DE DECISÃO	104
8.1	Introduction	104
8.2	Materials and Methods	106
8.2.1	<i>Materials and mixture design</i>	106
8.2.2	<i>Asphalt mixture linear viscoelastic</i>	107
8.2.3	<i>Asphalt mixture fatigue damage characterization</i>	108
8.2.4	<i>Asphalt mixture permanent deformation characterization</i>	108
8.2.5	<i>CAP3D-D simulation (Analysis of fatigue and rutting prediction)</i>	109
8.2.6	<i>Life Cycle Assessment</i>	110
8.2.6.1	<i>Goal and scope definition phase</i>	110
8.2.6.2	<i>Life cycle inventory (LCI) analysis phase</i>	111
8.2.6.3	<i>Life cycle impact assessment (LCIA) analysis phase</i>	113
8.2.7	<i>Multicriteria Decision Analysis</i>	114
8.3	Results and Discussions	115
8.3.1	<i>Dynamic modulus</i>	115
8.3.2	<i>Fatigue test</i>	115
8.3.3	<i>Stress Sweep Rutting test</i>	117
8.3.4	<i>CAP3D-D simulations</i>	117
8.3.5	<i>LCA environmental impacts evaluation</i>	119
8.3.6	<i>Classification of asphalt mixtures based on multicriteria analysis</i>	121
8.4	Conclusions	123
	REFERENCES	125

9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	129
9.1	Considerações.....	130
9.2	Principais Contribuições da Dissertação.....	131
9.3	Síntese das Principais Conclusões.....	131
9.3.1	<i>Quanto às análises de aderência dos ganhos ambientais de reciclagem de pavimentos com RAP aos ODS.....</i>	129
9.3.2	<i>Quanto às análises efeito da fração fina do RAP na resistência mecânica e na rigidez de misturas asfálticas recicladas a quente.....</i>	132
9.3.3	<i>Quanto às análises do efeito do RAP na evolução de afundamento de trilha de roda em camadas de misturas asfálticas recicladas a quente.....</i>	132
9.3.4	<i>Quanto à proposta de questionário para auxiliar o estudo de avaliação ciclo de vida de pavimentos asfálticos.....</i>	133
9.3.5	<i>Quanto às análises da avaliação dos potenciais impactos ambientais na produção de misturas asfálticas recicladas para a cidade de Fortaleza.....</i>	133
9.3.6	<i>Quanto às análises da avaliação do desempenho, ambiental e estrutural, de misturas recicladas a quente para tomada de decisão.....</i>	133
9.4	Limitações da pesquisa.....	134
9.5	Recomendações para trabalhos futuros.....	134
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
	ANEXO A – QUESTIONÁRIO DE ICV DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	147
	ANEXO B – CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DOS PROCESSOS EM RELAÇÃO ÀS CATEGORIAS DE IMPACTOS AMBIENTAIS	158

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O agravamento da crise climática e suas consequências têm intensificado debates na comunidade internacional e na adoção de políticas públicas com ações práticas mais sustentáveis para preservação do meio ambiente. O Sexto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report*) (IPCC, 2023) concluiu que as mudanças nos padrões climáticos estão associadas diretamente às ações antrópicas e ainda estabelece uma meta para reverter esse cenário, onde o aumento da temperatura global não deve ultrapassar 1,5°C em comparação a era pré-industrial até 2050 (Masson-Delmotte *et al.*, 2021).

No Brasil, a atividade de transporte correspondeu a 47% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do setor energético, sendo a movimentação de cargas por caminhões responsável por aproximadamente 40% desse total (Observatório do Clima, 2021). No entanto, as emissões no setor de transporte vão muito além dessa fase e atualmente não há qualquer avaliação nacional quanto os impactos associados à produção de misturas asfálticas, por exemplo.

Além de emissões de GEE, é importante estar ciente quanto a outras categorias de impactos ambientais negativos ao meio ambiente causados pelo setor. A remoção da camada vegetal, alteração da drenagem local, exploração de recursos naturais não renováveis e disposição de resíduos no meio ambiente são alguns dos exemplos (Xiafeng *et al.*, 2021). Desta forma, surge a necessidade de uma visão holística e a consideração do fator ambiental na tomada de decisões de gestores e órgãos responsáveis.

Uma das várias alternativas que visa contornar grande parte desses impactos é a reciclagem dos pavimentos, técnica centenária que consiste na reinserção do material asfáltico fresado de pavimentos deteriorados, em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), na composição de novas misturas asfálticas ou camadas subjacentes. A vantagem desta técnica também garante competitividade econômica na construção e manutenção dos pavimentos, visto que o material fresado contém o componente de maior valor econômico agregado da mistura, o ligante asfáltico. Além disso, a utilização do RAP, no processo de reciclagem a quente, vem ganhando impulso no contexto nacional devido às normatizações e regulamentações do governo e órgãos responsáveis (Brasil, 2021; DNIT-ES 033/2021).

A sustentabilidade na pavimentação também deve atender a premissa de que o

pavimento cumpra as funções de engenharia para as quais foi projetado. Deste modo, é importante a avaliação de misturas asfálticas com a adoção de técnicas experimentais avançadas e métodos mecanístico-empíricos para a previsão do desempenho do pavimento de forma mais adequada.

Segundo a CNT (2021), as ações de manutenção adequada das rodovias e investimento em novas vias e acessos são fundamentais para um maior desenvolvimento econômico pautado na sustentabilidade ambiental. Apesar disso, a gestão desses ativos para o setor tem sido cada vez mais difícil e limitada, especialmente via recursos públicos do Orçamento Geral da União (OGU).

1.2 Problema de pesquisa

A comunidade técnica brasileira está passando por uma transição no que diz respeito à análise de comportamento de materiais e ao dimensionamento de pavimentos. No entanto, ainda existem lacunas no conhecimento no que toca a compreensão de fenômenos complexos como a fadiga de materiais compósitos como as misturas asfálticas, e ressalte-se que o uso do melhor conhecimento disponível para aplicação ainda possui diversas limitações nos chamados métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento, uma vez que a validação para uso prático com elevada confiança requer bases de dados ainda não disponíveis. Entre as lacunas, pode-se citar a necessidade de estudos sobre a influência do envelhecimento do material asfáltico no comportamento mecânico de misturas recicladas, por meio de ensaios laboratoriais mais alinhados com o melhor conhecimento mecanicista. Sem considerações sobre o envelhecimento, ficam limitadas conclusões mais precisas sobre o desempenho das misturas em relação a defeitos de deformação permanente e trincamento por fadiga. Além disso, constata-se que o uso de técnicas de gestão ambiental na construção de estradas ainda não é uma prática comum entre as empresas de engenharia, tomadores de decisão, agentes de financiamento e órgãos governamentais. Por se tratar de um setor tradicional, entende-se que a temática de gestão ambiental na pavimentação também pode estar atrelada, além da resistência às mudanças, à falta de regulamentação e incentivos financeiros. Além disso, outro desafio está relacionado com a complexidade da cadeia produtiva, podendo envolver custos adicionais para a obtenção de dados confiáveis de várias fontes requeridos pela técnica de ACV. Isso favorece a escolha de materiais e soluções técnicas baseadas principalmente em critérios econômicos, sem levar em consideração os indicadores de impacto ambiental e as consequências negativas para os diferentes ecossistemas. É fundamental que sejam adotadas

abordagens mais sustentáveis e ecologicamente responsáveis na pavimentação de obras rodoviárias, a fim de minimizar o impacto ambiental e promover a preservação dos ecossistemas.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é aplicar um método de tomada de decisão na escolha de projeto de pavimentos com uso de misturas asfálticas recicladas a quente. Com essa pesquisa, busca-se facilitar a tomada de decisões relacionadas ao uso de misturas asfálticas recicladas a quente, considerando tanto os efeitos ambientais quanto a previsão do desempenho no pavimento decorrentes da substituição de agregados virgens e ligante asfáltico por RAP. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Investigar a relação das práticas de reciclagem de pavimentos com uso de RAP aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030-ONU.
- Avaliar o efeito da adição da fração fina do RAP (<4,75mm) com diferentes proporções de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura, definido como RBR (*RAP Binder Ratio*), (0, 15, 30%) em misturas asfálticas recicladas a quente, avaliando-se o comportamento mecânico, tanto por rigidez quanto por resistência a compressão diametral.
- Avaliar o impacto fração fina do RAP, com diferentes RBR (0, 15, 30%), em misturas asfálticas recicladas a quente na previsão do afundamento de trilha de rodas e da área trincada de pavimentos.
- Propor um questionário na coleta de dados para auxiliar na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de pavimentos asfálticos.
- Comparar potenciais impactos ambientais na produção de misturas convencionais e recicladas na cidade de Fortaleza.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação de mestrado foi desenvolvida no formato de publicações acadêmicas, sendo artigos científicos e uma comunicação técnica. Cada documento está relacionado a um objetivo específico da dissertação e é apresentado na sua forma aceita ou submetida. Antes do primeiro artigo, uma introdução geral da dissertação foi apresentada no

presente capítulo, assim como considerações finais são reportadas ao final da dissertação. Assim, o documento final é dividido em 7 capítulos, sendo:

- (i) **INTRODUÇÃO:** Considerações iniciais, problema de pesquisa, objetivos, estrutura da dissertação. Essa síntese tem como propósito situar o leitor quanto as diferenças entre os documentos.
- (ii) **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:** Contexto da reciclagem de pavimentos no Brasil e no mundo, focando na técnica de reciclagem a quente. Além disso, este capítulo aborda aspectos de desempenho mecânico e ambiental de misturas recicladas a quente.
- (iii) **DOCUMENTO 1:** Aderência dos resultados de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) da etapa de produção de misturas asfálticas recicladas a quente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030. Este artigo foi apresentado na modalidade *online* síncrona em 2022 e publicado em 2023 nos Livro de Memórias do IV SUSTENTARE e VII WIPIS: *Workshop* internacional de Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos.
- (iv) **DOCUMENTO 2:** Efeito da fração fina do RAP na resistência mecânica e na rigidez de misturas recicladas a quente. Foram utilizados os ensaios de Resistência à Tração por compressão diametral (DNIT-ME 136/2018) e de Módulo Dinâmico (DNIT ME 416/2019). Este artigo foi apresentado na modalidade online assíncrona e publicado em 2021 nos Anais XVIII Congresso Rio de Transportes.
- (v) **DOCUMENTO 3:** Efeito de misturas com RAP na previsão do Afundamento de Trilha de Roda em comparação a uma mistura convencional. Foram utilizados os ensaios de Módulo Dinâmico (DNIT ME 416/2019) e *Sweep Stress Rutting* (AASHTO TP 134-19), além do software de análise e dimensionamento de pavimentos CAP3D-D desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Pavimentos (LMP) da UFC. O artigo foi apresentado na modalidade online síncrona e publicado em 2023 nos Anais o XIX Congresso Rio de Transportes.
- (vi) **DOCUMENTO 4:** Questionário para auxiliar a elaboração de inventário do ciclo de vida de pavimentos asfálticos. Foram contemplados desde a fase de extração de matérias-primas até o final da vida útil do pavimento. A comunicação técnica foi apresentada e publicada em 2022 nos Anais do XXXVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes realizado em Fortaleza.

- (vii) DOCUMENTO 5: Potenciais impactos ambientais na produção de misturas asfálticas recicladas. Foi utilizada a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com o software de modelagem Simapro. O artigo foi apresentado em *Punta del Este* no Uruguai e publicado em 2022 nos Anais do *XXI Congresso Ibero-latinoamericano del Asfalto*.
- (viii) DOCUMENTO 6: Análise de tomada de decisão de misturas recicladas, considerando possíveis impactos ambientais e previsão do desempenho estrutural. O artigo foi submetido em 2023 ao periódico *Construction and Building Materials*.
- (ix) CONSIDERAÇÕES FINAIS: Principais conclusões e limitações desta Dissertação de Mestrado bem como recomendações para trabalhos futuros

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

Inicialmente, este capítulo traz dados a respeito da reciclagem de pavimentos. Em seguida é feita uma revisão sobre a técnica de reciclagem a quente, seguida pela apresentação do comportamento mecânico das misturas asfáltica recicladas a quente. Na sequência, trata-se da técnica de gestão ambiental Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para avaliação do desempenho ambiental de produtos, além do seu uso na indústria da pavimentação. Também são apresentadas as premissas que embasam a presente pesquisa.

2.2 Reciclagem de pavimentos

Apesar da reciclagem de pavimentos asfálticos ser uma prática centenária, sua forma atual evoluiu apenas em meados da década de 1970. Isso foi despertado pela inflação dos preços de construção e pelo embargo do petróleo da OPEP (Sullivan, 1996). O preço do petróleo bruto influencia historicamente o custo do ligante asfáltico e o grau de interesse na reciclagem de pavimentos asfálticos tem sido vinculado a picos neste custo (Newcomb *et al.*, 2016). O Gráfico 1 mostra o histórico dos preços do petróleo bruto desde 1973 (EIA, 2023). Nos últimos 25 anos, com o aumento do preço do petróleo devido Grande Recessão de 2007-2008 e a guerra da Ucrânia iniciada em 2022, além da pressão da sociedade em repensar necessidades ligadas a proteção ambiental, diversos países foram levados a buscar o aprimoramento de técnicas de reciclagem de materiais na indústria da pavimentação.

Gráfico 1 – Preços históricos do petróleo bruto 1973-2023



Fonte: EIA (2023)

Segundo Bernucci *et al.* (2022), quando um pavimento asfáltico em uso se deteriora estruturalmente ou apresenta irregularidade longitudinal acentuada, se procede com o corte de todo ou parte do revestimento deteriorado por equipamento especial – fresadora – e com a execução de nova camada de revestimento asfáltico. Ainda segundo os autores, a técnica de reciclagem de pavimentos, como um processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para produção de novas misturas, aproveita os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, novos ligantes ou emulsões asfálticas e com adição de aglomerantes hidráulicos.

O Manual de Restauração do Departamento Nacional de Infraestrutura Transportes (DNIT, 2006) aponta que a reciclagem de pavimentos se apresenta como uma solução para problemas estruturais e funcionais, além de oferecer inúmeras vantagens em relação a utilização convencional de materiais virgens. Segundo Brosseaud (2011), as técnicas de reciclagem podem ser a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), a frio ou morna (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*), em usina ou in loco a frio (com ligante hidráulico, emulsão, espuma ou ainda mista). A escolha da técnica dependerá da natureza do material a ser reutilizado, do seu modo de tratamento (possíveis ofertas de material), e da destinação final do produto.

Segundo Williams *et al.* (2022), os Estados Unidos produziram quase 95 milhões de toneladas de RAP dos quais, em 2021, 95% foram utilizados em novos pavimentos e os 5% restantes foram utilizados em outras aplicações de engenharia. A economia estimada com a utilização de RAP foi de aproximadamente \$3,5 bilhões em termos de matérias-primas (ligantes e agregados) e mais de \$5 bilhões em tarifas para descarte em aterros sanitários. Além disso, a porcentagem média estimada de RAP usado em misturas asfálticas aumentou de 15,6% em 2009 para 22% em 2021.

Na Europa (EAPA, 2021), 17 milhões de toneladas de RAP estavam disponíveis para serem utilizados pela indústria do asfalto em 2021. Países como Áustria, Alemanha e Hungria destacam-se por utilizar mais de 80% do RAP na produção de misturas asfálticas quentes e mornas para camadas asfálticas.

No Japão, a produção de misturas contendo RAP aumentou de 2,2 milhões de toneladas em 1984 para aproximadamente 46 milhões de toneladas em 2000. A produção de mistura asfáltica total diminuiu desde o início de 1990 devido à recessão econômica em Japão, mas a porcentagem média de RAP, em relação ao peso total da mistura, aumentou

constantemente de 32,5% em 2000, para em média 47%, em 2013. Com uma área territorial pequena, além de recursos naturais escassos e espaço limitado para disposição de rejeitos, tem-se motivado a pesquisa em soluções sustentáveis que maximizem a conservação de recursos naturais ao mesmo tempo que minimizem o desperdício (West *et al.*, 2015).

A África do Sul também tem se mostrado um exemplo de eficiência no uso de RAP. Desde 2009, o país tem ganho expertise nas formulações de misturas asfálticas de até 40% do peso total da mistura e atualmente pode ser considerada uma prática padrão da indústria local (SABITA, 2019).

No Brasil, uma das primeiras experiências com uso de RAP foi o recapeamento da Rodovia Anhanguera Via Anhanguera, trecho entre São Paulo e Campinas, na década de 1980 (Castro Neto, 2000). Desde então, não se estabeleceu uma prática de reciclagem, tanto devido à falta de uma cultura sustentável quanto pela falta de exigência de órgãos governamentais. Por outro lado, o uso de RAP em novas misturas em pavimentos brasileiros fica restrito às decisões exclusivas das construtoras, apesar do crescente número de pesquisas acadêmicas ao longo dos últimos anos que avaliam o comportamento mecânico de misturas asfálticas com RAP (Vasconcelos, 2002; Oliveira, 2013; Genneseaux, 2015; Bastos, 2016; Suzuki, 2019; Gaspar, 2019; Kuchiishi, 2019). Esse fato é refletido na falta de dados sobre o uso e a destinação final do rejeito, além da escassez de casos reportados na literatura. Suzuki (2019) apresenta uma estimativa de produção de RAP entre 7 concessionárias do Brasil. A autora aponta o montante de 1.087.000 toneladas produzidos de 2017 até 2021, o que representa um grande potencial na redução dos custos em manutenções e no projeto de novas rodovias federais e estaduais do país.

Por outro lado, nos últimos anos essa prática vem ganhando incentivo dos órgãos governamentais com a publicação de resolução, normas, especificações (SOP-CE, 2020; Brasil, 2021; DNIT, 2021). Um marco para a regulamentação do uso de RAP no Brasil é a Resolução n° 14, publicada em 8 de julho de 2021 no Diário Oficial da União (Brasil, 2021). Nela dispõe que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias DNIT, desenvolvidos no âmbito da Sede e Superintendências Regionais, deverão incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento. A resolução especifica ainda que o RAP deverá ser aplicado nas camadas do pavimento a serem construídas ou na execução de novos concretos asfálticos.

2.3 Reciclagem de pavimentos de misturas asfálticas a quente

A reciclagem de misturas a quente é um processo no qual o RAP combina-se com um novo ligante e, conforme necessidade, agentes rejuvenescedores e novos agregados, em uma usina para produzir misturas que atendam às especificações vigentes (*Asphalt Institute*, 2014). A norma brasileira DNIT 033/2021 – ES estabelece a sistemática a ser empregada na execução da camada do pavimento por meio da produção de mistura asfáltica reciclada em usina a quente, utilizando RAP.

Segundo NAPA (1996), as técnicas envolvidas no processamento de RAP em instalações de mistura a quente são: (i) transferência de calor por condução, que ocorre quando dois objetos de temperaturas diferentes se tocam e (ii) transferência de calor por convecção, que ocorre quando as partículas sólidas são expostas a uma corrente de gás quente.

Ainda segundo o documento, a principal preocupação da indústria era se o RAP poderia ser processado na prática e se a qualidade do produto da mistura a quente resultante era suficiente para ser usado como pavimento estrutural. Uma vez que isso foi estabelecido, a indústria mudou sua preocupação para o processo ambiental de RAP nessas instalações. Diferentes abordagens exibiram diferentes níveis de emissões de hidrocarbonetos e poeira, as quais levaram ao desenvolvimento de tecnologias para secagem e aquecimento de RAP em usinas

2.3.1 Limitações do uso do RAP

2.3.1.1 Superaquecimento do RAP

Uma abordagem bastante usada para secar e aquecer o RAP é o superaquecimento dos agregados virgens a uma temperatura superior a necessária para a realização da mistura a fim de que a transferência de calor seque e aqueça o material fresado. No entanto, a utilização de maiores teores de RAP torna necessário o uso de temperaturas muito altas, assim como maior consumo energético, potencializando eventuais incêndios no misturador ou tambores das usinas (NAPA, 2015). Dessa forma, o aquecimento do RAP em usinas requer adaptações para possibilitar o aumento da quantidade de inserção do mesmo, sem prejudicar as características do ligante durante a usinagem, principalmente a do ligante já envelhecido.

Segundo Liu *et al.* (2017), as usinas modernas podem ser modificadas para incorporar o RAP como matéria prima a partir de um dos três métodos a seguir: (i) Pré-aquecimento do RAP em um secador separado; (ii) Adicionar RAP frio à mistura de asfalto em algum estágio; e (iii) Usar um secador combinado para aquecer o RAP e o agregado. O primeiro e o segundo método são aplicados principalmente em centrais gravimétricas (por batelada). O terceiro método, apesar de ser comumente utilizado em usinas volumétricas (contínuas), pode ser utilizado em centrais gravimétricas.

2.3.1.2 Heterogeneidade do RAP

De acordo com Genneseaux (2015), para a reciclagem usando percentuais acima de 20%, a verificação da homogeneidade do RAP disponível é essencial e necessita de diversos controles. Os problemas relacionados à heterogeneidade da mistura reciclada podem ser divididos em três grupos: (i) heterogeneidade do RAP; (ii) grau de mistura entre o RAP e os novos materiais (escala macroscópica); e (iii) grau de mistura entre o ligante do RAP e o novo ligante (escala microscópica), que pode não ter ocorrido caso o ligante asfáltico do RAP não tenha sido remobilizado.

Ainda segundo a autora, sabe-se que o ligante asfáltico contido em uma mistura é distribuído entre os grãos de acordo com a superfície específica deles, que é a relação entre a área total da superfície dos grãos e sua massa. Dessa forma, a parte fina de uma mistura é mais rica em ligante do que a parte mais graúda, devido à maior superfície específica dos finos. Então, os erros de amostragem do RAP estão ligados não só ao esqueleto granular da mistura reciclada resultante, mas também ao teor de ligante final. Em vista disso, o destorroamento e o fracionamento do RAP podem proporcionar maior controle na dosagem da mistura reciclada.

De acordo com NAPA (2016), o fracionamento do RAP refere-se à separação do RAP em ao menos 2 pilhas com diferentes tamanhos cada. O RAP fracionado oferece a vantagem de permitir o uso de porcentagens maiores de RAP. Além disso, como o teor de ligante é notadamente maior nas menores frações de RAP, é possível obter uma maior economia de custos para misturas recicladas com a utilização de proporções maiores de frações menores de RAP.

Da mesma forma, para garantir que as misturas com RAP tenham um desempenho igual ao das misturas convencionais, o requisito básico é que sejam usadas as mesmas frações de agregados do RAP comparativamente as de agregados virgens. No entanto, devido à

operação de fresagem, finos excessivos são gerados e torna-se muito difícil cumprir os requisitos de gradação. Isso limita o conteúdo máximo de material RAP para o qual ele pode ser usado (Rathore *et al.*, 2019).

De um modo geral, o fracionamento do RAP visa otimizar a dosagem de misturas recicladas. A Tabela 2 lista uma breve síntese dos estudos conduzidos com a utilização da técnica de fracionamento, além de relacionar o teor de ligante encontrado em cada faixa de fração.

Tabela 1 – Fracionamento do RAP

Estudos	Frações (mm)	Teor de ligante (%)
Genesseaux (2015)	0 – 2	8,5
	2 – 4	6,2
	4 – 8	4,5
	8 – 12	3,2
Rathore e Zaumanis (2020)	0 – 11	5,6
	11 – 22	3,2
Antunes <i>et al.</i> (2021)	0 - 4,75	6,4
	4,75 - 12,5	3,3
	12,5 - 19	3,4

Fonte: Autor

Segundo Williams *et al.* (2022), cerca de 25% de todo RAP utilizado no Estados Unidos em 2021 passaram por um processo de fracionamento de no mínimo 2 frações. O levantamento mostra que, assim como nos anos anteriores, o fracionamento de RAP não se correlaciona com as porcentagens de utilização de RAP. West e Copeland (2015) apontam que um dos principais aspectos no qual os japoneses atribuem o uso bem-sucedido de altos níveis de RAP em misturas asfálticas a quente é o foco na qualidade com redução da variabilidade por meio do fracionamento, por exemplo.

Zaumanis *et al.* (2018) mostraram que, em um trecho estudado, o teor máximo de RAP permitido no projeto da mistura variou dependendo da fonte de obtenção das amostras. Deste modo, os autores puderam constatar que o teor máximo de RAP permitido foi 20% para amostras coletadas por sonda rotativa, enquanto amostras coletadas logo após a fresagem em campo aumentou o teor para 30%. Já a mistura mecânica da pilha de estoque aumentou ainda mais o conteúdo de RAP, permitindo atingir-se 40%. Portanto, é muito importante gerenciar o material RAP nos estágios iniciais para permitir porcentagens mais altas de incorporação de RAP.

2.3.1.3 Remobilização/Reativação do Ligante do RAP

O termo “ligante efetivo de RAP” refere-se ao ligante que é liberado do RAP, torna-se fluido e se mistura ao ligante virgem sob temperaturas de mistura típicas. Outros termos usados incluem contribuição do ligante RAP, ativação do ligante RAP, grau de ativação do RAP, ligante ativo do RAP e disponibilidade do ligante do RAP (Kaseer *et al.*, 2019).

Ainda segundo os autores, a disponibilidade do ligante do RAP é normalmente abordada por meio de uma das três premissas: (i) 0% de disponibilidade, em que o RAP atua como uma "black rock"; (ii) 100% de disponibilidade, em que todo o ligante RAP se torna fluido e está disponível para se misturar com o ligante virgem; ou (iii) disponibilidade parcial, onde uma porção do ligante RAP se torna fluido e está disponível para se misturar com o ligante virgem. Embora de difícil mensuração, é geralmente aceito que a terceira suposição é mais realista.

Segundo Lo Presti *et al.* (2019) e Kaseer *et al.* (2019), mesmo que todo o ligante do RAP seja ativado e se torne disponível, isso não significa que os dois ligantes irão interagir completamente e tornar um filme asfáltico homogêneo, já que essa interação depende de fatores externos como tempo e temperatura de usinagem. Wellner *et al.* (2015) sugerem que se admita algo entre 60% e 100% de ativação de ligante do RAP para um desempenho adequado em campo. Chaves (2023), por outro lado, indicou que o nível de envelhecimento, causado pelo aumento do teor de RAP em uma mistura entre ligantes, também influencia a adesão desta aos agregados.

2.4 Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente (MARQ)

A AASHTO M323-13, “*Superpave Volumetric Mix Design*”, recomendava que a seleção do Grau de Desempenho (PG, do inglês *Performance Grade*) do ligante virgem seria baseada no volume de RAP incorporado à mistura. Na sua versão mais atual, AASHTO M323-22, o sistema para seleção do ligante asfáltico virgem foi revisado e o critério utilizado não é mais a porcentagem volumétrica de RAP em relação à massa total de mistura, mas sim o parâmetro que indica a proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura, definido como RBR (*RAP Binder Ratio*). Para RBR inferior a 25%, o ligante virgem não deve ser alterado.

As propriedades de um ligante asfáltico são avaliadas de forma diferente em vários países. Diferente do método Superpave de seleção do ligante pelo PG, as melhores práticas sul-africanas e europeias definem os ligantes pela penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. Já a associação das agências de transporte da Austrália e da Nova Zelândia, *Austroads*, propôs um novo método de projeto baseado na avaliação da viscosidade complexa do ligante misturado para escolher o grau de ligante virgem (Tarsi *et al.*, 2020).

Na prática, Zaumanis *et al.* (2015) pontuam que métodos de dosagem convencionais nem sempre garantam o desempenho requerido para Misturas Asfálticas Recicladas a quente (MARQs) com teores de RAP acima de 25%, devido as variáveis envolvidas no processo, incluindo: uso de rejuvenescedores, interação e difusão entre ligantes, aumento da susceptibilidade ao trincamento, entre outras.

Bernucci *et al.* (2022) apontam que normas brasileiras de reciclagem a quente em usina (DNIT ES 033, 2005; DER ET-DE-P00-032, 2006; PMSP IE 07, 2010) abordam a dosagem da mistura reciclada, porém dão ênfase aos requisitos volumétricos, que são similares aos das misturas asfálticas convencionais sem o uso de RAP. No entanto, não são fornecidas diretrizes específicas para a seleção do ligante asfáltico.

2.5 Comportamento mecânico e desempenho de MARQs

Segundo Correa *et al.* (2020), embora a utilização do RAP em novas camadas asfálticas venha se destacando nas últimas décadas e diversos países estejam reutilizando o material, ainda é necessário aprofundar o conhecimento sobre o comportamento das misturas recicladas e seu desempenho. Como o material RAP contém ligante asfáltico envelhecido em sua composição, a sua incorporação em altos teores em novas misturas asfálticas poderia produzir misturas mais rígidas quando comparado às sem RAP. Apesar dos diversos estudos sobre o tema, ainda não há um consenso sobre o comportamento desse material.

Esta seção contém um breve panorama pertinente aos efeitos do RAP no comportamento mecânico de misturas recicladas a quente quanto a rigidez, deformação permanente e fadiga. Estes estudos compreendem análises em escala laboratorial desenvolvidas no Brasil e no mundo sem a adição de agentes rejuvenescedores.

Basueny *et al.* (2015) avaliaram a rigidez e a resistência à fadiga de misturas contendo RAP, nas proporções de 0, 15, 25 e 40%, por meio dos ensaios de módulo complexo e vida de fadiga investigados através de testes de tensão-compressão. Os resultados obtidos apontaram misturas com 40% de RAP mais resistentes à fadiga, apesar da falta de tendência

observada na relação do aumento do RAP com o número de ciclos necessários para o rompimento por fadiga. Da mesma forma, em alta frequência e baixa temperatura, foi observado o aumento de rigidez com o acréscimo de RAP, mas sem linearidade dos resultados, sendo a mistura com 25% a que se demonstrou mais rígida. Tal comportamento pode estar relacionado diretamente com a heterogeneidade do material fresado.

Pasetto e Baldo (2017) realizaram ensaios de vida de fadiga, através da viga em flexão a quatro pontos, em misturas com inserção de RAP nas proporções de 0, 20 e 40%. De acordo com os resultados do estudo, o efeito do RAP na resistência à fadiga do concreto asfáltico analisado pode ser avaliado de forma positiva. Além disso, o tipo de ligante afetou a redução da vida de fadiga de misturas recicladas, sendo observado uma maior resistência das misturas contendo ligante modificado em comparação àquelas com ligante convencional. Da mesma forma, a modificação do ligante amenizou os efeitos prejudiciais de envelhecimento das misturas.

Genesseaux *et al.* (2014) avaliaram a durabilidade de misturas asfálticas a quente e morna, convencionais e contendo 50% de RAP. As misturas foram submetidas ao ensaio de vida de fadiga, através do ensaio trapezoidal de 2 pontos submetidos à flexão, concluindo-se que a adição de RAP melhorou o comportamento a fadiga das misturas não envelhecidas, não alterando a resistência à fadiga para misturas quentes envelhecidas, mas diminuindo a resistência das misturas mornas envelhecidas. Além disso, foram realizados os ensaios de afundamento em trilha de roda, resistência ao dano por umidade induzida e módulo complexo. Com relação ao ensaio de afundamento em trilha de roda, misturas com adição de RAP melhoraram o comportamento. De uma forma geral, os resultados apresentados pelos diferentes testes estão acima dos limites exigidos pelas normas europeias, o que aponta para a utilização da reciclagem de misturas asfálticas.

Izaks *et al.* (2015) analisaram, a partir do Simulador de Tráfego Hamburgo e do ensaio de flexão em viga quatro pontos, misturas com elevados percentuais de adição de RAP, nas proporções de 30 e 50%. Verificou-se que todas as misturas apresentaram alta resistência a deformação. Por outro lado, o uso de RAP, especialmente em MARQ com 50% de RAP, diminuiu a resistência à fadiga, provavelmente devido à alta porcentagem de substituição de ligante que enrijece a mistura asfáltica. Com base nos resultados, concluiu-se que é possível projetar MARQ de alta qualidade com até 50% de RAP que atenda aos requisitos volumétricos e de desempenho desejados. Não há diferenças significativas nas propriedades mecânicas (rigidez e comportamento à fadiga) entre as misturas recicladas e virgens. O

aumento do teor de asfalto efetivo das misturas asfálticas recicladas ajudará a aumentar a durabilidade e a resistência à fadiga das misturas asfálticas.

Izaks *et al.* (2020) e Rocha Segundo *et al.* (2016) estudaram também a influência de altos teores de RAP no desempenho de misturas asfálticas de módulo elevado, do francês *Enrobé à Module Élevé* (EME), com resultados que trazem confiança para desenvolver esse tipo de técnica com um desempenho satisfatório. Izaks *et al.* (2020) avaliaram misturas com vários teores de RAP (0%, 25%, 50% e 70%) e dois ligantes, incluindo um ligante modificado com polímero e um convencional. A adição de RAP reduziu a resistência à deformação das misturas, a partir do Simulador de Tráfego Hamburgo, devido à presença de agregados redondos no RAP. Além disso, foram realizados os ensaios flexão em viga quatro pontos, onde houve aumento no módulo de rigidez e redução da resistência a fadiga, à medida que crescia a incorporação de RAP, e pouca variação positiva das misturas recicladas na sensibilidade à água, por meio do ensaio de dano por umidade induzida. Rocha Segundo *et al.* (2016), com utilização do programa PMG/CAP3D, avaliaram estruturas com a presença das MARQ com incorporação de elevado percentual de RAP (maior que 75%) como alternativa para uma camada de ligação e base. Os resultados apontam que as soluções investigadas que fazem uso de material fresado podem compor estruturas utilizadas em rodovias de tráfego médio e alto.

Suzuki (2019), que avaliou misturas recicladas com até 65%, também verificou aumento de rigidez na proporção do aumento de RAP. Da mesma forma, a autora constata aumento dos valores nos ensaios de tração por compressão diametral, módulo de resiliência e módulo dinâmico à medida que o material fresado é adicionado. As misturas com teores maiores que 25% contaram com pré-aquecimento do fresado. O ensaio dinâmico mostrou que misturas com 25% ou menos de RAP são menos rígidas em baixas frequências em comparação com a mistura de referência. Por outro lado, misturas com maiores teores de RAP se tornaram mais rígidas nas mesmas condições. O maior teor de RAP levou também a misturas com maior resistência à deformação permanente, medida pelo *Flow Number* (FN). A utilização de maior teor de RAP (50%) na avaliação de vida fadiga, por meio do ensaio de flexão em viga apoiada de quatro pontos, contra intuitivamente, teve resultado melhor do que mistura com 25%, mas semelhante à mistura de referência.

Centofante *et al.* (2018), Luzzi (2019), Correa *et al.* (2020) e Guerra *et al.* (2020) estudaram misturas com teores de 10, 20 e 30% de RAP, além de uma mistura de referência. Constataram que a utilização do material fresado aumenta a rigidez das misturas, com resultados maiores para resistência à tração e módulo de resiliência. Além disso, Centofante *et*

al. (2018) e Luzzi (2019), apontam que a adição de fresado em misturas asfálticas leva também a aumento da rigidez, por meio dos resultados do ensaio de módulo complexo. Na análise de desempenho à deformação permanente, por meio do ensaio de FN, Centofante *et al.* (2018) apontaram o ganho de resistência, porém para Luzzi (2019), o aumento de RAP reduziu os valores resultantes. Centofante *et al.* (2018), Luzzi (2019) e Guerra *et al.* (2020) apontaram que o efeito da água nas misturas não causou problemas significativos de adesividade, através do ensaio de dano por umidade induzida, de forma a atender às normativas e especificações mínimas. Luzzi (2019) e Correa *et al.* (2020) avaliaram a suscetibilidade à fadiga, por meio do ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão. Concluíram que a adição de RAP, mesmo impactando de forma negativa no comportamento à fadiga, mas dentro de intervalos comuns aos de misturas asfálticas usuais sem o uso de material fresado, constituem uma técnica propícia e importante para a reutilização do material fresado e um menor consumo energético e de recursos naturais.

2.6 Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos

Williams *et al.* (2022) apontaram que nos Estados Unidos, em 2021, 47 milhões de metros cúbicos deixaram de ser lançados em aterros sanitários. Além disso, o uso de RAP representou uma redução de emissões de gases de efeito estufa em 2,6 milhões de toneladas de CO₂eq (equivalentes de dióxido de carbono), o que equivale às emissões anuais de mais de 570.000 veículos de passageiros.

Zaumanis, Mallick e Frank (2014) avaliaram, de forma holística, a viabilidade de produção de misturas asfálticas constituída totalmente por material fresado, indicando uma redução de 20% do consumo energético e de 35% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de massa asfáltica.

A Tabela 2 resume dados provenientes do estudo realizado por Robinette e Epps (2010) como uma forma representativa e comparativa, adotando como base uma mistura convencional com teor de ligante de 5,2%.

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos no meio ambiente associados aos produtos e serviços, tanto na sua fabricação quanto no consumo, têm aumentado o interesse pelo desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com os referidos impactos.

Tabela 2 – Economia gerada com o uso do RAP

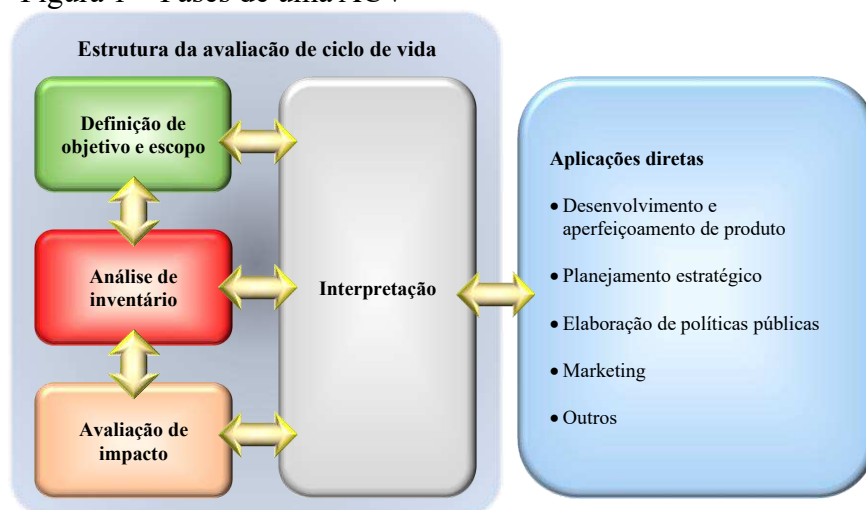
Material	Taxa de RAP (%)	Teor de Ligante no RAP	Substituição de recursos naturais		Energia	Emissões	
			Ligante asfáltico (%)	Agregado (%)	Economia (%)	CO2eq (lbs/ton)	Economia (%)
Mistura convencional	0	0	0	0	0	104,89	0
RAP	15	4	11,5	15,2	5,9	98,59	6
	25		19,2	25,3	9,9	94,39	10
	40		30,8	40,5	15,8	80,09	16

Fonte: Adaptado de Robinette e Epps (2010)

Uma das técnicas desenvolvidas com esse objetivo é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta enfoca os aspectos e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (isto é, do berço ao túmulo) (ABNT, 2014a).

O processo geral de uma ACV é descrito e regido por uma série de padrões produzidos pela *International Organization for Standardization* (ISO). No Brasil, os requisitos e diretrizes gerais são apresentados na ISO 14044, Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Diretrizes (ABNT, 2014b). A partir desta norma, e conforme mostrado na Figura 1, um estudo de ACV consiste em quatro fases que possuem uma abordagem interativa entre si. Vale ressaltar que os resultados da ACV podem oferecer subsídios úteis para uma variedade de processos decisórios por meio das aplicações pretendidas na definição de objetivo e escopo do estudo de ACV ou ICV.

Figura 1 – Fases de uma ACV



Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 14040 (2014a)

A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo em particular. Alguns exemplos desses estudos são os estudos de berço-a-portão (extração de recursos até o portão da fábrica), estudos de portão-a-portão (análise parcial de apenas um valor agregado no processo de toda a cadeia produtiva), partes específicas do ciclo de vida (por exemplo, gerenciamento de resíduos, componentes de um produto) (ABNT ISO 14040, 2014a).

Apesar da metodologia ACV ter surgido na década de 60, destacando-se e estabelecendo-se em processos e serviços em outras indústrias, ela ainda está em um estágio inicial de aplicação em sistemas de infraestrutura (Harvey, Meijer e Kendall 2014). Os primeiros estudos de ACV na infraestrutura do pavimento foram realizados em 1996 nos Estados Unidos por Roudebush (1996), com uma avaliação do ciclo de vida da Engenharia de Valor Ambiental (EVE) para sistemas de pavimentação de concreto e de asfalto. Häkkinen e Mäkelä (1996), na Finlândia, realizaram um estudo de ACV em pavimentos asfálticos e de concreto. Segundo Inym *et al.* (2016), o foco principal dos estudos de ACV de pavimentos existentes nas últimas décadas tem sido principalmente a comparação de pavimentos de asfalto e de concreto.

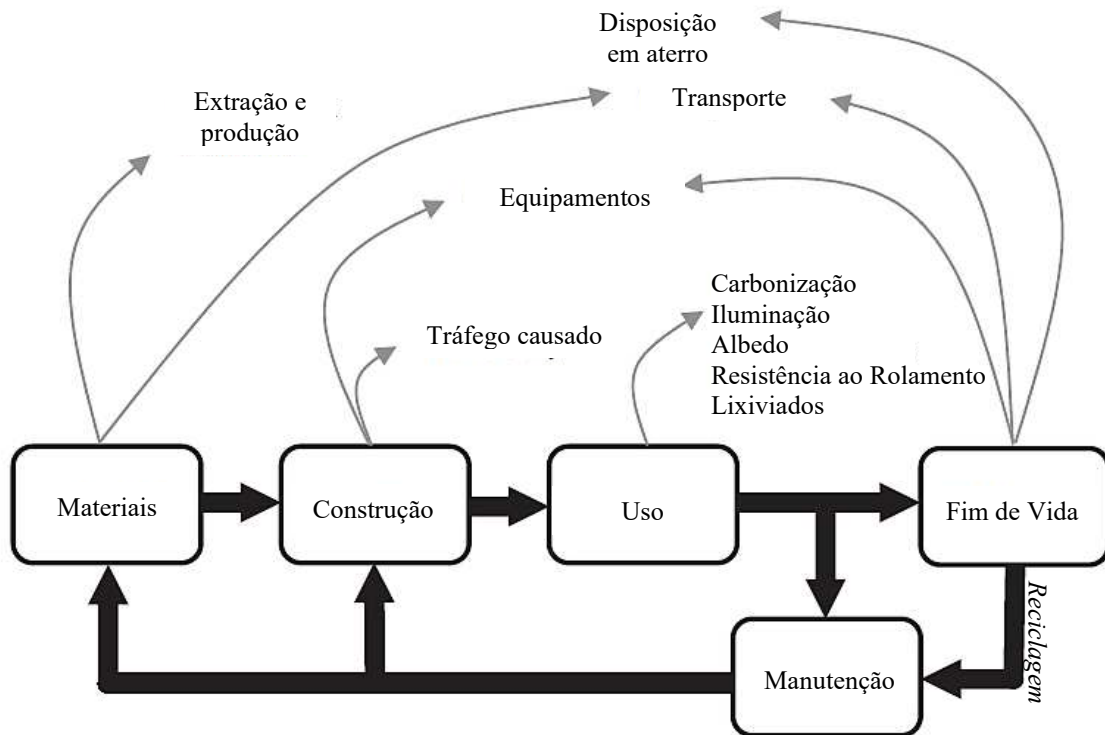
O método padronizado pela ISO possui especificações que variam muito de uma aplicação para outra. Dessa forma, a *Federal Highway Administration* (FHWA), dos Estados Unidos, elaborou a *Pavement Life Cycle Assessment Framework* como um primeiro passo importante na implementação e adoção de princípios de ACV na comunidade de pavimentação. O documento apresenta, juntamente com orientações sobre a abordagem geral, a metodologia, os limites do sistema e as lacunas de conhecimentos específicos para sistemas de pavimentação (Harvey *et al.*, 2016).

A ACV completa de um pavimento deve abranger todas as fases de vida dele (Santero, Masanet e Horvath, 2011). Cada uma dessas etapas é afetada pelo projeto do pavimento, que resulta na seleção das camadas estruturais e dos materiais que, juntamente com a qualidade da construção, determinam o desempenho do pavimento para um dado tráfego, clima e solo nativo (Harvey *et al.*, 2016).

Na Figura 2 é apresentado o esquema do ciclo de vida de um pavimento, onde se encontram relacionados os componentes de ações e interações, assim como os impactos ambientais provocados por cada um dos cinco componentes. Em um estudo de caso na China, as emissões de GEE foram avaliadas e calculadas desde a fase de extração das matérias-primas até a fase de compactação utilizando um método de ACV baseado em processo. Nesse estudo, Ma *et al.* (2016) constataram que 54,01% das emissões de GEE em CO₂eq são

liberados durante a produção da mistura asfáltica, sendo 43,18% gerados somente durante a fase de produção da matéria-prima. O transporte tanto de matérias-primas quanto de misturas asfálticas produz cerca de 1,35% do total de CO₂eq, enquanto 0,86% e 0,61% das emissões totais de GEE são decorrentes das fases de assentamento e compactação, respectivamente.

Figura 2 – Fases do ciclo de vida típico de pavimentos e seus componentes



Fonte: Adaptado de Santero, Masanet e Horvath (2011)

Em um outro estudo de caso, Vidal *et al.* (2013) investigaram a ACV de pavimentos desde a construção até o fim de sua vida, confirmando o impacto crucial da produção de matérias-primas, juntamente com a produção de mistura asfáltica. Conforme destacado anteriormente, a introdução de RAP reduz as emissões de GEE relacionadas à produção de matérias-primas, mas adicionalmente diminui as emissões na fase de final de vida, uma vez que evita o lançamento de material fresado em aterro sanitário. Em detalhes, a pesquisa revela os efeitos benéficos da introdução de RAP em comparação a um pavimento convencional, onde a incorporação de 15% de RAP resulta em uma redução de 13% nas emissões de CO₂eq.

Idealmente, uma ACV examinaria cada uma das fases do ciclo de vida do produto em detalhes. No entanto, devido às restrições de tempo, dados e conhecimento, esse processo é difícil para a maioria dos produtos, incluindo pavimentos. Praticamente todas as avaliações

ambientais são, portanto, forçadas a simplificar seu escopo e examinar apenas as fases e processos que são razoavelmente alcançáveis sob suas restrições individuais. O resultado é um banco de literatura de ACV de pavimentos que é composto por estudos com coberturas variadas, nenhum dos quais atinge o objetivo final de uma ACV verdadeira e completa. De toda forma, muitos estudos seguem as diretrizes, teoria e intenção da ACV o suficiente para serem consideradas, pelo menos, ACVs de pavimentação parcial (Santero, Masanet e Horvath, 2011).

Desta forma, uma divergência constatada por Hoxha *et al.* (2021) foi de que, dos 24 estudos de ACV para misturas de camada de rolamento, a maioria contempla a etapa da produção (97%) e a etapa do processo de construção (58%). Em um número mais limitado de estudos (37%), a etapa de uso foi incluída por meio de medidas de manutenção e reabilitação.

2.7 Tomada de decisões sustentáveis

Na economia clássica, o valor do custo de oportunidade de escolhas de múltiplas alternativas é geralmente expresso em unidades monetárias. No entanto, o valor em um contexto de sustentabilidade pode ter muitas métricas diferentes expressas em muitas unidades diferentes, algumas das quais podem ser controversas ou difíceis de quantificar. Alguns exemplos de valor de sustentabilidade incluem custo do ciclo de vida, emissões de GEE, uso de energia, qualidade da água/ar, geração de resíduos, qualidade de vistas panorâmicas, arte, contexto comunitário, história, continuidade do habitat e desempenho (Van Dam *et al.*, 2015). Ainda segundo os autores, historicamente, o valor das características alternativas do pavimento tem se baseado principalmente na economia, muitas vezes baseando-se apenas no custo inicial de construção. Embora importante, o custo inicial representa uma visão incompleta dos custos e benefícios gerais de um determinado recurso.

Santos *et al.* (2019) apontam que o desenvolvimento de novos materiais e de tecnologias para a incorporação de misturas com altas taxas de RAP, por exemplo, são soluções promissoras e que podem ser consideradas práticas sustentáveis. No entanto, toda a comunidade de pavimentação rodoviária ainda está investigando metodologias e ferramentas para definir o que realmente significa ser sustentável e, assim, realizar uma tomada de decisão sustentável.

Bhat *et al.* (2020) explicam que na prática, apesar dos desenvolvimentos significativos no campo da ACV, as tomadas de decisões se traduzem na eficiência energética e, conseqüentemente, nos benefícios econômicos que impactam no estágio de produção de

uma mistura asfáltica. Por exemplo, o uso de materiais reciclados tem o impacto positivo de reduzir o uso de materiais virgens, ao mesmo tempo que pode ter um impacto adverso no desempenho de longo prazo de um pavimento, aumentando assim seu custo de ciclo de vida e outros impactos associados. Nesses casos, é necessário otimizar e priorizar intencionalmente vários objetivos com base em estimativas quantificáveis de impactos ambientais potenciais. Quando não há referências que fundamentem a tomada de decisão de *trade-off*, ou seja, o processo de escolha entre opções com benefícios e custos distintos, mas que são mutuamente exclusivas ou têm impactos opostos, os custos e benefícios ambientais frequentemente são negligenciados como externalidades em comparação com os custos e o desempenho para os quais existem diretrizes existentes.

Van Dam *et al.* (2015) apontam que, em última análise, essa consideração de *trade-offs* é essencialmente uma análise de custo/benefício feita em um sentido holístico (ou seja, considerando mais do que apenas economia). No documento, os autores descrevem alguns itens-chave a serem considerados ao conduzir uma análise de benefício/custo de características de pavimentação sustentável. Em geral, essas considerações envolvem o seguinte: prioridades e valores da organização ou projeto, desempenho, custo, magnitude e duração do impacto e risco.

2.8 Considerações finais

A revisão bibliográfica foi fundamental para a compreensão aprofundada do estado atual da pesquisa sobre misturas asfálticas recicladas a quente. Ao examinar as principais contribuições acadêmicas e científicas nessa área, foi possível obter uma visão abrangente das metodologias, dos resultados e das tendências recentes.

As limitações do uso do RAP, principalmente o superaquecimento, são detalhes importantes que podem ser melhor avaliados por meio de parâmetros, como o grau de ativação do ligante (em inglês, *Degree of Activity*) (DoA%), ou seja, o quanto do ligante presente no RAP está disponível para reagir com o ligante virgem. Um outro detalhe é a influência da heterogeneidade do material fresado que pode ser controlada com o auxílio de boas práticas de gestão, como o fracionamento.

Uma outra lacuna apontada pela literatura é quanto a previsão de comportamento de misturas recicladas a quente, o que interfere em um diagnóstico prévio mais alinhado ainda na fase de projetos. Desta forma, programas computacionais podem ajudar nas melhores escolhas ainda na fase de concepção dessas misturas.

Por fim, vale ressaltar que todos os artigos da dissertação já possuem uma revisão de literatura, e este capítulo adiciona alguns aspectos que, devido ao espaço limitado nas publicações em revistas científicas ou congressos, não puderam ser tão bem fundamentados. Isso se aplica a todos os artigos que compõem a presente dissertação.

3 ESTUDO DA ADERÊNCIA DOS GANHOS AMBIENTAIS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM RAP AOS ODS

"Este artigo é uma versão revisada e atualizada de um trabalho previamente publicado nos Anais do IV Sustentare e VII WIPIS, com pequenas modificações no texto e na estrutura."

Aderência dos impactos ambientais da produção de misturas asfálticas recicladas a quente às metas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU

Thiago M. da Frota^{a*}, Willyanne F. Rocha^b, Nájila R. A. J. Cabral^b, Juceline B. dos S. Bastos^b, Jorge B. Soares^a

^a Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

^b Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil

***Autor correspondente**

E-mail: thiagofrota@det.ufc.br (Thiago M. da Frota) willyanne.ferreira.rocha60@aluno.ifce.edu.br (Willyanne F. Rocha), najila@ifce.edu.br (Nájila R. A. J. Cabral), jucelinebatista@det.ufc.br (Juceline B. dos S. Bastos), jsoares@det.ufc.br (Jorge B. Soares)

RESUMO

O modo rodoviário brasileiro carece de investimento para ampliação da malha rodoviária e manutenção das existentes. Isso significa impactos ambientais atrelados à produção de novas estruturas de pavimentos, e consequente produção de novas misturas asfálticas, pois há a extração de novas matérias-primas e lançamento de resíduos na natureza. O objetivo desta pesquisa é analisar a aderência dos resultados de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) da etapa de produção de misturas asfálticas recicladas a quente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030. A metodologia consistiu na análise de conteúdo de Bardin (2011) em que 24 metas dos ODS de interface à produção de misturas asfálticas recicladas com relação à incompatibilidade, ou não, quanto às categorias de impactos ambientais do método IMPACT World+. A partir da presente análise, foi possível observar que as categorias de impactos ambientais apresentam significativa relação aos ODS 3, 6, 9, 11, 12, 13, 14, e 15, os quais apresentam objetivos e metas voltados à saúde, água potável e saneamento, inovações e infraestrutura, cidades e comunidades sustentáveis, produção e consumo responsável, mudanças climáticas, ecossistemas aquáticos e ecossistema terrestres. Conclui-se que, devido aos ganhos observados em todas as categorias de impacto, a reciclagem de misturas asfálticas representa para o setor da pavimentação uma prática que contribui para Agenda 2030.

Palavras-chave: reciclagem de pavimentos; Objetivos de Desenvolvimento Sustentável; impactos ambientais.

3.1 Introdução

Os estados membros da Organização das Nações Unidas (ONU) elaboraram em 2015 um plano de ações que, além da sustentabilidade ambiental, visa a inclusão social e o desenvolvimento econômico. Para o cumprimento do documento “Transformando nosso mundo: Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável”, foram estabelecidos 17 Objetivos

de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 1), com 169 metas e número elevado de indicadores com o intuito de monitorar e avaliar as transformações (ONU, 2015). Deste modo, governos, empresas e organizações da sociedade civil estão destinando recursos e promovendo ações para combater a redução de impactos negativos aos ecossistemas ambientais.

O setor de transportes é a principal atividade fonte emissora de Gases de Efeito Estufa (GEE) do setor energético brasileiro. Segundo dados do Observatório do Clima apontaram que, em 2020, o setor correspondeu a 47% das emissões de GEE, sendo o transporte de cargas por caminhões responsável por aproximadamente 40% desse total (Observatório do Clima, 2020). Por outro lado, não há dados nacionais quanto às emissões causadas pelo setor de infraestrutura de pavimentos rodoviários. Além de emissões de GEE, é importante estar ciente quanto a outras categorias de impactos ambientais negativos ao meio ambiente causados pelo setor. A remoção da camada vegetal, alteração da drenagem local, exploração de recursos naturais não renováveis e disposição de resíduos no meio ambiente são alguns dos exemplos (Xiaofeng *et al.*, 2021).

Figura 1 - Ícones oficiais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: ONU (2015)

Diante deste cenário se faz necessário considerar uma análise dos impactos ambientais no contexto do ciclo de vida de um pavimento rodoviário, ou seja, nas fases de

extração de matérias-primas, produção, construção, uso, manutenção e restauração, além da disposição dos resíduos ao final da sua vida útil. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), técnica oriunda da Ecologia Industrial, que vem ganhando espaço no cenário mundial, quantifica os impactos ambientais de um ou mais pontos do ciclo de vida dos produtos ou serviços (ISO, 2006). Os estudos de uma ACV completa aplicada em pavimentos indicam que as etapas que consideram os processos de produção das misturas são as que apresentam os maiores impactos ambientais (Aurangzeb *et al.*, 2014; Farina *et al.*, 2017; Silverio *et al.*, 2021).

O uso de materiais alternativos, processos produtivos aprimorados e o uso de energias renováveis tornaram-se estratégias importantes para reduzir os impactos ambientais e as emissões de GEE na engenharia de pavimentos. Uma das várias alternativas empregadas que visa contornar grande parte desses impactos é a reciclagem de pavimento, técnica centenária que consiste na reinserção do material asfáltico fresado de pavimentos deteriorados, em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), na composição de novas misturas asfálticas ou camadas subjacentes. A vantagem desta técnica também garante competitividade econômica na construção e manutenção de pavimentos asfálticos, visto que o material fresado contém o componente de maior valor econômico agregado da mistura, o ligante asfáltico.

A delimitação geográfica deste estudo traz Fortaleza, capital do estado do Ceará, e sua Região Metropolitana de Fortaleza, a sexta maior região metropolitana do Brasil. Como indicador da situação dos pavimentos dessa região o estudo da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2021) aponta que cerca de 60% dos pavimentos do Ceará são classificados como de regular a péssimo.

Segundo Kühnen *et al.* (2019), a ACV, apesar de avaliar a nível de produto, o uso de métricas de um ACV para o ODS é um novo desafio, pois estas metas, por outro lado, foram desenvolvidas para políticas globais e nacionais. Além disso, as metas e indicadores dos ODS, conforme determinadas pela ONU, são frequentemente qualitativos e não quantitativos. Por conseguinte, o objetivo desta pesquisa é analisar a aderência dos resultados de ACV das práticas de reciclagem em misturas asfálticas recicladas a quente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.

3.2 Fundamentação teórica

A infraestrutura desempenha um papel fundamental em todas as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a economia, o meio ambiente e a sociedade. O reconhecimento da infraestrutura ganhou mais destaque e reconhecimento na última década com as metas dos

ODS e o Acordo de Paris sobre mudanças climáticas. A Figura 2 ilustra o papel da infraestrutura no suporte aos ODS, segundo Salini Impregilo (2016).

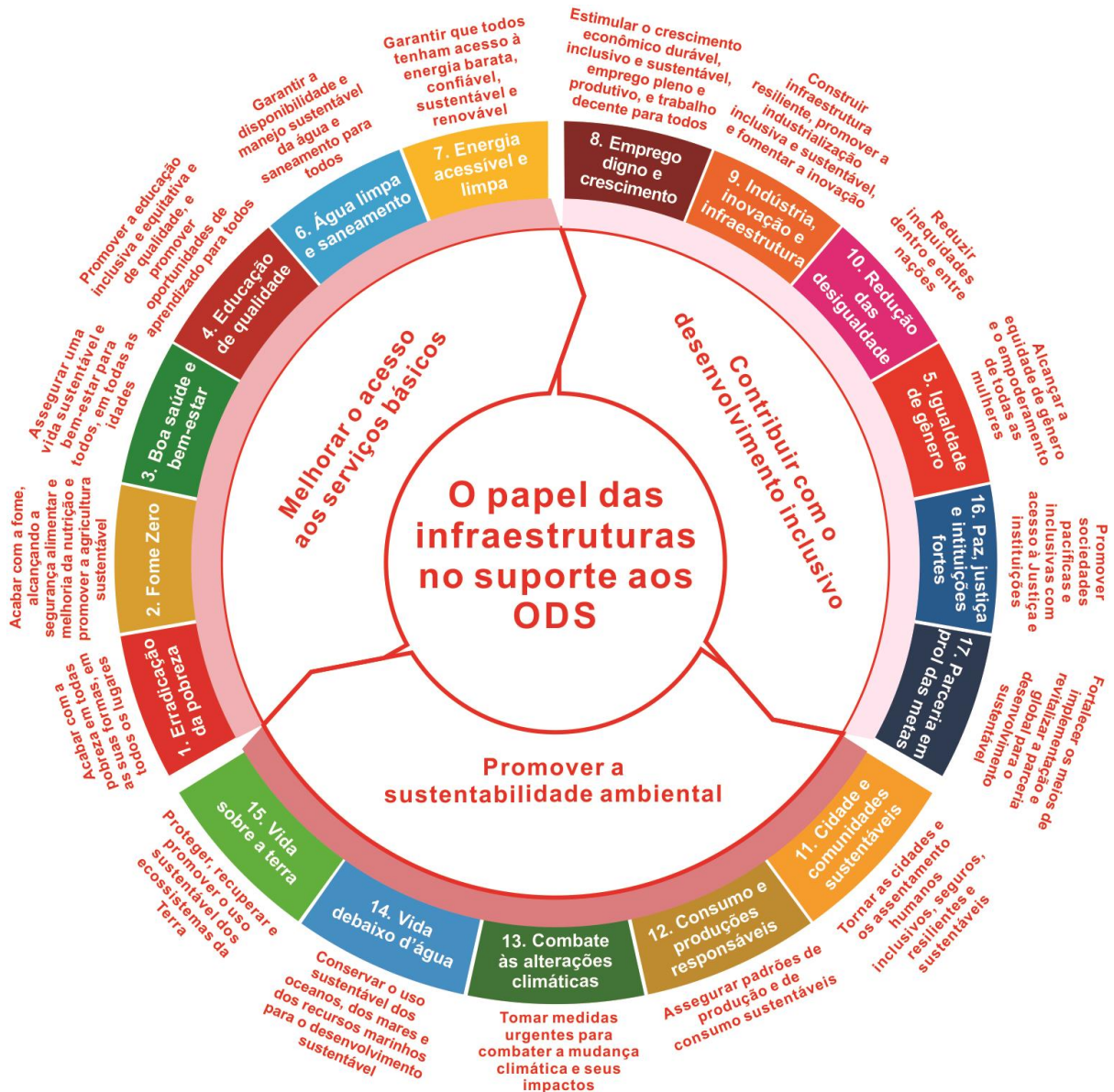
A infraestrutura de transporte é fundamental para o desenvolvimento econômico e social de uma nação, interligando os entes das cadeias produtivas entre si e passageiros aos pontos de destino. No Brasil, cerca de 65% da movimentação de mercadorias e 95% da de passageiros estão concentrados no modal rodoviário (CNT, 2021). Ainda segundo a pesquisa, o país possui 13% da sua malha rodoviária total pavimentada, sendo 40% desta avaliada numa situação de ruim à péssima, atrelada principalmente aos defeitos de fadiga e deformação permanente. Assim, significativo investimento é necessário para ampliação da malha rodoviária e manutenção daquelas existentes.

A indústria do asfalto é a mais ativa em termos de reciclagem nos Estados Unidos, com mais de 99% do RAP retornando para a cadeia produtiva. Segundo pesquisa realizada em 2021 pela NAPA (*National Asphalt Pavement Association*), estima-se que a economia combinada de ligante asfáltico e agregados com a utilização do RAP tenha sido de 3,4 bilhões de dólares, além de um volume de 47 milhões de metros cúbicos que deixaram de ser lançados em aterros sanitários (Williams *et al.*, 2022).

Na Europa, a Alemanha é o país com maior disponibilidade de RAP e, segundo dados publicados pela EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) em 2020, foram reutilizados 84% material fresado para a produção de misturas asfálticas usinadas a quente ou mornas, o que corresponde a aproximadamente 10 milhões de toneladas de material. Finlândia e Irlanda reutilizaram 100% do RAP disponível para os mesmos tipos de mistura (EAPA, 2021).

No Brasil ainda não há dados relevantes quanto a geração e uso de RAP, apesar de haver diversas experiências exitosas em todo o país, indicando grande potencial na geração e uso de RAP e, conseqüentemente, oportunidades para o setor. Além disso, o uso do RAP vem ganhando força em território brasileiro nos últimos anos devido às normatizações e regulamentações do governo e órgãos responsáveis (BRASIL, 2021; DNIT, 2021).

Figura 2 - O papel das infraestruturas no apoio as ODS



Fonte: Salini Impregilo (2016)

3.3 Metodologia

A análise de aderência dos impactos ambientais da produção de misturas asfálticas recicladas com os ODS, e suas respectivas metas, deu-se por análise de conteúdo de Bardin (2011), considerando as fases de análise documental: pré-análise; exploração do material; tratamento dos resultados alcançados e interpretação destes.

Dessa maneira, a fase de pré-análise consistiu na escolha dos documentos que se relacionam aos objetivos da presente análise, que tenham relação com as Categorias de Impacto do ACV, *IMPACT World+* (Bulle *et al.*, 2019), e dos ODS. Assim, os documentos

selecionados consistiram em: categorias de impactos ambientais da produção de misturas recicladas determinados a partir de *software* SimaPro (PRé Consultants, 2019), para Avaliação do Ciclo de Vida e *United Nations* (2018).

A fase de exploração do material selecionado na fase de pré-análise consistiu na categorização e agregação dos 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável as 12 Categorias de Impactos da ACV, por análise de aderência ao nível de meta.

O tratamento dos resultados alcançados e interpretação destes que consistiu na terceira etapa, deu-se por meio da interpretação dos resultados obtidos. Assim identificando-se o nível de aderência das categorias de impacto da ACV aos ODS e o embasamento científico para tal resultado.

Desta maneira, a presente análise engloba os 17 ODS e suas 169 metas estabelecidas em nível mundial, bem como as Categorias de Impactos por método *IMPACT World+* determinados a partir de ACV, a saber: Mudança Climática (MC); Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF); Depleção da Camada de Ozônio (DCO); Ecotoxicidade da Água Doce (ETA); Toxicidade Humana Cancerígena (THc); Toxicidade Humana não Cancerígena (THnc); Acidificação de Água Doce (AA); Acidificação Terrestre (AT); Eutrofização da Água Doce (EA); Eutrofização da Água Marinha (EM); Formação de Material Particulado (FMP) e Radiação Ionizante (RI).

3.4 Resultados e discussões

Em cada uma das Categorias de Impacto têm-se diferentes aderências aos ODS, onde: Mudança do Clima apresenta 35% (ODS 3, 9, 11, 12, 13 e 15); Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) tem 41% (ODS 3, 6, 9, 11, 12, 13 e 15); Depleção da Camada de Ozônio (DCO) contém 35% (ODS 3, 6, 11, 12, 13 e 15); Ecotoxicidade da Água Doce (ETA) inclui 35% (ODS 3, 6, 11, 12, 13 e 15); Toxicidade Humana Cancerígena (THc) e não Cancerígena (THnc) têm 41% (ODS 3, 6, 9, 11, 12, 13 e 14); Acidificação de Água Doce (AA) adere a 41% (ODS 3, 6, 9, 11, 12, 13 e 15); Acidificação Terrestre (AT) abrange 35% (ODS 3, 9, 11, 12, 13 e 15); Eutrofização da Água Doce (EA) apresenta 35% (ODS 3, 6, 11, 12, 13 e 15); Eutrofização da Água Marinha (EM) contém 41% de aderência (ODS 3, 6, 11, 12, 13, 14 e 15); Formação de Material Particulado (FMP) tem 29% de aderência (ODS 3, 9, 11, 12 e 13); Radiação Ionizante (RI) possui 23% (ODS 3, 11, 12 e 13), de acordo com o Tabela 1.

Tabela 1- Aderência das Categorias de Impactos ACV método IMPACT WORLD+ aos ODS.

ODS	Metas	Categorias de impactos ACV - IMPACT WORLD+.											
		(MC)	(FOF)	(DCO)	(ETA)	(THc)	(THnc)	(AA)	(AT)	(EA)	(EM)	(FMP)	(RI)
3	3.3				x								
	3.6									x	x		
	3.9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	4.7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	6.3		x		x	x	x						
	6.4				x			x		x	x		
	6.6				x			x		x	x		
9	9.4	x	x	x		x	x	x	x			x	
	9.a												
11	11.3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	11.6	x	x	x		x	x	x	x			x	
12	12.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	12.4		x	x	x	x	x	x	x			x	x
	12.5									x	x		
	12.c	x	x	x		x	x					x	x
13	13.3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
14	14.1										x		
	14.2										x		
	14.3					x	x						
	14.c										x		
15	15.1	x	x	x	x			x	x	x			
	15.3								x				

Fonte: Autores (2022).

A partir da presente análise, foi possível observar que a compatibilidade dos ODS e as Categorias de Impacto do ACV apresentam significativa relação aos ODS 3, 6, 9, 11, 12, 13, 14, e 15, os quais apresentam objetivos e metas voltados à saúde, água potável e saneamento, inovações e infraestrutura, cidades e comunidades sustentáveis, produção e consumo responsável, mudanças climáticas, ecossistemas aquáticos e ecossistema terrestres.

No que se refere às metas que se relacionam às Categorias de Impacto, tem-se a Mudança do Clima com 9 metas; Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) com 11 metas; Depleção da Camada de Ozônio (DCO) com 10 metas; Ecotoxicidade da Água Doce (ETA) com 11 metas; Toxicidade Humana Cancerígena (THc) e não Cancerígena (THnc) ambas com 11 metas; Acidificação de Água Doce (AA) com 11 metas; Acidificação Terrestre (AT) com 10 metas; Eutrofização da Água Doce (EA) 10 metas; Eutrofização da Água Marinha (EM) com 12 metas; Formação de Material Particulado (FMP) com 9 metas; Radiação Ionizante (RI) com 7 metas, de acordo com o Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 2 – Categoria de Impacto ACV método IMPACT WORLD+ e Metas dos ODS

Categorias IMPACT WORLD+	ODS - METAS
Mudança Climática (MC)	3.9; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.c; 13.3; 15.1
Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF)	3.9; 6.3; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.4; 12.c; 13.3; 15.1
Depleção da Camada de Ozônio (DCO)	3.9; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.4; 12.c; 13.3; 15.1
Ecotoxicidade da Água Doce (ETA)	3.3; 3.9; 6.3; 6.4; 6.6; 11.3; 12.2; 12.4; 13.3; 15.1
Toxicidade Humana Cancerígena (THc)	3.9; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.4; 12.c; 13.3; 14.3
Toxicidade Humana não Cancerígena (THnc)	3.9; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.4; 12.c; 13.3; 14.3
Acidificação de Água Doce (AA)	3.9; 6.4; 6.6; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.4; 13.3; 15.1
Acidificação Terrestre (AT)	3.9; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.4; 13.3; 15.1; 15.3
Eutrofização da Água Doce (EA)	3.6; 3.9; 6.4; 11.3; 12.2; 12.5; 13.3; 15.1
Eutrofização da Água Marinha (EM)	3.6; 3.9; 6.4; 11.3; 12.2; 12.5; 13.3; 14.1; 14.2; 14.c
Formação de Material Particulado (FMP)	3.9; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.4; 12.c; 13.3
Radiação Ionizante (RI)	3.9; 11.3; 12.2; 12.4; 12.c; 13.3

Fonte: Autores (2022)

Dentre estas, as metas que aparecem com maior frequência são: 3.9; 4.7; 9.4; 11.3; 11.6; 12.2; 12.4 e 13.3, de acordo com o Tabela 3, as quais relacionam-se a: redução de mortes e contaminação do ar, água e solo por produtos químicos; eficiência do uso de recursos, processos industriais limpos e ambientalmente adequados; urbanização sustentável; redução de impacto ambiental e ações para qualidade do ar; gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais; manejo sustentável de produtos químicos em todo o ciclo de vida destes, e redução do seu lançamento no ar, água e solo; redução de impacto e voltados às mudança do clima.

Tabela 3 – Metas mais frequentes de aderência às categorias de impacto de acordo com o método IMPACT World+

Metas	Objetivo a ser alcançado
3.9	Reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo.
9.4	Modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente adequados.
11.3	Aumentar a urbanização inclusiva e sustentável.
11.6	Reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros.
12.2	Alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.
12.4	Alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.
13.3	Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima.

Fonte: Autores (2022).

Quanto ao objetivo de alcançar uma infraestrutura sustentável na pavimentação rodoviária, os ODS 3, 9 e 11 estão relacionados direta ou indiretamente com, especificamente as metas 3.6, 9.1, 9.4, 9a e 11.2 (Acai *et al.*, 2019). De acordo com o *National Asphalt Pavement Association* (NAPA, 2020), os ODS que estão mais pertinentes aos produtores de misturas asfálticas que outros, sendo os ODS 3, 4, 8, 9, 10, 11, e 12. NAPA (2020) também aponta que em planos ou relatórios de sustentabilidade de empresas da indústria de asfalto já trazem elementos, metas, métricas de sustentabilidade vinculados com a estratégia de negócios. A *CRH Americas Materials*, empresa que mais recicla materiais de construção nos Estados Unidos, por exemplo, em seu relatório de sustentabilidade de 2021 (CRH, 2022), identifica as ODS 9, 11, 12 e 13 como sendo os mais alinhados e com maior impacto e influência.

De forma geral, a comunicação do compromisso com as ODS é feita em nível corporativo. Por outro lado, o alcance das metas dos ODS é dependente dos produtos e serviços, implicando que as empresas sejam capazes de usar métricas que mostrem se (e se sim, como) produtos existentes ou novos contribuem para apoiá-las (*United Nations Environment Programme*, 2020).

Frota *et al.* (2022) apresentam resultados do estudo de ACV na produção de misturas asfálticas produzidas na cidade de Fortaleza. A Tabela 4 traz os resultados da AICV da mistura convencional sem RAP (MRef), em todas as categorias de impacto consideradas. A

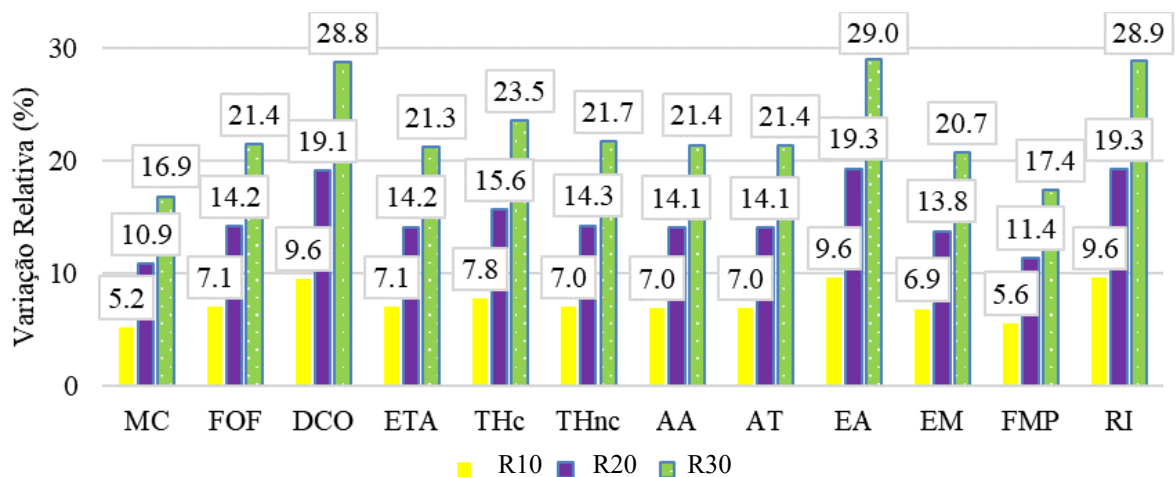
Figura 3 apresenta a variação relativa das categorias conforme as misturas asfálticas recicladas analisadas (R10, R20 e R30), sendo calculadas com base na mistura convencional do berço ao portão. A lógica da interpretação dos resultados é entendida de modo que números relativos negativos associados às misturas recicladas representem uma piora nos resultados de potenciais impactos da AICV em relação à mistura convencional. Por outro lado, os números positivos representam melhoras no perfil ambiental.

Tabela 4 – AICV da mistura convencional (Mref).

Categoria de impacto	Unidade	Mref
Mudança climática (MC)	kg CO2 eq	4,35E+01
Formação de oxidantes fotoquímicos (FOF)	kg NMVOC eq	3,49E-01
Depleção da camada de ozônio (DCO)	kg CFC-11 eq	4,56E-05
Ecotoxicidade da água doce (ETA)	CTUe	1,36E+05
Toxicidade humana cancerígena (THc)	CTUh	4,78E-07
Toxicidade humana não cancerígena (THnc)	CTUh	2,13E-06
Acidificação de água doce (AA)	kg SO2 eq	9,12E-07
Acidificação terrestre (AT)	kg SO2 eq	7,85E-04
Eutrofização da água doce (EA)	kg PO4 eq	7,13E-03
Eutrofização da água marinha (EM)	kg N eq	6,89E-03
Formação de material particulado (FMP)	kg PM2.5 eq	2,82E-02
Radiação ionizante (RI)	Bq C-14 eq	1,17E+03

Fonte: Frota *et al.* (2022)

Figura 3 - Potenciais impactos ambientais relativos das misturas recicladas (R10, R20 e R30) comparadas à mistura de referência, Mref, na etapa de materiais.



Fonte: Frota *et al.* (2022).

A produção de misturas asfálticas a partir da reciclagem de pavimento, que representa a utilização de resíduos do material asfáltico de pavimentos deteriorados, mostra-se sustentável, economicamente viável e apresenta considerável aderência aos ODS.

A partir dos resultados da presente investigação, é notória a compatibilidade dos ODS com as Categorias de Impactos do ACV, as quais apresentam considerável redução de impacto quando comparada às técnicas convencionais da produção de misturas asfálticas.

3.5 Conclusões

Conclui-se que a técnica de reciclagem de misturas asfálticas vai muito além de ganhos econômicos já conhecidos, uma vez que reconhecidamente se adequam também aos ODS e suas metas relacionadas à saúde, água potável e saneamento, inovações e infraestrutura, cidades e comunidades sustentáveis, produção e consumo responsável, mudanças climáticas, ecossistemas aquáticos e terrestres.

Essa investigação permitiu inferir que as boas práticas de reciclagem contribuem significativamente para o alcance de compromissos firmados internacionalmente, pelo Brasil, com potenciais reflexos positivos para o desenvolvimento sustentável, também, em nível local.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental (LERCA), do Departamento da Construção Civil, do IFCE Campus Fortaleza. Os autores agradecem à ANP/Petrobras pela bolsa do primeiro autor, à Funcap pela bolsa da segunda e quarta autoras, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do quinto autor; ao CNPq (CNPq 408682/2021-3) pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

ACAI, J.; AMADI-ECHENDU, J. Pavement Infrastructure Sustainability Assessment: A Systematic Review. *In: PORTLAND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY (PICMET)*, 2018, Portland. **Proceedings**[...] IEEE, 2018.

AURANGZEB, Q. *et al.* Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resource, Conservation and Recycling*, v. 83, p. 77–86, 2014.

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2011.

BRASIL. **Resolução nº 14**, de 8 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Edição 129, n. 129, p. 53, 12 jul. 2021.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 033/2021: Pavimentação - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2021.

BULLE, C. *et al.* IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 9, p. 1653-1674, 2019.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2021: Relatório gerencial**. Brasília, 2021.

CRH. **2021 Annual Report and Form 20-F**. CRH PLC, Dublin, Ireland, 2022. Disponível em: <https://www.crh.com/media/4081/crh-annual-report-2021.pdf>.

EAPA. **Asphalt in Figures 2020**. European Asphalt Pavement Association, 2021.

FARINA, A. *et al.* Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 117, p. 204–212, 2017.

FROTA, T. M.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. Potenciais impactos ambientais na produção de misturas asfálticas recicladas aplicando ACV *cradle-to-gate*: estudo de caso de Fortaleza. 2022 *In: XXI CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO (CILA)*, Puntadel Leste **Anais [...]**. Punta del Leste, Uruguai, 2022.

ISO. **ISO 14044: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines**. Geneva, Switzerland, 2006.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões brasileiras de Gases do Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020**. Documento Analítico, 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 20 de maio de 2022.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/download/50190/91863>. Acesso em: 20 de maio de 2022.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Tutorial**. LE Amersfoort, The Netherlands: PRé Sustainability, 2019.

SIVERIO LIMA, M. S.; HAJIBABAEI, M.; HESARKAZAZI, S.; SITZENFREI, R.; BUTTGEREIT, A.; QUEIROZ, C.; HARITONOV, V.; GSCHÖSSER, F. Determining the Environmental Potentials of Urban Pavements by Applying the Cradle-to-Cradle LCA Approach for a Road Network of a Midscale German City. **Sustainability**, vol. 13, p. 12487, Salini Impregilo (2016). Sustainability Report 2016. Salini Impregilo S.p.A., Milan, Italy. Disponível em: www.saliniimpregilo.com/static/upload/sus/sustainability-report-2016.pdf

SANYÉ - MENGUAL, Esther; SALA, Serenella. Life Cycle Assessment support to environmental ambitions of EU policies and the Sustainable Development Goals. **Integrated Environmental Assessment and Management**. [S. l.]: Wiley, 21 fev. 2022.

WILLIAMS, B. A.; WILLIS, J. R.; SHACAT, J. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2021**, 12th Annual Survey (IS 138). National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, Maryland, 2022.

XIAOFENG, L.; SIWEI, L.; YUE, Y. **Analysis of The Impact of Highway Construction Related to Social and Environment**. In: L. ZHANG, S. DEFILLA, & W. CHU, ORGS. E3S WEB OF CONFERENCES, v. 233, p. 01113, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202123301113.

4 EFEITO DA FRAÇÃO FINA DO RAP NA RESISTÊNCIA MECÂNICA E NA RIGIDEZ DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE

"Este artigo é uma versão revisada e atualizada de um trabalho previamente publicado nos Anais do XVIII Congresso Rio de Transportes, com pequenas modificações no texto e na estrutura."

Influência da fração fina do RAP na rigidez e na resistência mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente

Thiago M. da Frota^{a*}, Juceline B. dos S. Bastos^b, Jorge B. Soares^a

^a Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

^b Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil

*Autor correspondente

E-mail: thiagofrota@det.ufc.br (Thiago M. da Frota), jucelinebatista@det.ufc.br (Juceline B. dos S. Bastos), jsoares@det.ufc.br (Jorge B. Soares)

RESUMO

Este trabalho avaliou o efeito da utilização da fração fina de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) no comportamento de misturas asfálticas recicladas. Foram dosadas três misturas pela metodologia Superpave, sendo uma com ligante virgem (Mref) e ainda com 15 e 30% do ligante do RAP em substituição a massa total do ligante da mistura (R15 e R30, respectivamente). Além disso, o grau de ativação - DoA (Degree of Activity) do ligante foi considerado para a adição do fresado e para determinar a temperatura de pré-aquecimento das misturas com esse resíduo. As misturas foram submetidas a ensaios de rigidez por meio do ensaio de Módulo Dinâmico (MD), com modelagem 2S2P1D, e Resistência a Tração por Compressão Diametral (RT). Os resultados indicaram que a adição de fresado aumentou a rigidez somente na R30. Por outro lado, a resistência à tração aumentou com o aumento de teor de fresado. De um modo geral, houve melhora nas propriedades analisadas, o que projeta o uso da fração fina de RAP em novos projetos de misturas recicladas.

Palavras-chave: Reciclagem de pavimentos. Ativação do ligante. RAP. Módulo dinâmico. Resistência mecânica.

4.1 Introdução

Ao final do ciclo de vida útil dos pavimentos, vários resíduos são gerados e dispostos em bota-foras ou em aterros, gerando um passivo ambiental. Dentre os resíduos, o de maior valor econômico agregado é aquele proveniente da fresagem do revestimento asfáltico, em inglês RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) e, por consequência, é incentivado a reincorporação deste em novos pavimentos. Os Estados Unidos, Japão e Europa reutilizam quase que a totalidade de RAP em novas misturas (99, 99 e 90%, respectivamente) (West e Copeland, 2015; Williams *et al.*, 2022; EAPA, 2020).

Apesar dos benefícios do uso sustentável de materiais reciclados, as legislações nos diversos países tendem a limitar o uso de RAP em misturas quentes e mornas a teores reduzidos, de 10 a 20% de fresado em relação ao peso total da mistura. Além da necessidade de adaptação das usinas asfálticas, essa limitação está relacionada com a alta variabilidade nas propriedades do RAP e pela falta de entendimento sobre os mecanismos envolvidos entre o material fresado e os materiais virgens da mistura asfáltica (Lo Presti *et al.*, 2016).

Segundo West e Copeland (2015), em 2013 o teor de RAP em misturas asfálticas produzidas no Japão era em média 47% do peso total delas. Os autores apontam que um dos principais aspectos no qual os japoneses atribuem o uso bem-sucedido de altos níveis de RAP em misturas à quente é o foco na qualidade com redução da variabilidade, através do fracionamento, por exemplo. De acordo com Williams (2022), 25% de todo RAP utilizado nos Estados Unidos em 2021 passaram por um processo de fracionamento de no mínimo 2 frações. De acordo com Genesseeux (2015), o destorroamento e o fracionamento do RAP podem proporcionar maior controle na dosagem de misturas recicladas. A autora ainda aponta que a parte mais fina de uma mistura é a parte mais rica em ligante, devido a maior superfície específica dos finos.

A incorporação de RAP nas usinas também deve ser observada. A abordagem mais comum para secar e aquecer o RAP é a utilização do superaquecimento de agregados virgens a uma temperatura superior a necessária para a realização da mistura. Segundo Nguyen (2009), tal técnica pode fazer com que o RAP e o ligante virgem sofram de endurecimento e envelhecimento excessivos devido ao contato das finas camadas de ligante com as superfícies extremamente quentes (275°C) na presença de oxigênio. Lo Presti *et al.* (2019) apontam que cada RAP tem uma quantidade mínima de ligante envelhecido que estará disponível ou ativo sob certas condições de produção, isto é, tempo e temperatura, sendo esta uma propriedade intrínseca do material reciclado definida como grau de ativação do ligante (ou DoA, do inglês *Degree of Activity*).

Assim, as práticas de gerenciamento somadas às técnicas de inserção do RAP na mistura podem resultar em misturas recicladas com maior qualidade e alto aproveitamento de ligante (Genesseeux, 2015), além de estarem ligadas às práticas de sustentabilidade ambiental. Além disso, apesar das recentes resoluções e norma técnica (Brasil, 2021; DNIT-ES 033/2021), não há indicações de quantidades e frações na aplicação em campo e nem recomendações quanto à dosagem das misturas recicladas. Nesse contexto, o objetivo deste artigo é avaliar a influência da incorporação da fração fina de RAP (<4,75mm) na rigidez e na resistência mecânica em misturas asfálticas recicladas a quente.

4.2 Materiais e métodos

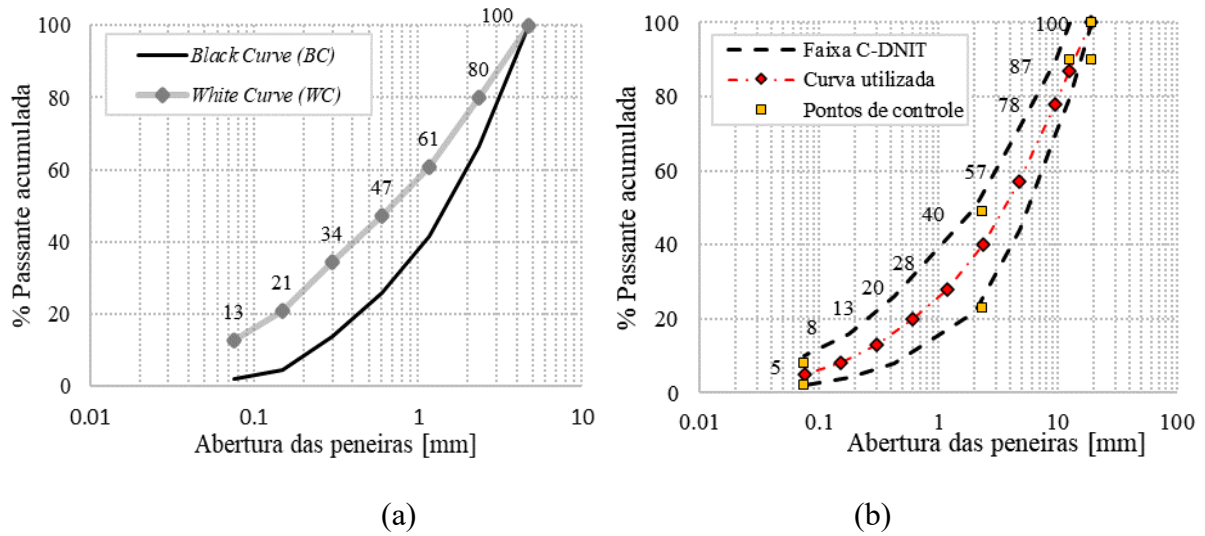
Os agregados minerais de origem granítica utilizados nesta pesquisa foram coletados na empresa Insttale Engenharia e são oriundos da pedreira Ponta da Serra Mineração LTDA, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza. Esses agregados apresentaram: absorção de 0,65% (DNIT-ME 413/2021) e abrasão Los Angeles de 39% (DNER-ME 035/98). O material fresado, também coletado na referida empresa, apresentou teor de ligante 5,9% (DNIT-ME 158/2011) e densidade máxima medida de 2,366, conforme procedimento da norma DNIT-ME 427/2020.

Como a inserção do RAP na mistura faz parte do objeto de estudo, decidiu-se padronizar as características volumétricas das misturas asfálticas o tanto quanto possível. Dessa forma, optou-se pelo fracionamento dos agregados e por utilizar a série de peneiras da AASHTO M 92-10, pois esta permite a obtenção de menor amplitude no tamanho dos grãos entre as peneiras quando comparada a série de peneiras do DNIT.

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70, Performance Grade (PG) 64-XX (AASHTO, M 320-21), sendo processado na Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor) da Petrobras, em Fortaleza – CE. Com o auxílio do viscosímetro rotacional *Brookfield* (ABNT NBR 15184/2004), foram obtidas as temperaturas na faixa de 150 - 158°C para usinagem e 140 - 144°C para compactação, sendo adotadas as temperaturas 154°C e 142°C, respectivamente, para todas as misturas analisadas.

A dosagem da mistura de referência (Mref) seguiu a metodologia Superpave (AASHTO, M 323-17). Para as misturas recicladas a adição do RAP foi baseada no parâmetro RBR (RAP Binder Ratio), ou seja, proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. Assim, as misturas com 15 e 30% RBR foram denominadas R15 e R30, respectivamente. Foi estipulado o Volume de Vazios (Vv) de 4% e fixados 100 giros no compactador giratório (CGS) para mistura de referência. Já para as misturas recicladas, o número de giros foi alterado para manter os volumes de vazios e mesmo teor total de ligante da Mref. A Figura 1 (a) apresenta a granulométrica dos agregados do RAP utilizada na curva granulométrica, *White Curve*, proposta para a presente pesquisa, sendo adequada aos limites da Faixa C do DNIT 031/2006 e dos pontos de controle (AASHTO, M 323-17), conforme Figura 1 (b).

Figura 1 - Composição granulométrica: (a) do RAP, (b) das misturas asfálticas.



Fonte: Autores

O procedimento de secagem do RAP ocorreu ao ar livre por 5 horas, sendo o mesmo posteriormente fracionado no peneirador mecânico para se obter a parte correspondente a fração fina, aqui denominada a porção passante na peneira 4,75mm. As amostras coletadas foram homogêneas e reduzidas em amostras menores por quarteamento.

A temperatura de pré-aquecimento do RAP foi definida conforme procedimentos adaptados de Pires (2018) e Gaspar (2019). O procedimento consiste em submeter amostras com 100% RAP, condicionadas em diferentes temperaturas, ao ensaio de Resistência a Tração por compressão diametral (RT) (DNIT-ME 136/2018). A avaliação do grau de ativação do ligante utiliza o parâmetro DoA%, calculado conforme Equação (1), relacionando o valor de RT obtido em cada temperatura de ensaio ($RT_{X^{\circ}C}$) com o valor máximo obtido de RT ($RT_{máx^{\circ}C}$) para toda a faixa de temperaturas analisadas.

$$DoA_{\%} = 100 \times \frac{RT_{X^{\circ}C}}{RT_{máx^{\circ}C}} \quad (1)$$

A avaliação da rigidez sob a ótica do regime viscoelástico linear foi realizada por meio do ensaio de Módulo Dinâmico (DNIT ME 416/2019). As amostras foram submetidas às temperaturas de -10; 4; 20; 40 e 54°C e, em cada uma, aplica-se um carregamento senoidal de frequências de 25,0; 10,0; 5,0; 1,0; 0,5 e 0,1Hz. O ensaio foi realizado com uso do equipamento UTM-25 (*Universal Testing Machine*) com os deslocamentos avaliados por meio

de 3 LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*). A Figura 2 apresenta o Corpo de Prova (CP) disposto com o aparato necessário para a realização do ensaio.

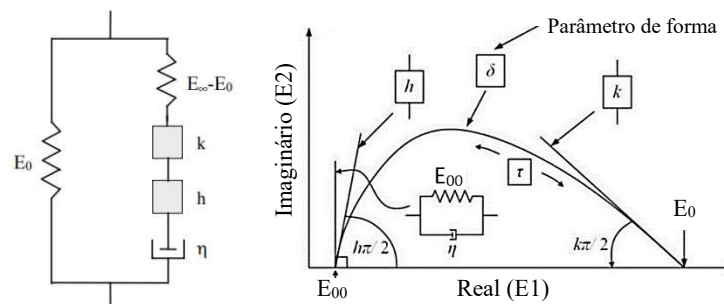
Figura 2 – CP preparado para realização do ensaio de Módulo Dinâmico na UTM-25.



Fonte: Autores

As faixas de cargas aplicadas para resultar em deformações axiais dentro da zona Visco Elástica Linear (VEL) foram entre 50 e 75 *micro-strains* ($\mu\text{m/m}$). A interpretação dos dados experimentais das misturas foi possível por meio da utilização do modelo 2S2P1D (2 *Springs*, 2 *Parabolic*, 1 *Dashpot*), apresentado na Figura 3 (Di Benedetto *et al.*, 2004). Dessa forma, foram elaboradas as curvas mestras de ângulo de fase e módulo dinâmico, na temperatura de referência de 20°C, espaço Cole-Cole e Diagrama de Black, que representam o comportamento viscoelástico do material em qualquer temperatura e frequência de carregamento.

Figura 3 – Representação do análogo mecânico do modelo 2S2P1D (esquerda) e parâmetros no espaço Cole-Cole (direita).

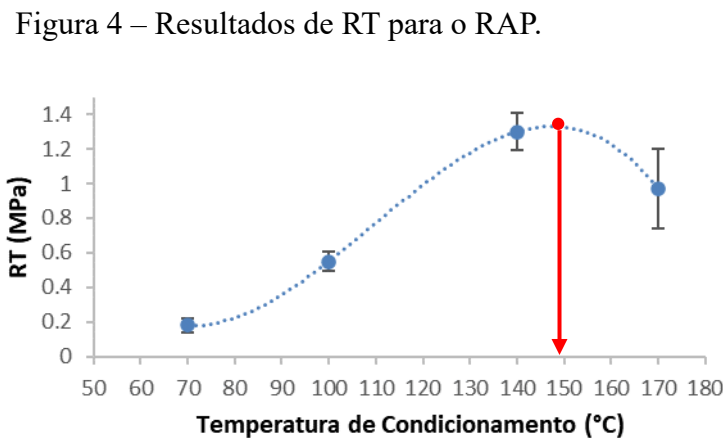


Fonte: Adaptado (Di Benedetto *et al.*, 2004)

4.3 Resultados e discussões

4.3.1 Grau de ativação do ligante do RAP

A Figura 4 apresenta os resultados de RT obtidos nas temperaturas de condicionamento (70, 100, 140 e 170°C). Foi excluída a temperatura de 190°C, pois os corpos de provas desagregaram após desmolde. Seguindo a evolução do comportamento da variação de RT, a temperatura adotada de pré-aquecimento do RAP, por meio de uma linha de tendência, foi de 150°C por 4 horas. Essa temperatura indica o grau de ativação máximo do ligante envelhecido presente no RAP.



Fonte: Autores

4.3.2 Dosagem e parâmetros volumétricos

O teor de ligante de projeto para todas as misturas foi fixado a partir da mistura de referência. Dessa forma, a variação do número de giros no CGS foi necessária para que as misturas recicladas atingissem V_v de 4,0%. Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos para o teor de ligante de projeto, assim como os valores calculados de teor de ligante novo adicionado, VAM (Vazios do Agregado Mineral), RBV (Relação Betume-Vazios), MEA (Massa Específica Aparente).

Tabela 1 – Parâmetros volumétricos obtidos com a dosagem Superpave

Mistura	Volume de vazios (%)	Teor de ligante novo adicionado (%)	Teor de ligante Total (%)	VAM (%)	RBV (%)	MEA (g/cm ³)	CGS (n° giros)
Mref	4,00	4,50	4,50	14,18	72,91	2,453	100
R15		3,83		14,30	71,58	2,442	95
R30		3,15		14,22	72,55	2,451	90

Fonte: Autores.

A partir dos dados, nota-se uma perspectiva de economia com a diminuição do teor de ligante novo adicionado. Vale ressaltar a diminuição de energia, representada pelo menor número de giros no CGS, com o aumento do teor de fresado para atingir o Vv de projeto.

4.3.3 Módulo Dinâmico

As médias de dados experimentais, obtidos de 3 amostras por mistura, foram modeladas utilizando o modelo 2S2P1D para a construção do espaço Cole-Cole (Figura 4), Diagrama de Black (Figura 5), das curvas mestras de módulo dinâmico (Figura 6) e ângulo de fase (Figura 7) das misturas. Os valores encontrados no modelo e as constantes C1 e C2 do WLF (William, Landel e Ferry), utilizadas para translação das diferentes temperaturas e montagem das curvas mestras, estão apresentadas na Tabela 2.

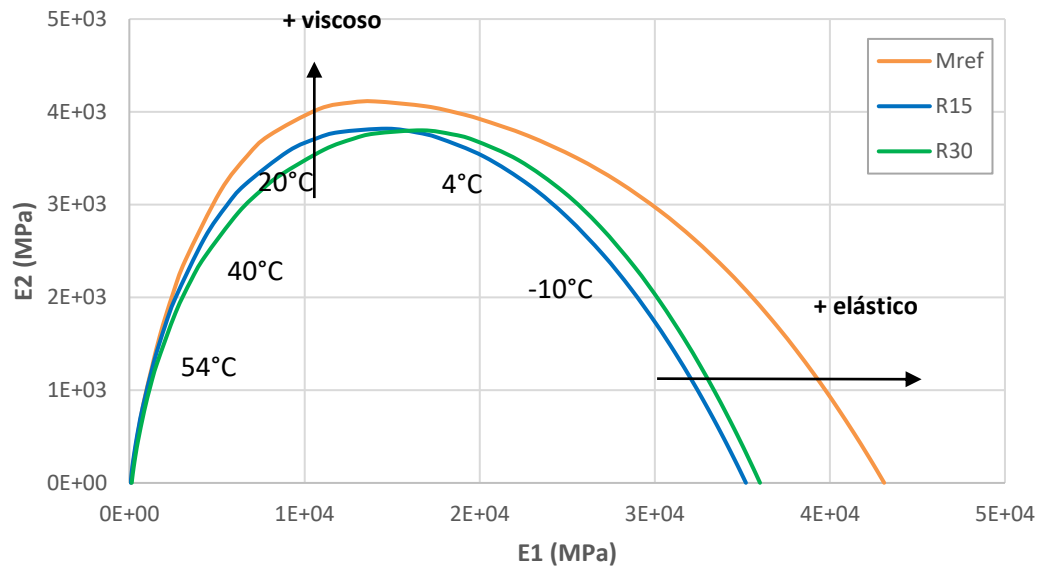
Tabela 2 – Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 obtidos com a modelagem

Mistura	E*							WLF	
	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k	h	δ	t _E (s)	β	C1	C2
Mref	90	43100	0,20	0,61	2,35	0,08	75	20,06	145,42
R15	75	35200	0,24	0,63	2,60	0,11	40	20,35	149,30
R30	130	36000	0,25	0,67	3,40	0,46	200	18,29	135,69

Fonte: Autores

O espaço Cole-Cole (Figura 5) mostra os resultados da modelagem 2S2P1D das misturas de referência e das recicladas (R15 e R30). Com a parte real E1 pode-se avaliar a porção recuperável da energia armazenada, e com a parte imaginária E2 o comportamento do material devido à dissipação de energia. Da esquerda para a direita, o gráfico inicia com resultados dos ensaios em altas temperaturas e é acomodado com o decréscimo da temperatura. Nota-se a inversão de comportamento das misturas recicladas na transição das temperaturas de 20 e 4°C. Em misturas com RAP, essa inversão de valores é observada também em outros casos na literatura (Basueny *et al.*, 2015; Centofante *et al.*, 2018).

Figura 5 – Espaço Cole-Cole das misturas com a modelagem 2S2P1D }



Fonte: Autores

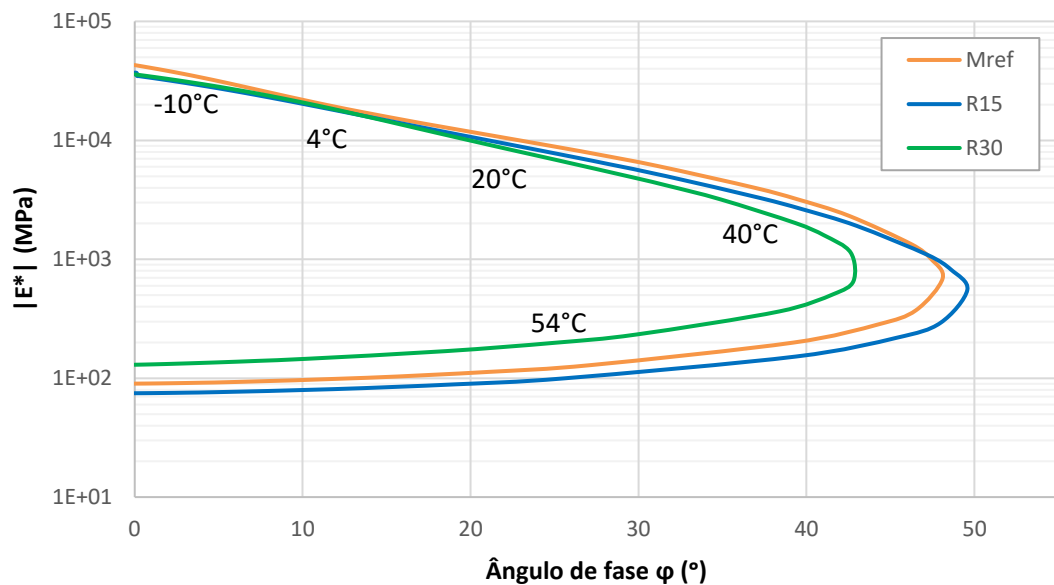
As parcelas elásticas (E_1) das misturas recicladas diminuíram em 7900 e 7100 MPa, ou seja, uma redução de aproximadamente 18 e 16% para as misturas R15 e R30, respectivamente. Deste modo, as misturas recicladas foram menos elásticas, ou seja, uma menor capacidade de armazenamento de energia em relação à mistura de referência. Em Correa (2020), por exemplo, também se observou comportamento similar a esta pesquisa com diminuições de 7, 9 e 1% em E_1 com a inserção de 10, 20 e 30% de fresado quando comparadas a uma mistura convencional utilizando ligante CAP 50/70. Em Centofante *et al.* (2018), porém, a mistura com a inserção de 30% de fresado conferiu um aumento de cerca de 20% de E_1 quando comparada à mistura convencional com CAP 50/70.

O Diagrama Black (Figura 6) apresenta a relação do valor absoluto do módulo dinâmico $|E^*|$ em escala logarítmica pelo ângulo de fase (φ) plotado em escala aritmética, para diferentes temperaturas. Verifica-se que a mistura R15 obteve maior ângulo de fase, seguida da Mref. Em contrapartida, a mistura reciclada R30 possui menor ângulo de fase, ou seja, apresenta uma parcela elástica mais significativa quando comparada a parcela viscosa. Deste modo, na mistura R30 há uma menor dissipação de energia ou menor perda por atrito interno, principalmente nas temperaturas altas (40 e 54°C).

Em relação a outras pesquisas, observa-se uma falta de tendência quanto ao pico do ângulo de fase. Ao comparar misturas convencionais com CAP 50/70 com misturas com inserção de fresado em 10, 20, 30%, Centofante *et al.* (2018) apontaram a mistura convencional com CAP 50/70 como tendo o menor pico de ângulo de fase. Já em Correa (2020) ocorreu o inverso, ou seja, a mistura sem fresado obteve o maior pico de ângulo de fase.

Ao considerar o comportamento termorreológico simples de misturas asfálticas, a curvas mestras foram construídas, utilizando-se do princípio da superposição tempo-temperatura (TTSP – *Time-Temperature Superposition Principle*), a partir dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase (Figuras 7 e 9, respectivamente). Dos dados, obteve-se uma única curva para cada mistura por meio da aplicação do modelo 2S2P1D, sendo então apresentadas em termos contínuos.

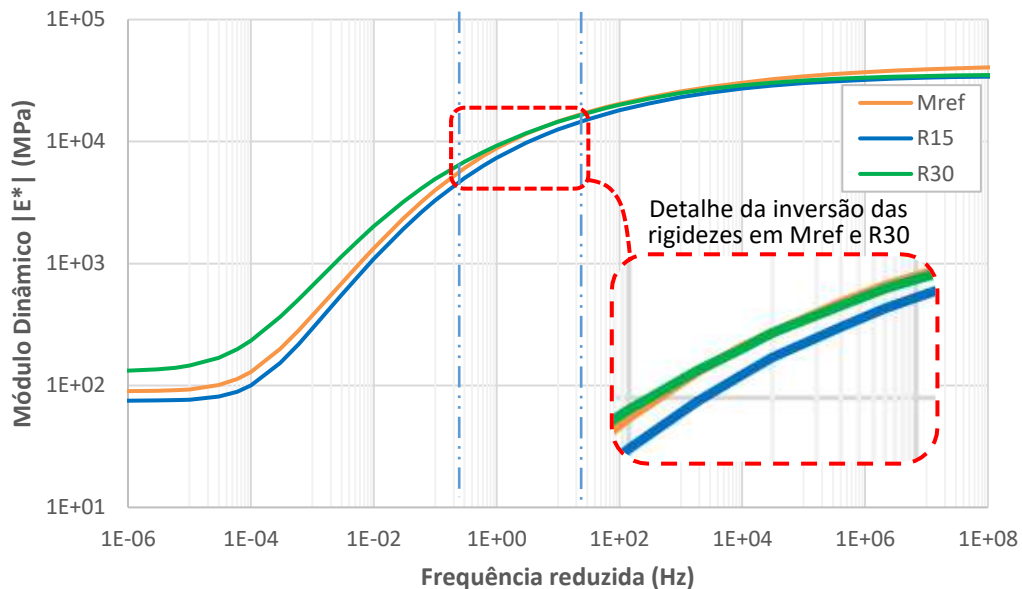
Figura 6 – Diagrama de Black das misturas com a modelagem 2S2P1D.



Fonte: Autores

Na Figura 7 é possível verificar que os maiores valores de módulo são observados nas maiores frequências, pois só ocorrem deformações elásticas. Nas baixas frequências, o tempo de carregamento é maior, equivalendo a temperaturas mais elevadas e levando a uma maior deformabilidade.

Figura 7 – Curvas mestras para todas as misturas à temperatura de 20°C.

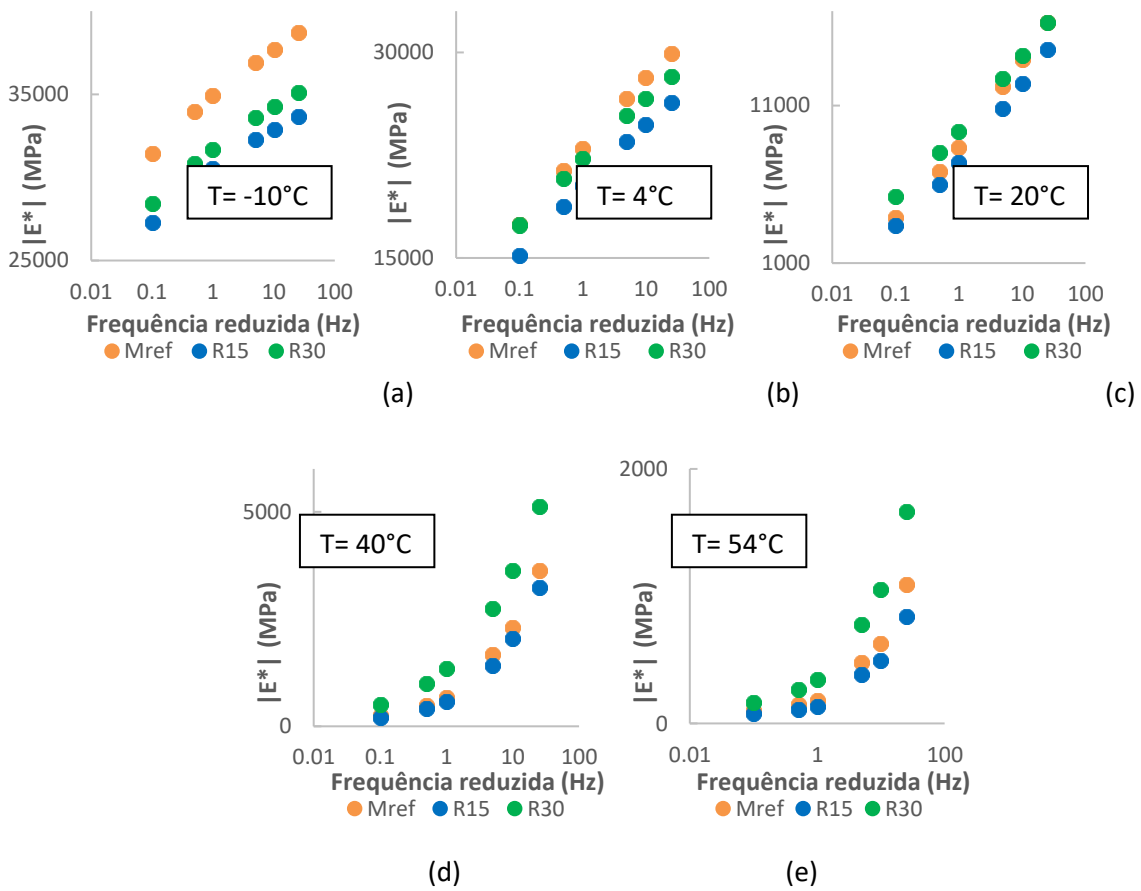


Fonte: Autores

De um modo geral, a mistura R30 apresentou maiores rigidezes em uma maior amplitude de frequência, seguida da Mref e da R15. Entre as frequências 1 e 100Hz é possível observar a inversão de comportamento entre as misturas Mref e M30. Tal inversão de comportamento é considerada inesperada, visto que não seguiu o mesmo comportamento nas baixas frequências, mas que pode ser observada em outros trabalhos (Suzuki, 2019; Luzzi, 2019; Zappe, 2020). Destaca-se ainda que a mistura com 15% RBR apresentou menor rigidez, o que pode ser explicado pela disposição deste dentro da mistura.

Na Figura 8 são apresentadas curvas mestras segmentadas por temperatura, por meio dos pontos experimentais. A mistura R15 apresentou menor rigidez entre todas as misturas, ratificando o comportamento já observado na curva mestra. Nas temperaturas 20, 40 e 54°C a mistura R30 apresentou maior rigidez, enquanto na temperatura -10°C a mistura Mref, com ligante virgem, apresentou módulos mais elevados. Na temperatura de 4°C, as misturas Mref e R30 apresentaram rigidezes semelhantes e maiores que a mistura R15.

Figura 8 – Curvas mestras de ângulo de fase das misturas à temperatura de 20°C.

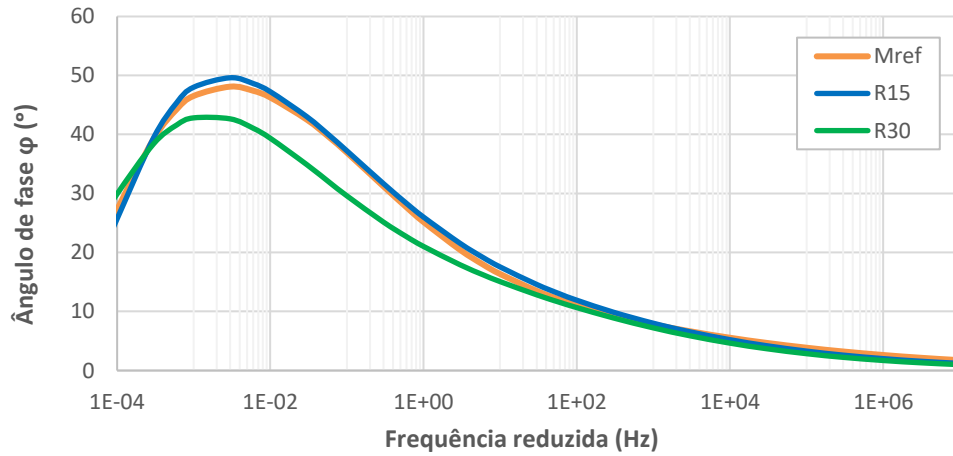


Fonte: Autores

Na Figura 9 são plotadas as curvas mestras dos ângulos de fase de todas as misturas. O ângulo de fase relaciona as propriedades elásticas e viscoelásticas dos materiais, sendo então utilizado aqui como parâmetro para avaliar o efeito do ligante.

Na menor frequência, 0,0001Hz, é possível observar que a mistura R30 possui o maior ângulo de fase, ocorrendo inversão desse comportamento com o aumento da frequência. Deste modo, o pico do ângulo de fase ocorre na mistura R15, seguida, de forma bem similar, pela mistura Mref. A mistura R30 apresentou menor de ângulo de fase em um maior espectro de frequência, ou seja, 30% RBR foi capaz de elevar os valores de rigidez das misturas em altas temperaturas devido à presença de ligante já oxidado.

Figura 9 – Curvas mestras para todas as misturas à temperatura de 20°C.

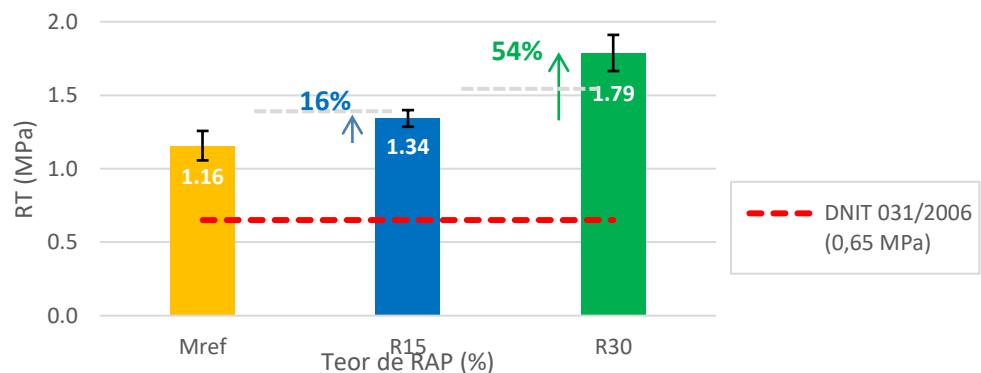


Fonte: Autores

4.3.4 Resistência Mecânica

A Figura 10 exibe as médias e os desvios padrões de RT, a partir de três CPs avaliados por mistura. É possível verificar aumento de RT de 16 e 54% em função dos teores de fresado, 15 e 30%, respectivamente. As misturas estão dentro do intervalo típico para misturas a quente que, segundo Bernucci *et al.* (2010), são de 0,5 e 2,0MPa. Além disso, os resultados encontrados estão superiores a 0,65MPa, valor mínimo requerido pela norma DNIT - ES 031/2006.

Figura 10 – Resultados de RT das misturas à temperatura de 25°C.



Fonte: Autores

Centofante *et al.* (2018) avaliaram misturas asfálticas com curvas granulométricas inseridas na faixa C do DNIT e com o uso de CAP 50/70. Os autores apontaram aumento de RT de 26, 46 e 66% em misturas com 10, 20, 30% de fresado, respectivamente, ao comparar com uma mistura de referência. Esses valores mostram-se superiores aos obtidos nesta pesquisa. Essa diferença pode ser resultado do tipo e/ou fração do agregado virgem utilizado, variabilidade do material fresado, método de mistura ou mesmo diferenças na granulometria.

4.4 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

Este trabalho avaliou a rigidez e a resistência à tração de misturas asfálticas recicladas a partir da substituição parcial de ligante asfáltico virgem pelo ligante presente no fresado, e substituição parcial da fração fina, passante na peneira 4,75mm, do agregado mineral pela mesma do agregado presente no RAP. Essa substituição se deu pelo fracionamento dos agregados virgens e adoção do pré-aquecimento do fresado. Com a análise dos resultados do Módulo Dinâmico, por meio da avaliação do comportamento reológico e da utilização do modelo 2S2P1D, observa-se que a mistura com 30% RBR possui a maior rigidez entre as misturas analisadas. Mesmo havendo inversão do comportamento esperado principalmente nas baixas frequências, as misturas com 15% RBR tiveram comportamento quanto à rigidez semelhante à mistura com ligante virgem. Quanto aos resultados de RT, conforme esperado, ocorreu aumento em função do aumento do teor de fresado. Acredita-se que a utilização da fração fina de RAP tenha melhorado na resistência da mistura devido a presença do ligante já oxidado. Apesar disso, o projeto de pavimentação necessitaria ainda de uma análise quanto à fadiga e à deformação permanente dessas misturas. Diante do exposto, a utilização do RAP poderia contribuir para o projeto estrutural de pavimentos em virtude do ganho de rigidez. É importante salientar que as práticas de gerenciamento de estoque e de métodos de inserção de fresado podem reduzir a variabilidade e potencializar a reutilização do ligante presente no fresado. Além dos benefícios econômicos, é evidente o desafio do uso de RAP pelo âmbito da prática sustentável no ramo pavimentação rodoviária.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP/Petrobras pela bolsa do primeiro autor, à Funcap pela bolsa de inovação tecnológica da segunda autora, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do terceiro autor; à Insttale Engenharia pelos materiais cedidos e à Rede de

Tecnologia em Asfalto – Petrobras pelo apoio ao grupo de pesquisa da Universidade Federal do Ceará (UFC).

REFERÊNCIAS

AASHTO. **AASHTO M 92**. Standard Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes. Washington, DC, 2010.

ABNT. **ABNT NBR 15184**: Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

AASHTO. **AASHTO M 320**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D.C., 2022.

AASHTO. **AASHTO M 323**: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Washington, D.C., 2022.

BASUENY, A.; CARTER, A.; PERRATON, D.; VAILLANCOURT, M. Laboratory Evaluation of Complex Modulus and Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures with RAP. *In*: CANESTRARI, F.; PARTL, M. (eds.). **8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials**. Dordrecht: Springer, 2016.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 2ªed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2022.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER ME 035**: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3ª ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 031/2006**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 033/2021**: Pavimentação - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2021.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 136**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 158**: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2011.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 413**: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo. Rio de Janeiro: IPR, 2021.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 416**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2019.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 427**: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2020.

BRASIL. **Resolução nº 14**, de 8 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Edição 129, n. 129, p. 53, 12 jul. 2021.

CENTOFANTE, R. *et al.* Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, 2018.

CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: from binders to mixes. **Road Materials and Pavements Design**, Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE), v. 5, n. 1, p. 41-55, 2004.

EAPA. **Asphalt in Figures 2020**. European Asphalt Pavement Association, 2021.

GASPAR, M. S. **Mecanismo de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. 2019, Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

LO PRESTI, D.; JIMENÉZ, A.; AIREY, G.; HAJJ, E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. **Journal of Cleaner Production**, Nottingham, v. 131, p 43-51., 2016.

LO PRESTI, D.; VASCONCELOS, K.; OREŠKOVIĆ, M.; PIRES, G. M.; BRESSI, S. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. **Road Materials and Pavement Design**. [S. l.]: Informa UK Limited, 25 Apr. 2019.

LUZZI, F. C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

NGUYEN, V. H. **Effects of laboratory mixing methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures**. 2009. Thesis (PhD in Transportation Engineering) - University of Nottingham, Nottingham, 2009.

PIRES, G. M. **A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation**. 2018. MSc thesis. University of Nottingham, Nottingham, 2018

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 2019.

WEST, R. C.; COPELAND, A. **High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice — Lessons Learned**. Information Series 139. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association, 2015.

WILLIAMS, B. A.; WILLIS, J. R.; SHACAT, J. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2021**, 12th Annual Survey (IS 138). National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, Maryland, 2022.

ZAPPE, A. P. S. **Avaliação de diferentes fontes de material fresado com ligantes não-convencionais na reciclagem à quente**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

5 EFEITO DO RAP NA EVOLUÇÃO DE AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA EM CAMADAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE

"Este artigo é uma versão revisada e atualizada de um trabalho previamente publicado nos Anais do XIX Congresso Rio de Transportes, com pequenas modificações no texto e na estrutura."

Comparação da evolução da deformação permanente de misturas asfálticas recicladas em relação a uma mistura tradicional

Thiago M. da Frota^{a*}, Aline C. F. Vale^a, Juceline B. dos S. Bastos^b, Jorge B. Soares^a

^a Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

^b Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil

*Autor correspondente

E-mail: thiagofrota@det.ufc.br (Thiago M. da Frota), alinevale@det.ufc.br (Aline C. F. Vale) jucelinebatista@det.ufc.br (Juceline B. dos S. Bastos), jsoares@det.ufc.br (Jorge B. Soares)

Resumo: O Afundamento de Trilha de Roda (ATR) é um dos defeitos mais comuns em pavimentos asfálticos em regiões de clima quente. Nesse contexto, este artigo comparou a influência da adição de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) em relação a uma mistura tradicional na resistência à deformação permanente por meio da evolução de ATR de camadas de rolamento de pavimentos típicos do Ceará. Foram dosadas três misturas pela metodologia Superpave, sendo uma mistura de referência (Mref) e as demais misturas com adição de 11,4% (R15) e 22,8% (R30) de RAP em substituição a massa total da mistura. As misturas então foram caracterizadas quanto a rigidez, por meio do ensaio de Módulo Dinâmico (MD), e a deformação permanente, por meio do Stress Sweep Rutting (SSR), permitindo a previsão da evolução do ATR. Os resultados foram utilizados como inputs para o programa de dimensionamento CAP 3D-D. A predição da evolução de ATR indicou que a adição a mistura R30 resulta em menor suscetibilidade a essa falha ao longo da vida de serviço, mostrando que além dos ganhos econômicos e ambientais, há viabilidade técnica.

Palavras-chave: Afundamento de Trilha de Roda. Deformação permanente. Reclaimed Asphalt Pavement. Reciclagem de pavimentos. Sustentabilidade.

5.1 Introdução

O Afundamento de Trilha de Rodas (ATR) é um dos principais defeitos em revestimentos asfálticos no Brasil (Nascimento, 2008; Borges, 2014; Bastos et al., 2015; Vale, 2020; Barros, 2022). O ATR afeta diretamente o conforto e a segurança dos usuários, o que requer medidas de prevenção para o aumento da sua durabilidade. Bernucci *et al.* (2022) apontam que este fenômeno, quando ocorre somente no revestimento asfáltico, é resultado de uma combinação do fluxo do material, viscoelástico ou viscoplástico, e do dano nesse material, representado pela formação e propagação de trincas.

Diante do cenário nacional, surge a necessidade de construção de novas rodovias e da manutenção regular e periódica daquelas existentes e, conseqüentemente, o potencial aumento do consumo de matérias-primas. Desta forma, o reaproveitamento do resíduo proveniente da fresagem de camadas asfálticas, em inglês RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), tem se tornado cada vez mais atrativo para o cenário brasileiro, não só pela diminuição dos custos, mas também pelo aspecto ambiental.

Segundo Williams *et al.* (2022), nos Estados Unidos, em 2021, o uso do fresado em novas misturas asfálticas possibilitou uma redução na emissão de gases de efeito estufa contabilizados em 2,36 milhões de toneladas de CO₂e (equivalente a emissão anual de 570 mil veículos destinados ao transporte de passageiros). Em um estudo de caso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na produção de misturas asfálticas no Ceará, Frota *et al.* (2022) apontaram que a etapa de extração das matérias-primas virgens foi a que representou os maiores impactos ambientais negativos, ou seja, os ganhos ambientais são tão maiores quanto maior é a porcentagem de RAP na mistura.

Do ponto de vista do comportamento mecânico, estudos apontam que as misturas asfálticas contendo RAP são menos suscetíveis a deformação permanente, o que pode ser explicado pela alta rigidez do ligante já envelhecido (Kim *et al.*, 2016). No entanto, os departamentos estaduais de transporte norte-americano expressaram preocupação com a falta de informações disponíveis sobre o uso de altas porcentagens (ou seja, superiores a 20%) de RAP em misturas e o desempenho subsequente do pavimento (Lo Presti *et al.*, 2016).

Hoje, no Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) adota o ensaio de *Flow Number*, DNIT-ME 184 (2018), como critério de ranqueamento e seleção prévia de misturas asfálticas ainda na dosagem quanto a resistência a deformação permanente, mas não considera a evolução desse fenômeno ao longo da vida útil do pavimento (DNIT, 2021). Com isso, surge a necessidade de uma investigação mais aprofundada com uso de novas metodologias capazes de avaliar como as camadas asfálticas se comportam com o tempo somado aos fatores das cargas e da temperatura por meio do ensaio SSR (Stress Sweep Rutting) (AASHTO, 2019; Vale, 2020). Com a evolução das metodologias de ensaio e dos modelos para previsão da evolução do ATR, a implementação do modelo shift model foi realizada no CAP3D-D, programa de dimensionamento desenvolvido no Brasil (Vale *et al.*, 2022).

O objetivo deste artigo é avaliar a evolução da deformação permanente no revestimento asfáltico, considerando estruturas típicas de pavimentos do estado do Ceará, com

variação do teor de RAP nas camadas asfálticas por meio do ensaio SSR e do programa de dimensionamento CAP 3D-D.

5.2 Materiais e métodos

5.2.1 Materiais

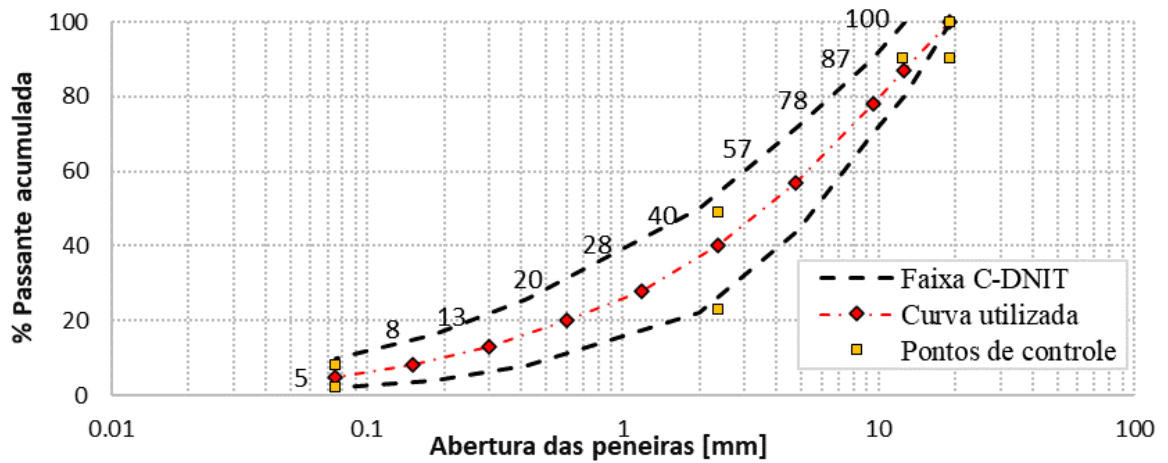
Para atingir os objetivos deste trabalho, foram utilizadas 3 diferentes misturas asfálticas com diferentes teores de RAP. Para a composição destas misturas, o ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 com Performance Grade (PG) 64-XX (AASHTO, M 320-21), cedido pela Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor), à época da Petrobras, em Fortaleza – CE. Os agregados minerais de origem granítica e o RAP utilizados nesta pesquisa foram coletados na empresa Insttale Engenharia, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza.

Em laboratório, o material fresado foi separado com auxílio de peneirador mecânico para se obter a parte passante na peneira 4,75mm, com teor de ligante de 5,9% (DNIT-ME 158/2011). A fração descartada ($> 4,75\text{mm}$) apresentou teor de 3,2%.

A dosagem da mistura de referência (M_{ref}) seguiu a metodologia Superpave (AASHTO, M 323-17). Para as misturas recicladas, a adição do RAP foi baseada no parâmetro RBR (*RAP Binder Ratio*), ou seja, proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. Assim, as misturas com RBR definidos em 15 e 30% foram denominadas R15 e R30, respectivamente. O teor de ligante para todas as misturas foi fixado em 4,5% e a curva granulométrica proposta foi adequada aos limites da Faixa C do DNIT 031/2006 (Figura 1). A Tabela 1 contém o resumo das principais características das misturas investigadas.

As demais misturas também foram compactadas utilizando o compactador giratório Superpave, adotando a altura de 150mm e o diâmetro de 100mm. Os corpos de prova submetidos aos ensaios de Módulo Dinâmico (MD) e *Stress Sweep Rutting* (SSR) foram moldados com $4 \pm 0,4\%$ e $5,5 \pm 0,5\%$ de Vv, respectivamente. A temperatura de 150°C de pré-aquecimento do RAP foi definida conforme Pires (2018), assim como adaptações sugeridas por Gaspar (2019).

Figura 1 - Composição granulométrica das misturas asfálticas.



Fonte: Autores

Tabela 1 – Características das misturas investigadas.

Mistura	Ligante	Percentual de ligante (%)	Densidade máxima medida	Volume de vazios (Vv) de projeto (%)	RBR (%)
Mref			2,453		0
R15	50/70	4,5	2,442	4	15
R30			2,451		30

Fonte: Autores

5.2.2 Métodos

5.2.2.1 O Ensaio SSR e o shift model

Para a caracterização da deformação permanente nas misturas asfálticas, foi realizado o ensaio triaxial SSR (Kim e Kim, 2017; Vale *et al.*, 2022), numa prensa UTM – 25 (*Universal Testing Machine - 25*). O protocolo do ensaio considera a aplicação de 600 ciclos divididos em três blocos de 200 ciclos de aplicação de níveis de tensões verticais diferentes, considerando duas temperaturas distintas, e com aplicação de uma tensão confinante constante de 69kPa.

No ensaio realizado em alta temperatura (Th), definido em 47°C (Choi, 2013), são aplicados carregamentos com tensões verticais de 689, 483 e 896kPa. Em cada tensão, são aplicados 200 ciclos de carregamento com período de aplicação de carga de 0,4s e repouso de 3,6s. Uma curva de referência para predição de ATR é obtida a partir da modelagem dos primeiros 200 ciclos do ensaio em Th.

Na etapa do ensaio realizado em baixa temperatura (Tl), definido em 17°C (Choi, 2013), a ordem das tensões aplicadas passa a ser: 483, 689 e 896kPa. Além disso, para Tl, o período de aplicação de carga é de 0,4s com período de repouso de 1,6s.

Com os dados obtidos por meio do ensaio SSR, foi utilizado o *shift model*, que se baseia principalmente nas Equações (1), (2) e (3).

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\varepsilon_0 \times N_{red}}{(N_1 + N_{red})^\beta} \quad (1)$$

$$a_{\xi_p} = p_1 \log \log(\xi_p) + p_2 \quad (2)$$

$$a_{\sigma_v} = d_1 \left(\frac{\sigma_v}{p_a}\right)^{d_2} \quad (3)$$

Onde:

ε_{vp} = deformação viscoplástica (permanente),

ε_0 , N_1 , β = coeficientes do modelo,

N_{red} = número de ciclos reduzidos na condição de carregamento de referência,

a_{ξ_p} = fator de ajuste de redução do tempo de aplicação de carga,

ξ_p = tempo de carregamento reduzido,

p_1 e p_2 = coeficientes do fator de ajuste de redução do tempo de aplicação de carga,

a_{σ_v} = fator de ajuste de tensão vertical,

σ_v = tensão vertical, e

d_1 e d_2 = coeficientes do fator de ajuste de tensão aplicada.

5.2.2.2 Programa de dimensionamento CAP 3D-D

O CAP 3D-D, programa de dimensionamento de pavimentos desenvolvido pelo grupo de pesquisa da UFC (Holanda *et al.*, 2006; Torquato e Silva *et al.*, 2014; Vale *et al.*, 2022), foi usado para realizar as simulações e comparar a evolução do ATR ao longo do tempo para as misturas deste artigo. Foi utilizada uma estrutura padrão composta por materiais de base, sub-base e subleito típicos da região, conforme detalhado em Cabral *et al.* (2021). A camada de base é uma mistura estabilizada granulometricamente composta por uma Brita Graduada Simples (BGS) e Areia Branca (AB), a sub-base é composta pela AB e o

subleito por um solo do Nordeste, denominado M1. Os coeficientes do modelo para as camadas granulares estão descritos na Tabela 2.

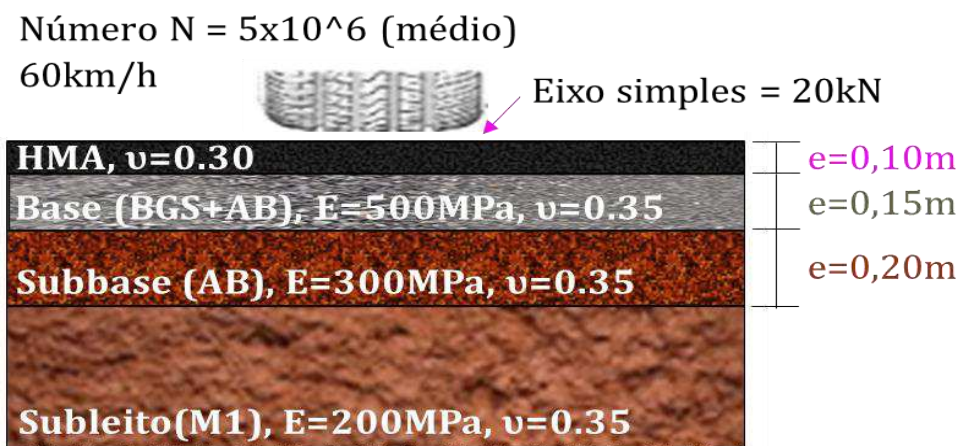
Tabela 2 – Coeficientes do modelo de DP para as camadas granulares

Camada	Material	K1	K2	K3	K4
Base	BGS+AB	1,1464	0,2460	-0,1518	0,0191
Sub-base	AB	0,7227	0,1770	-0,2117	0,0887
Subleito	M1	0,3156	0,5433	-0,3740	0,1970

Fonte: Cabral *et al.*, 2021

A estrutura considerada para as simulações está ilustrada na Figura 2. Foi utilizado um número N que representa um volume de tráfego médio (5×10^6) e um crescimento linear de 2% ao ano. Também foram fixados a velocidade com 60km/h, o eixo padrão (20kN) e foi definida uma temperatura constante de 27°C, que representa a temperatura média do estado do Ceará (CLIMA: CEARÁ, 2022). Para realização das simulações e correspondentes previsões de ATR, foram necessários os resultados do ensaio de Módulo Dinâmico (DNIT-ME 416/2019), que indicam a rigidez do material e possuem influência no comportamento das misturas quanto à DP.

Figura 2 – Estrutura padrão considerada para simulações de dimensionamento do pavimento



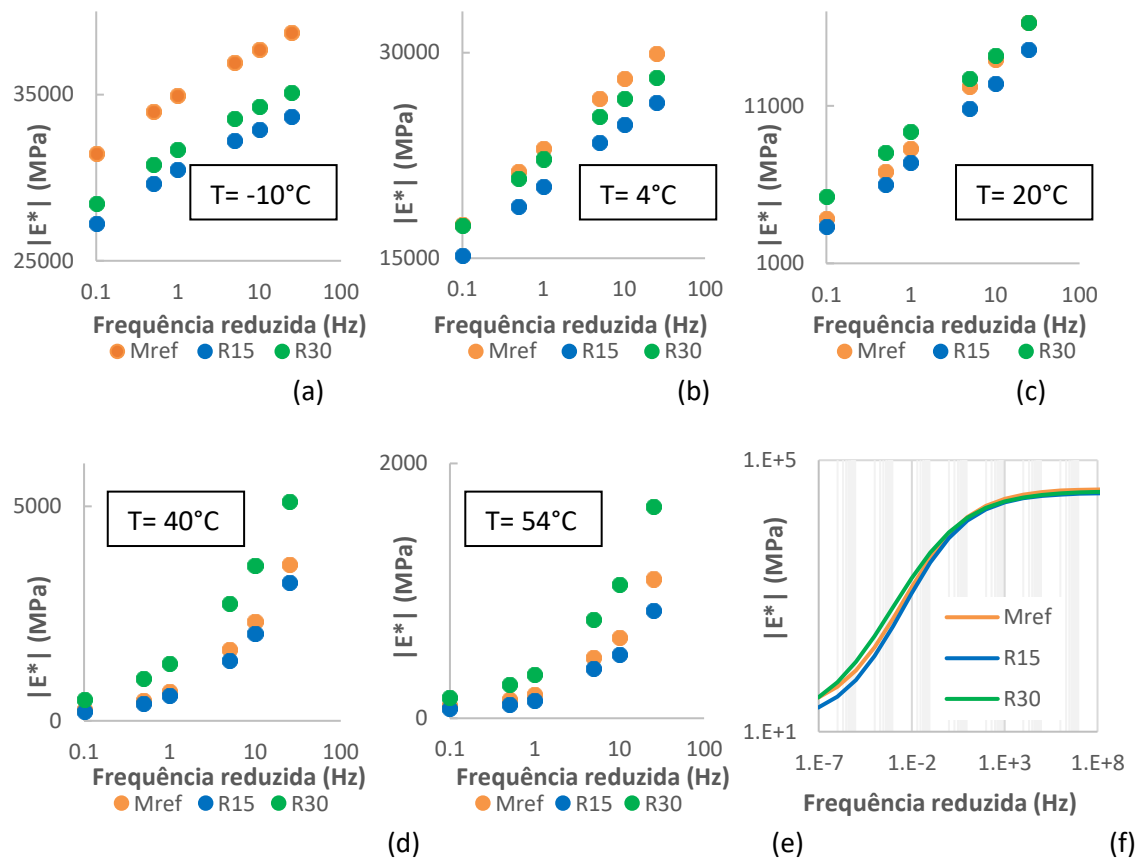
Fonte: Autores

5.3 Resultados e discussões

5.3.1 Módulo Dinâmico

Na Figura 3 são apresentadas as rigidezes em função do tempo segmentadas por temperatura, por meio dos pontos experimentais, e as curvas sigmodais de todas as misturas (Mref, R15 e R30).

Figura 3 – Módulo dinâmico experimentais em todas as temperaturas de ensaio (a, b, c, d, e) e curvas sigmodais (f).



Fonte: Autores

A mistura R15 apresentou menor rigidez entre todas as misturas nas temperaturas de 20 a 54°C , frequências mais baixas de ensaio, enquanto a mistura R30 apresentou maior rigidez nestas mesmas condições. Sabe-se que a deformação permanente ocorre mais em temperaturas elevadas, então a rigidez mais elevada da mistura R30 nestas condições, pode

ser um indicativo de melhor resistência à deformação permanente. Nas baixas temperaturas, Mref apresentou módulos mais elevados em -10°C e rigidez semelhantes a R30 a 4°C .

Foram obtidos ainda, por meio do ensaio de Módulo Dinâmico, os coeficientes do modelo Sigmoidal que foram usados no programa de dimensionamento (Tabela 3).

Tabela 3 – Coeficientes do Módulo Dinâmico

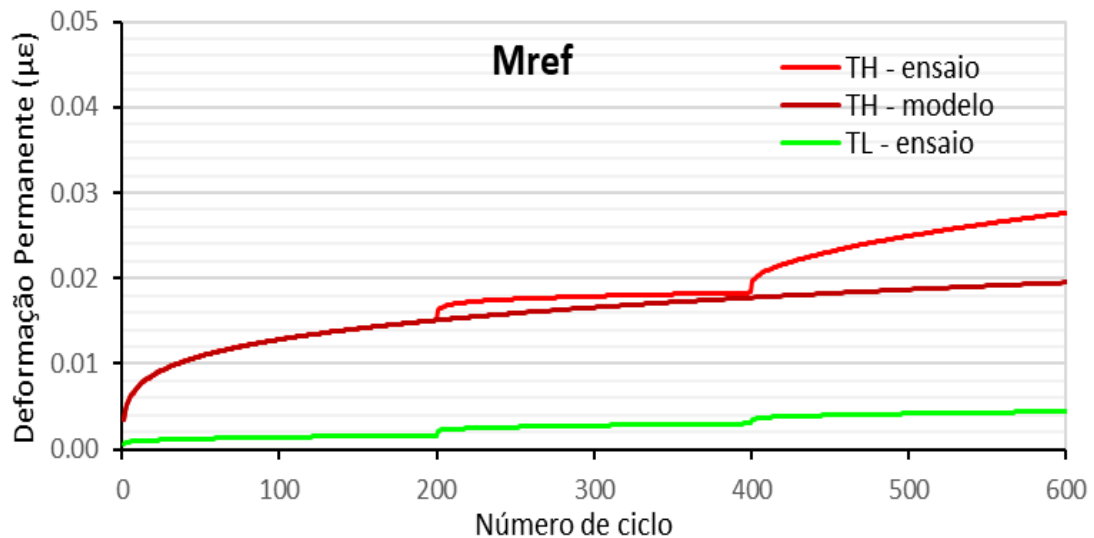
Mistura	a	b	d	g	a1	a2	a3
Mref	1,27199	3,30687	1,36912	0,56259	0,00098	-0,18527	3,47008
R15	1,12845	3,39010	1,40652	0,57526	0,00094	-0,18160	3,41027
R30	1,10764	3,43786	1,53406	0,50800	0,00104	-0,18514	3,44262

Fonte: Autores

5.3.2 Deformação permanente

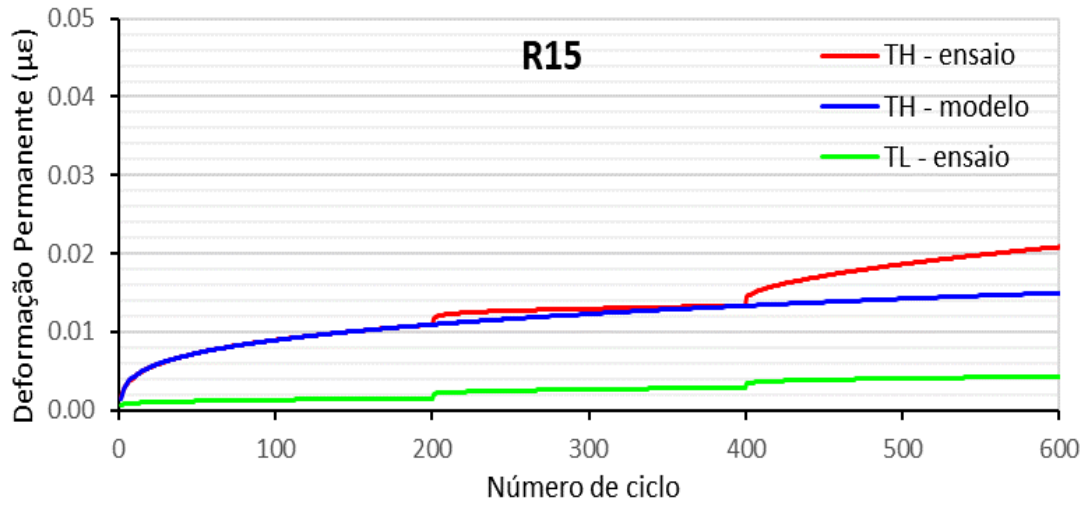
As Figuras 4, 5 e 6 contêm os resultados do ensaio SSR das misturas desta pesquisa. É possível observar que a deformação permanente ao final dos 600 ciclos foi mais elevada para a mistura de referência (Mref) ($0,0195\mu\epsilon$) e houve uma diminuição dessa deformação com o acréscimo de RAP na mistura, sendo menores 23 e 35%, respectivamente, para R15 e R30.

Figura 4 – Resultados do ensaio SSR para a mistura Mref



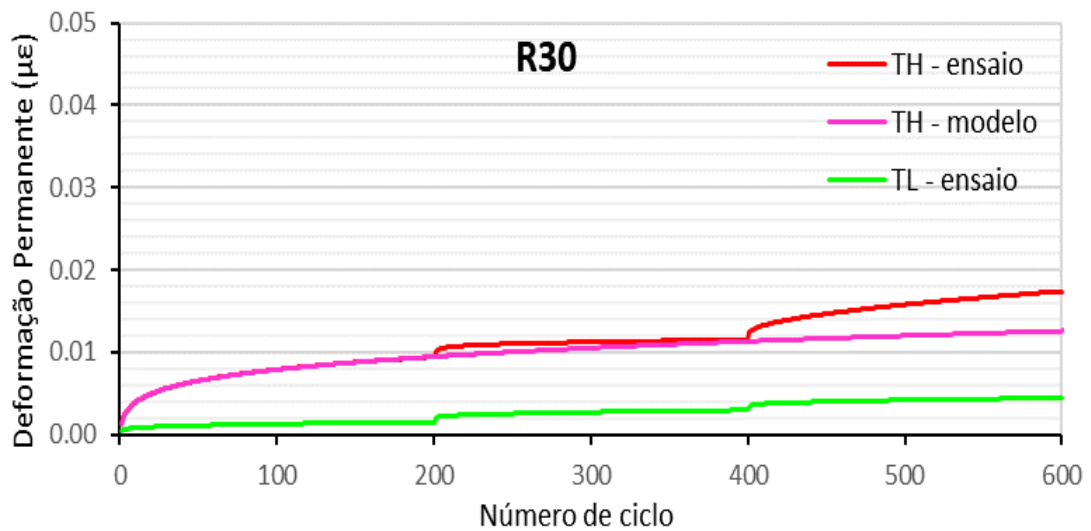
Fonte: Autores

Figura 5 - Resultados do ensaio SSR para a mistura R15



Fonte: Autores

Figura 6 - Resultados do ensaio SSR para a mistura R30



Fonte: Autores

A partir da aplicação do *shift model*, foram obtidos os coeficientes (Tabela 4) que são usados como inputs no programa de dimensionamento CAP 3D-D (Figura 7).

Tabela 4 – Coeficientes do *shift model*

	ϵ_0	N1	β	p1	p2	d1	d2
Mref	0,004423	0,405463	0,768033	0,753179	0,29972	0,056017	1,52471
R15	0,002449	1,169598	0,716662	0,57911	0,230451	0,014587	3,473151
R30	0,002473	1,62435	0,745339	0,600087	0,238798	0,030352	2,731723

Fonte: Autores

Figura 7 - Tela do CAP 3D-D para definição dos inputs do modelo sigmoidal e *shift model*

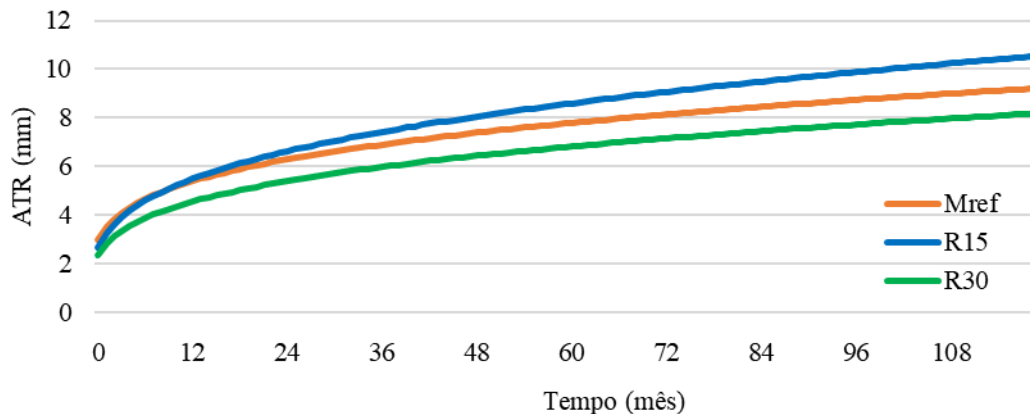
Fonte: Autores

5.3.3 Simulações de dimensionamento dos pavimentos

A Figura 8 apresenta a previsão de evolução de ATR para a camada de rolamento no período de 120 meses, permanecendo as três soluções comparadas abaixo de 12,5mm. Em geral, valores de deformação permanente de até 12,5mm são admitidos (Choi, 2013; LaCroix, 2013), sendo este limite adotado como critério máximo de deformação permanente tanto por grupos de pesquisa norte-americanos (e.g., *North Carolina State University*, NCSU), quanto por grupos de pesquisas nacionais (e.g., Petrobras/Cenpes em suas pistas experimentais na Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ). Valores de deformação na camada asfáltica superiores a 12,5mm equivalem a uma condição de falha na estrutura do pavimento, pois problemas como hidroplanagem podem ocorrer.

No Brasil, a variação desse valor é evidente na prática. A ARTESP, por exemplo, define um afundamento máximo de 7 mm como parâmetro. Valores excedentes demandam intervenções rodoviárias. No contexto das concessões de trechos no estado do Rio Grande do Sul, Faccin (2018) destaca que a ANTT prescreve um limite de 5,0 mm para a flecha admissível na BR-290, concedida à CONCEPA. Para as BR-116 e BR-392, sob a administração da Ecosul, os limites são mais elevados, alcançando 7,0 mm. A ultrapassagem desses limiares impõe a necessidade de medidas corretivas na via.

Figura 8 – Afundamento de trilha de rodas em função do tempo



Fonte: Autores

A evolução da ATR nos primeiros meses segue a tendência observada nos ensaios de SSR (Figuras 3, 4 e 5), ou seja, quanto maior RBR na mistura, menor a deformação. Por outro lado, a partir do mês 10, a mistura R15 apresenta os maiores valores de ATRs. Esse comportamento não era esperado, mas pode ser explicado nos resultados de MD (Figura 3), onde tal mistura apresenta menor rigidez nas baixas frequências (altas temperaturas), levando assim a uma maior deformabilidade. Destaca-se ainda que comparando o ATR nas misturas com fresado (15 e 30%) é muito pouca em relação ao ATR na mistura de referência, a diferença é somente de 1,5mm ao final de 120 meses.

Kim *et al.* (2016) compararam a previsão de ATR em misturas com 15 e 50% de RAP, por meio ensaio *Triaxial Stress Sweep* (TSS) e *software Layered Viscoelastic Continuum Damage* (LVECD), com medições em campo. O estudo indicou que as simulações subestimaram os valores medidos em campo, mas foram capazes de prever classificações aceitáveis. Apesar disso, as misturas recicladas apresentaram um comportamento excelente em campo com ATRs menores que 6mm ao final de 6 anos de serviço.

5.4 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

Este trabalho avaliou a deformação permanente (DP) de misturas asfálticas, com e sem RAP, aplicadas em camada de rolamento do estado do Ceará. Com a análise dos resultados de SSR, conforme esperado, ocorreu diminuição de DP com o aumento do teor de fresado. Por outro lado, no ensaio de Módulo Dinâmico, a mistura com 15% RBR foi a que apresentou a menor das rigidezes dentre as misturas analisadas. Nas simulações de previsão

de Afundamento de Trilha de Roda (ATR), a mistura que menos deformou ao final do período analisado foi a R30, embora os resultados sejam bem aproximados, com diferença máxima de 1,5mm em relação ao ATR com a mistura de referência. De um modo geral, as misturas recicladas apresentaram ATR menores que 11mm ao final do período simulado de 10 anos. Apesar disso, o projeto de pavimentação necessitaria ainda de uma análise quanto à fadiga, além do acompanhamento da evolução dos defeitos em trechos experimentais. Vale destacar que a utilização do RAP, como observado em R30 com menor deformação, poderia contribuir para projetos de pavimentos com maiores potenciais de ganhos econômicos e ambientais, além do aspecto técnico aqui abordado. Além disso, ensaios que consideram falhas específicas com base em mecanismos físicos, juntamente com modelos de predição dos defeitos no pavimento, podem funcionar como ferramentas para tomadores de decisões optarem por misturas mais sustentáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP/Petrobras pela bolsa do primeiro autor, à Funcap pela bolsa de inovação tecnológica da segunda autora, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do terceiro autor; à Insttale Engenharia pelos materiais cedidos e à Rede de Tecnologia em Asfalto – Petrobras pelo apoio ao grupo de pesquisa da Universidade Federal do Ceará (UFC).

REFERÊNCIAS

AASHTO. **AASHTO M 320**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D.C., 2022.

AASHTO. **AASHTO M 323**: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Washington, D.C., 2022.

AASHTO. **AASHTO TP 134-19**: Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).

BARROS, L. M.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P. Desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com diferentes ligantes. *In*: XVIII CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO (CILA), 2015, Bariloche, Argentina. **Anais [...]** Bariloche: CILA, 2015. p. 325-333.

BASTOS, J. B. S.; BORGES, R. L.; SOARES, J. B.; KLINSKY, L. M. G. Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. **TRANSPORTES**, v. 23, n. 3, p. 44, 2015.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 2ªed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2022.

BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do Shift Model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 031/2006**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-IS 247**: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa – Instrução de Serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2021.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 158**: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2011.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 184**: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 416**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2019.

CHOI, Yeong-Tae. **Development of a mechanistic prediction model and test protocol for the permanent deformation of asphalt concrete**. 2013. Dissertação (Mestrado) - North Carolina State University, Raleigh, 2013.

CLIMA: CEARÁ. **Climate-Data.org**, 2022. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/ceara-212/>. Acesso em: 02 set. 2022.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2021**: Relatório gerencial. Brasília, 2021.

FROTA, T. M.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. Potenciais impactos ambientais na produção de misturas asfálticas recicladas aplicando ACV *cradle-to-gate*: estudo de caso de Fortaleza. 2022 *In*: XXI CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO (CILA), Puntadel Leste **Anais** [...]. Punta del Leste, Uruguai, 2022.

GASPAR, M. S. **Mecanismo de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. 2019, Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

HOLANDA, E.; PARENTE JR, T. D.; ARAÚJO, L. T. B.; MELO, F.; EVANGELISTA JR, J. B.; SOARES, J. B. Finite Element Modeling of Flexible Pavements. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING (CILAMCE), 27, 2006. **Anais [...]** Belém, 2006.

KIM, D. *et al.* Mechanistic Performance Evaluation of Pavement Sections Containing RAP and WMA Additives in Manitoba. **Construction and Building Materials**. Elsevier BV, 2016.

KIM, Y. R. Development of Stress Sweep Rutting (SSR) Test for Permanent Deformation Characterization of Asphalt Mixture. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 373-383, 2017

LACROIX, A. T. **Performance prediction of the NCAT test track pavements using mechanistic models**. 2013. Dissertação (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, NC, 2013.

LO PRESTI, D.; JIMENÉZ, A.; AIREY, G.; HAJJ, E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. **Journal of Cleaner Production**, Nottingham, v. 131, p 43-51., 2016.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PIRES, G. M. **A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation**. 2018. MSc thesis. University of Nottingham, Nottingham, 2018

TORQUATO e SILVA, S.; SOARES, J. B.; HOLANDA, A. S.; OLIVEIRA, J. A. Utilização do método dos elementos finitos em retroanálise de pavimentos flexíveis. In: XXVIII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2014, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, 2014.

VALE, A. C. F. **Analysis of the evolution of permanent deformation of asphalt mixtures using the stress sweep rutting (SSR) test methodology**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

VALE, A. C. F.; SILVA, L. S. V.; BASTOS, J. B. S.; BARROSO, E. S.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; PARENTE JUNIOR, E.; SOARES, J. B. Acúmulo de deformação permanente em camadas asfálticas no dimensionamento de pavimentos a partir de modelo viscoplástico. In: XXVIII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2022, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, 2022.

WILLIAMS, B. A.; WILLIS, J. R.; SHACAT, J. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2021**, 12th Annual Survey (IS 138). National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, Maryland, 2022.

6 PROPOSTA DE QUESTIONÁRIO PARA AUXILIAR O ESTUDO DE AVALIAÇÃO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

"Este artigo é uma versão revisada e atualizada de um trabalho previamente publicado nos Anais do XXVI Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes, com pequenas modificações no texto e na estrutura."

Proposição de questionário para auxiliar a elaboração de inventário do ciclo de vida de pavimentos asfálticos

Thiago M. da Frota^{a*}, Juceline B. dos S. Bastos^b, Jorge B. Soares^a

^a Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

^b Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil

*Autor correspondente

E-mail: thiagofrota@det.ufc.br (Thiago M. da Frota), jucelinebatista@det.ufc.br (Juceline B. dos S. Bastos), jsoares@det.ufc.br (Jorge B. Soares)

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de gestão para análise dos impactos ambientais de produtos e processos. A análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a fase da ACV que contempla a coleta de dados de materiais, emissões e fluxo de energia para modelagem de processos. Dadas as particularidades e a complexidade de um projeto rodoviário, muitos dados necessitam ser coletados diretamente com usinas asfálticas e departamentos responsáveis pela construção e manutenção. Para isto, esta comunicação técnica objetiva apresentar um questionário de Avaliação de Ciclo de Vida de Pavimentos Asfálticos como documento padrão para o auxílio da coleta de dados primários a ser utilizado por outros grupos de pesquisa. O questionário contempla seções para materiais e processos envolvidos durante todo o ciclo de vida do pavimento e é apresentado aqui por meio de QR Codes.

6.1 Considerações iniciais

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consiste em uma ferramenta de gestão ambiental que permite a análise dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, desde a aquisição de matérias-primas até a disposição final ou reciclagem (ISO, 2006). A ACV é aplicada para identificação de melhorias de processos ao longo do ciclo de vida, auxilia na tomada de decisões de gestores, além de contribuir o marketing, por exemplo, na implementação de rotulagem ambiental ou na elaboração de uma Declaração Ambiental de Produto (DAP). Segundo a ISO 14040 (2006), a ACV é composta por quatro fases:

- Definição do objetivo e escopo: determinam as diretrizes a serem seguidas durante o restante do estudo, especificando o motivo, uso pretendido dos resultados, público-

alvo, limites do sistema, unidade funcional, requisitos e qualidade de dados e limitações do estudo.

- Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV): envolve a coleta de dados para criar um inventário das entradas (energia e materiais) e saídas (emissões e resíduos) associadas a cada etapa do ciclo de vida.

- Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV): traduz os dados de ICV em potenciais impactos ambientais. Para isso, devem ser definidas as categorias de impacto (categorização), os dados do inventário devem ser atribuídos a categorias de impacto específicas (classificação) e o nível do impacto deve ser avaliado de acordo com métodos de avaliação predefinidos (caracterização).

- Interpretação: combina e resume os resultados da análise de inventário e avaliação de impacto (consistente com o objetivo e escopo definidos) para chegar a conclusões, críticas e recomendações.

Na fase de ICV, os dados coletados são classificados como dados primários e secundários. Os dados primários são obtidos de medições, estimativa ou cálculo direto da fonte. Os dados secundários representam dados médios, genéricos coletados da literatura ou fornecidos por banco de dados de inventários de ACV frequentemente atualizados (Harvey et al., 2016).

Segundo o manual do sistema ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*), a preferência inicial na obtenção de dados é a medição dos dados juntamente ao operador do processo. Por outro lado, quando dados primários e os dados dos fornecedores têm baixa completude ou representatividade, recomenda-se dar preferência a dados de terceiros que sejam bem documentados e dados secundários mais exatos, precisos e completos (JRC-IES, 2010).

Devido as complexidades e as particularidades de cada projeto, AzariJarif *et al.* (2016) afirmam que a fase de ICV de pavimentos está sujeita principalmente às dificuldades durante a coleta de dados de materiais, emissões e fluxo de energia para modelagem de processos. Deste modo, ACVs de pavimentos são geralmente realizadas com uso de inventários, como Ecoinvent, Gabi, ELCD (*European reference Life Cycle Database*), USLCI (*US Life Cycle Inventory Database*), etc.

Conforme Pré (2016), mesmo que muitos dados secundários estejam disponíveis em inventários, alguns processos ou materiais terão que ser coletadas diretamente nas empresas específicas. Para isto, dependendo do tempo e orçamento disponíveis para o estudo, a aplicação de questionários é uma estratégia indicada.

Krau *et al.* (2021) apontaram uma ampla predominância da utilização de dados secundários, o que se justifica pela dificuldade da obtenção de dados para todas as etapas envolvidas no processo. Além disso, esses autores apontaram baixa quantidade de publicações e poucos centros de pesquisa estudando o assunto, o que limita a ACV para pavimentação asfáltica brasileira.

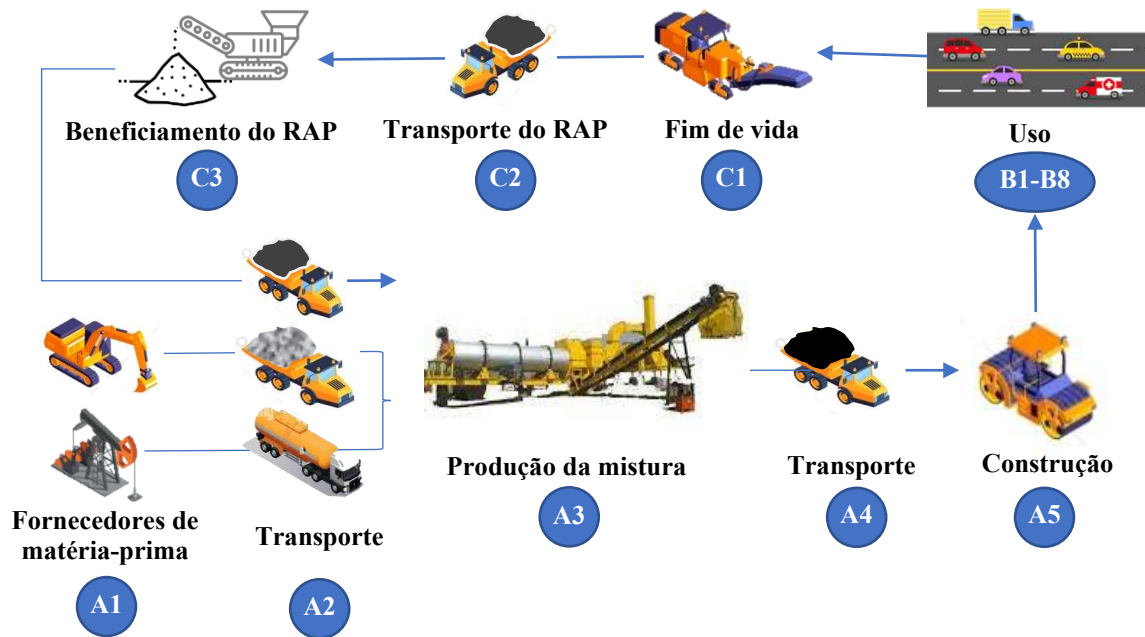
Dadas a relevância, a necessidade de padronização na coleta de dados para criação de um banco de dados e as possibilidades do uso da ACV na pavimentação brasileira, esta comunicação técnica tem como objetivo apresentar um questionário como documento padrão estruturado para coleta de dados e informações para o auxílio na complementação de dados de inventário do ciclo de vida de pavimentos asfálticos. Desta forma, auxiliando outros grupos de pesquisa no estudo de ACV de pavimentos.

6.2 Análise dos procedimentos

Segundo ISO (2006b), a seleção dos dados a serem lançados em documentos de coleta de dados e o grau de especificação necessários precisam estar alinhados com objetivo e escopo do estudo. Assim, o questionário foi estruturado com base em normativas (ISO, 2006a, 2006b), manuais (Harvey *et al.*, 2006; PRé, 2006; JRC-IES, 2010), trabalhos acadêmicos que abordam ACV de pavimentos (Vidal *et al.*, 2013; Farina *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2018; Siverio Lima *et al.*, 2021) e experiência de campo. Além disso, as divisões dos principais tópicos apresentados no questionário foram baseadas na estrutura da ISO 21930 (2017) a fim de englobar todos os dados de inputs e outputs utilizados nos processos analisados. Como resultado, a Figura 1 apresenta um esquema com as fases do ciclo de vida do pavimento asfáltico.

As fases A1, A2 e A3 são referentes à etapa de produção da mistura asfáltica. Entende-se que os dados das produções de matérias primas (agregados minerais e ligante asfáltico) (A1) até então são de complexa coleta ou mesmo há casos do produtor se negar a fornecê-las, o que justifica a utilização de dados secundários para essa subfase. Na fase A2 são contempladas as distâncias dos fornecedores de matérias-primas até a usina, assim como informações do veículo (capacidade, tipo de combustível e consumo). Na fase A3 contempla todos os processos que ocorrem dentro usina de asfalto, sendo os dados mais relevantes aqueles referentes ao processo de aquecimento e mistura dos materiais, consumo de energia elétrica da usina e de combustíveis utilizados nos maquinários de movimentação interna dos insumos.

Figura 1 - Fases do ciclo de vida do pavimento asfáltico contemplados no questionário



Fonte: Autores

A etapa do processo construtivo inicia com o transporte da mistura asfáltica (A4) até o canteiro de obras. Na fase A5 são levantados os detalhes dos maquinários para a execução de cada camada, assim como tempo de serviço, ou número de passadas, e consumo de combustível no transporte de materiais. Na fase de uso (B1-B8) é importante saber quais as estratégias de manutenção e reabilitação utilizadas durante a vida útil do pavimento, assim como os materiais e maquinários necessários para a realização desses processos.

As fases C1, C2 e C3 são referentes aos processos remoção, transporte e tratamento dos resíduos dos pavimentos asfálticos, conhecido como fresado asfáltico ou RAP (do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*). Ao final da vida útil é interessante levantar dados da produtividade e consumo de combustíveis dos maquinários responsáveis pela fresagem e desbastes das camadas asfálticas. Neste questionário, considera-se o conceito de economia circular, onde todo o RAP é reinserido de volta ao processo de produção de novas misturas. Deste modo, os dados de transporte (C2, semelhantes às fases A2 e A4), quando não realizada reciclagem in situ, consideram a movimentação do RAP à uma usina de reciclagem ou até usina asfáltica. Por fim, a fase de beneficiamento do RAP (C3) considera os processos britagem, peneiramento e separação, tornando o RAP adequado à utilização em futuras obras rodoviárias.

Na fase de aplicação de questionário, o Manual de Introdução ao SimaPro (Pré, 2006) apresenta alguns pontos a considerar para uma melhor comunicação com o responsável pelo fornecimento dos dados. Deste modo, é importante ponderar que:

- A predisposição de entregar dados depende do tipo de relacionamento entre o entrevistador e os detentores dos dados. Em alguns casos, a maior parte do esforço baseia-se em um bom relacionamento e na construção de uma relação de confiança.

- Questões de confidencialidade podem ser importantes. Uma vez que certos dados ambientais podem revelar certos segredos técnicos ou comerciais, faz-se necessário recorrer a um consultor independente que forneça dados médios representativos.

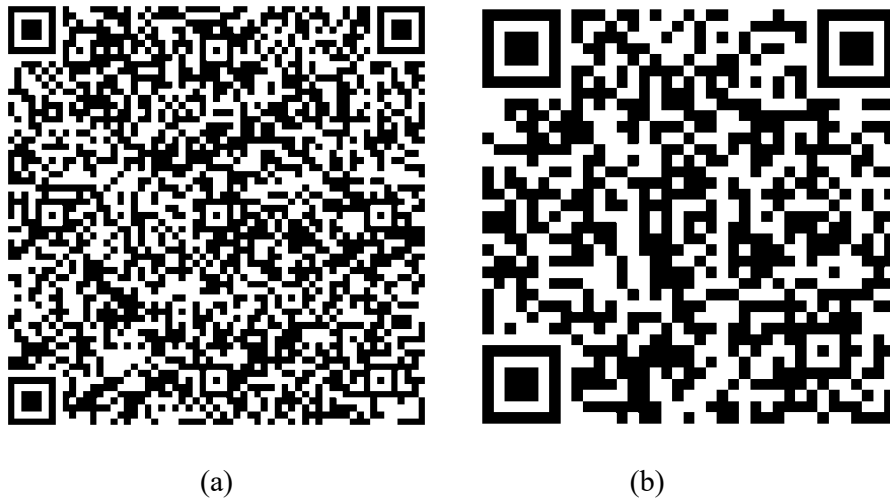
- Problemas de terminologia. O uso termos e unidades específicas de cada setor industrial é essencial, pois é comum cada setor possuir seu método de medir e expressar seus insumos.

6.3 Considerações finais

O Questionário para Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos proposto é uma ferramenta que busca o auxílio na coleta de dados na fase de ICV. O documento contempla as fases do ciclo de vida do pavimento, sendo indicado a aplicação junto aos produtores de misturas asfálticas, empresas e órgãos responsáveis pela construção e manutenção de pavimentos rodoviários.

É indicado que o questionário proposto seja modificado de modo a atender as etapas do objetivo e o escopo do estudo e, além disso, os resultados dos impactos ambientais sejam mais próximos à realidade local. Os *QR Codes* da Figura 2 dão acesso ao diretório onde pode ser baixado em arquivo editável do questionário no formato docx. (a) e a versão do questionário online utilizando a plataforma Google Forms. O questionário também pode ser verificado no Anexo A deste documento.

Figura 2 - QR Codes do questionário da ACV de pavimentos



Fonte: Autores

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP/Petrobras pela bolsa do primeiro autor, à Funcap pela bolsa de inovação tecnológica da segunda autora, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do terceiro autor; ao CNPq (CNPq 408682/2021-3) pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; BEN AMOR, M. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2187–2197, 2016.

FARINA, A. *et al.* Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 117, p. 204–212, 2017.

HARVEY, J. *et al.* **Pavement Life-Cycle Assessment Framework**. FHWA-HIF-16-014. Federal Highway Administration, Washington, 2016.

ISO. **ISO 14040**: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO. **ISO 14044**: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO. **ISO 21930: Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works—Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services**. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

JRC-IES. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment: Detailed Guidance**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

KRAU, M. M. T. *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na Pavimentação Asfáltica: uma Revisão Sistemática da Literatura. *In: XXXV ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Anais [...]*. Digital, 2021.

PRÉ. **Introduction to LCA with SimaPro**. LE Amersfoort, The Netherlands: PRé Sustainability, 2016.

SANTOS, J., BRESSI, S., CERZO, V., LO PRESTI, D., & DAUVERGNE, M. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, 138, 283–297. Elsevier BV, 2018

SIVERIO LIMA, M. S.; HAJIBABAEI, M.; HESARKAZAZI, S.; SITZENFREI, R.; BUTTGEREIT, A.; QUEIROZ, C.; HARITONOV, V.; GSCHÖSSER, F. Determining the Environmental Potentials of Urban Pavements by Applying the Cradle-to-Cradle LCA Approach for a Road Network of a Midscale German City. **Sustainability**, vol. 13, p. 12487, 2021.

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**, vol. 74, pp. 101–114, 2013.

7 AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS PARA A CIDADE DE FORTALEZA

"Este artigo é uma versão revisada e atualizada de um trabalho previamente publicado nos Anais do XXVI Congresso Iberolatinoamericano del Asfalto, com pequenas modificações no texto e na estrutura."

Potenciais impactos ambientais na produção de misturas asfálticas recicladas aplicando a abordagem de ACV *cradle-to-gate*: estudo de caso de Fortaleza

Thiago M. da Frota^{a*}, Juceline B. dos S. Bastos^b, Jorge B. Soares^a

^a Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

^b Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil

*Autor correspondente

E-mail: thiagofrota@det.ufc.br (Thiago M. da Frota), jucelinebatista@det.ufc.br (Juceline B. dos S. Bastos), jsoares@det.ufc.br (Jorge B. Soares)

RESUMO

A técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido utilizada para estimativa de impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de pavimentos, servindo como suporte à tomada de decisão na implementação de pavimentos sustentáveis. No Brasil, há carência de estudos de ACV e poucos dados de inventários para o setor. Este artigo avalia os impactos ambientais da produção de misturas asfálticas recicladas com 0 (referência), 10, 20 e 30% de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), Brasil, a partir de dados coletados com o principal produtor local. Adotou-se a abordagem *cradle-to-gate* (berço-ao-portão), que engloba todas as etapas desde a extração de matérias-primas até a mistura asfáltica pronta na usina de asfalto. A base de dados do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) utilizada foi a Ecoinvent v.3.7.1. Foram avaliados os impactos do ciclo de vida por meio do método *Impact World+* em diversas categorias, incluindo, por exemplo, a de mudanças climáticas. Os resultados indicaram que as misturas recicladas são mais ambientalmente sustentáveis em comparação com a mistura convencional e que os ganhos são proporcionais a porcentagem RAP, principalmente nas etapas de extração de matérias-primas e transporte até a usina. Em todos os cenários, os impactos ambientais são causados majoritariamente pelos processos de produção de ligante, extração dos agregados e aquecimento dos materiais para a produção das misturas. Deste modo, a utilização de materiais reciclados pode potencializar a sustentabilidade ambiental na pavimentação brasileira. Os resultados obtidos para o caso da RMF podem ser usados para fins de comparação em outras investigações.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), impactos ambientais, pavimentos sustentáveis.

7.1 Introdução

Os esforços para combater a crise climática e a preservação do meio ambiente vêm estimulando importantes debates sociais e econômicos nas últimas décadas. De acordo com o relatório parcial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla

em inglês), AR6, publicado em 2023, indica-se que as mudanças nos padrões climáticos estão associadas diretamente às ações antrópicas. O documento também estabelece uma meta para reverter esse cenário, onde o aumento da temperatura global não deve ultrapassar 1,5°C em comparação a era pré-industrial até 2050 (IPCC, 2023).

O combate às mudanças climáticas também corresponde ao 13° dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) elaborados pelos estados-membros da ONU (Organização das Nações Unidas), para o cumprimento da resolução “Transformando nosso mundo: Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável” (ONU, 2022). Em resposta, cada vez mais governos, investidores e empresas estão começando a investir em projetos que visam zerar as emissões líquidas de carbono (Rojeli *et al.*, 2015)

O transporte é a principal fonte emissora de Gases de Efeito Estufa (GEE) do setor energético brasileiro. Segundo dados do Observatório do Clima, em 2020, o setor correspondeu a 47% das emissões de GEE, sendo o transporte de cargas por caminhões responsável por aproximadamente 40% desse total (Observatório, 2021). Por outro lado, não há dados nacionais quanto às emissões causadas pelo setor de infraestrutura de pavimentos rodoviários.

Além de emissões de GEE, é importante estar ciente quanto a outras categorias de impactos ambientais negativos ao meio ambiente causados pelo setor. A remoção da camada vegetal, alteração da drenagem local, exploração de recursos naturais não renováveis e disposição de resíduos no meio ambiente são alguns dos exemplos (Xiaofeng *et al.*, 2021). Desta forma, surge a necessidade de uma visão holística e a consideração do fator ambiental na tomada de decisões de gestores e órgãos responsáveis.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), técnica oriunda da Ecologia Industrial, vem ganhando espaço no cenário mundial, quantifica os impactos ambientais de um ou mais pontos do ciclo de vida dos produtos ou serviços (ISO, 2006). Essa ferramenta possibilita identificar o desempenho ambiental de produtos ou serviços, auxiliando na tomada de ações preventivas em etapas distintas do processo.

No contexto do ciclo de vida de um pavimento rodoviário, faz-se necessário considerar uma análise dos impactos ambientais nas fases de extração de matérias-primas, produção, construção, manutenção e restauração, além da disposição dos resíduos ao final da sua vida útil. Os estudos de uma ACV completa aplicada em pavimentos indicam que as etapas que consideram os processos de produção das misturas são as que apresentam os maiores impactos ambientais (Aurangzeb *et al.*, 2014; Farina *et al.*, 2017; Siverio Lima *et al.*, 2021).

A ACV em pavimentos já é realidade em alguns países quando aplicada tanto no gerenciamento de novos projetos quanto em projetos de manutenção. No Brasil, esse é um tema ainda incipiente mesmo no campo da pesquisa (Savietto, 2017). Krau *et al.* (2021) apontaram dificuldade de uniformização da unidade funcional, prejudicando a análise comparativa entre diferentes estudos, além de uma ampla predominância da utilização de dados secundários, o que se justifica pela dificuldade da obtenção de dados para todas as etapas envolvidas no processo. Para as limitações da ACV para pavimentação asfáltica brasileira, esses autores apontaram baixa quantidade de publicações e poucos centros de pesquisa estudando o assunto.

O uso de materiais alternativos, processos produtivos aprimorados e o uso de energias renováveis tornaram-se estratégias importantes para reduzir os impactos ambientais e as emissões de GEE na engenharia viária. Uma das várias alternativas empregadas que visa contornar grande parte desses impactos é a reciclagem dos pavimentos, técnica centenária que consiste na reinsertão do material asfáltico fresado de pavimentos deteriorados, em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), na composição de novas misturas asfálticas ou camadas subjacentes. A vantagem desta técnica também garante competitividade econômica na construção e manutenção dos pavimentos, visto que o material fresado contém o componente de maior valor econômico agregado da mistura, o ligante asfáltico. Além disso, o uso do RAP vem ganhando força no país nos últimos anos devido às normatizações e regulamentações do governo e órgãos responsáveis (BRASIL, 2021; DNIT, 2021).

Nesse contexto, este artigo avalia os impactos ambientais da produção de misturas asfálticas recicladas da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), Brasil, a partir de dados coletados por meio de entrevistas com questionário estruturado na principal usina local. Para este propósito, a aplicação da ferramenta ACV focou nas etapas de extração e transporte das matérias virgens, além da etapa de aquecimento e mistura na usina. Além disso, dados obtidos da literatura e de inventários foram necessários para suprir a ausência de dados primários. Os resultados dos impactos ambientais das misturas foram comparados entre si.

7.2 Metodologia

O estudo de ACV foi elaborado com base nas normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b), e adequado ao *Federal Highway Administration's* (FHWA's) *Pavement LCA Framework* (Harvey *et al.*, 2016) quando necessário. As fases da ACV,

detalhes dos métodos, modelagem e cálculos considerados da pesquisa são descritos com mais detalhes nos subtópicos seguintes.

7.2.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV é uma técnica para avaliar os impactos ambientais de um ou mais pontos do ciclo de vida dos produtos. Segundo a norma ISO 14040 (ISO, 2006a), é dividida em 4 etapas interativas: (i) definição de objetivo e escopo; (ii) Inventário do Ciclo de Vida (ICV); (iii) Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV); e (iv) Interpretação.

A definição de objetivo e escopo determinam as diretrizes a serem seguidas durante o restante do estudo, especificando o motivo, uso pretendido dos resultados, público-alvo, limites do sistema, unidade funcional, requisitos e qualidade de dados e limitações do estudo.

Na fase de ICV, a análise envolve a coleta de dados para criar um inventário das entradas (energia e materiais) e saídas (emissões e resíduos) associadas a cada etapa do ciclo de vida. Os dados de inventário são classificados como dados primários e secundários. Os dados primários são obtidos de medições, estimativa ou cálculo direto da fonte. Os dados secundários representam dados médios, genéricos coletados da literatura ou obtidos de banco de dados de inventários de ACV.

A avaliação de impacto traduz os dados de ICV em potenciais impactos ambientais. Para isso, devem ser definidas as categorias de impacto (categorização), os dados do inventário devem ser atribuídos a categorias de impacto específicas (classificação) e o nível do impacto deve ser avaliado de acordo com métodos de avaliação predefinidos (caracterização). A avaliação de impacto também pode incluir outras etapas (normalização, agrupamento e ponderação) para facilitar a fase de interpretação, mas não são obrigatórias conforme as normas ISO.

Por fim, a fase de interpretação combina e resume os resultados da análise de inventário e avaliação de impacto (consistente com o objetivo e escopo definidos) para chegar a conclusões, críticas e recomendações.

7.2.2 Objetivo e escopo

O principal objetivo do estudo é estimar os potenciais impactos ambientais de misturas asfálticas típicas produzidas no Ceará, estado localizado na região nordeste do Brasil.

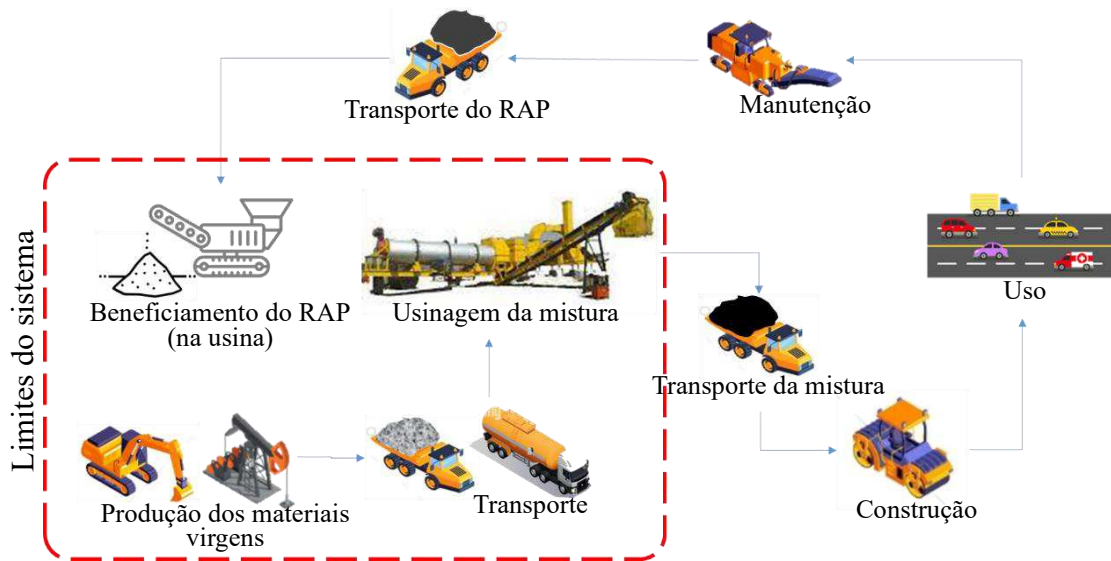
As misturas foram produzidas com uso da técnica de usinagem a quente, com ou sem a utilização de RAP, destinadas à aplicação em camadas de revestimento de pavimentos asfálticos.

A abordagem *cradle-to-gate* foi empregada neste estudo, ou seja, foi considerado e analisado o ciclo de vida parcial de misturas asfálticas contemplando as fases desde a extração e produção das matérias-primas até a mistura pronta na usina (ou seja, logo antes do transporte para o canteiro de obras). A Figura 1 apresenta os limites do sistema e os processos considerados no artigo.

Todas as matérias-primas (agregados e ligantes) foram adquiridas de fornecedores localizados no estado do Ceará. Por outro lado, o RAP foi considerado um bem secundário e, com base na abordagem *Cut-Off* onde certas etapas ou componentes do ciclo de vida do produto foram excluídos (Schrijvers *et al.*, 2016). Desta forma, todos os encargos ambientais resultantes da fresagem ou remoção do pavimento e transporte do material fresado do canteiro até a usina foram desconsiderados nos limites do sistema. Para as misturas contendo RAP, são contabilizadas apenas as cargas ambientais dos subprocessos de beneficiamento do RAP (britagem, peneiramento e separação) realizados na própria instalação da usina de asfalto (Santos *et al.*, 2017). A unidade funcional considerada para a camada asfáltica foi para 1 tonelada de mistura asfáltica com durabilidade de 20 anos. Foram analisados 4 tipos de misturas dosadas com granulometria conforme faixa C do DNIT (DNIT 031/2006), sendo: 1 mistura convencional e 3 misturas com material reciclado RAP.

Neste artigo, os dados primários foram coletados por meio de questionários respondidos pelo principal produtor de asfalto do Ceará e um dos maiores do nordeste brasileiro, sendo eles: distâncias dos fornecedores à usina, consumo de combustíveis no transporte dos insumos, composição dos materiais das misturas, produção anual da usina de asfalto e gastos energéticos à produção das misturas asfálticas. Os dados secundários foram relacionados principalmente à análise de inventário da extração e produção de todos os componentes da mistura asfáltica, combustíveis e veículos de transporte. Tais processos e materiais foram obtidos principalmente do banco de dados da *Ecoinvent* v3.7.1 (Ecoinvent Center, 2020). Quando algum elemento escolhido no banco de dados tem uma representatividade global, o SimaPro possibilita a modificação dos parâmetros de entradas a fim de adequar o quanto possível à realidade geográfica do estudo.

Figura 1 - Limites do sistema



Fonte: Autores

7.2.3 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Na fase de produção dos materiais foram consideradas as subfases de produção e transporte dos materiais virgens. As quantidades de agregados e ligante asfáltico tiveram como base a produção de uma mistura asfáltica densa com 5% de ligante. Para melhor compreensão das vantagens e desvantagens dos potenciais impactos ambientais de misturas recicladas foram consideradas misturas asfálticas com diferentes RBR (do inglês, *RAP Binder Ratio*), ou seja, a proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. Desta forma, é possível a comparação destas com uma mistura convencional de referência.

A Tabela 1 resume a composição das misturas analisadas especificando as quantidades de cada um dos elementos que compõem cada opção, enquanto a Tabela 2 apresenta os processos unitários do Ecoinvent associados com a produção e transportes de agregados e ligante.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros variáveis de cada mistura asfáltica

Misturas	Massa em kg/t		
	Agregados + filler (m_{agr})	Ligante (m_{lig})	RAP (m_{RAP})
M0	945	55	0
M10	859	49	92
M20	773	44	183
M30	687	38	275

Fonte: autores

Tabela 2 - Processos e processos unitários correspondentes do Ecoinvent

Processo	Processo unitário Ecoinvent
Produção de agregados virgens	<i>Gravel, crushed gravel production, crushed {Brasil}</i>
Produção de ligante asfáltico virgem	<i>Pitch petroleum refinery operation {Brasil}</i>
Transporte de agregados e ligante	<i>Transport, freight, lorry > 32 metric tonne, EURO5 {GLO}</i>

Fonte: Autores

Na subfase de produção dos agregados virgens, representados na Tabela 1 como Agregados + filler (m_{agr}), o material de preenchimento é proveniente do mesmo processo de britagem dos outros materiais pétreos. A subfase de transporte dos materiais virgens para a usina de asfalto tem como unidade padrão a tonelada-quilômetro (t.km) que equivale ao transporte de 1 tonelada de carga a 1km de distância. As distâncias dos fornecedores de ligante e da pedreira para a usina asfáltica são de 33km e 15km, respectivamente. O consumo médio de 2,5L de diesel por km para agregados e 2L de diesel por km para ligante foram calculados considerando o trajeto de ida e volta. O padrão de emissões EURO 5 foi adotado como sendo similar às emissões de veículos pesados novos da Fase P-7 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE (CONAMA, 2008).

Os cenários de produção das misturas asfálticas são definidos pela variação de RBR. As misturas a quente são produzidas em uma única planta onde existe 2 usinas de asfalto tipo drum-mixer contrafluxo com adição do RAP a frio em um anel de reciclagem. Cada usina é alimentada por um tipo diferente de energia para aquecimento, sendo o gás natural e o diesel. Os dados coletados na usina analisada foram referentes ao ano de 2021. A produção média anual de mistura asfáltica registrada foi de 100.000 toneladas, sendo distribuída igualmente entre as 2 usinas, e a quantidade de RAP coletada foi de 23.000 toneladas. A energia térmica necessária para produzir cada tipo de mistura varia com a porcentagem de RAP, o teor de umidade dos materiais e a temperatura ambiente.

A Equação 1, proposta por Santos *et al.* (2018), foi usada para calcular as demandas específicas de Energia Térmica (ET) necessárias para produção de cada mistura asfáltica analisada.

$$ET = \left[\sum_{i=0}^M m_i \times C_i \times (t_{mis} - t_0) + m_{lig} \times C_{lig} \times (t_{mis} - t_0) + m_{RAP} \times C_{RAP} \times (t_{mis} - t_0) + \sum_{i=0}^M m_i \times H_i \times C_{agu} \times (100 - t_0) + L_v \times \sum_{i=0}^M m_i \times H_i + \sum_{i=0}^M m_i \times H_i \times C_{vap} \times (t_{mis} - 100) \right] \times (1 + CL) \quad (1)$$

Onde ET é a energia térmica (MJ) necessária para produzir 1 tonelada de mistura asfáltica. As demais variáveis e valores dos parâmetros, assim como suas respectivas unidades, considerados para calcular a ET de cada mistura são especificados nas Tabelas 1 e 3, sendo baseadas em dados da literatura, nas condições e práticas reais da usina asfáltica localizada em Fortaleza.

Tabela 3 - Parâmetros considerados para o cálculo da Energia Térmica (ET)

	Parâmetro	Valor	Unidade
C _{lig}	Coefficiente de calor específico do ligante (50/70)	2,09 [23]	kJ/kg/°C
C _{agr}	Coefficiente de calor específico dos agregados (graníticos)	0,74 [21]	kJ/kg/°C
C _{agu}	Coefficiente de calor específico da água (26°C)	4,18	kJ/kg/°C
C _{vap}	Coefficiente de calor específico do vapor de água	1,83	kJ/kg/°C
C _{RAP}	Coefficiente de calor específico do RAP	0,74 [21]	kJ/kg/°C
H _{agr}	Teor de umidade dos agregados	3	%/m _{agr}
L _v	Calor latente de vaporização da água	2256	kJ/kg
CL	Fator <i>Casing Losses</i>	25 [21]	%
T ₀	Temperatura ambiente	26	°C
t _{mis}	Temperatura da mistura asfáltica	175	°C
m _{lig}	Massa do ligante	ver Tabela 1	kg
m _{agr}	Massa dos agregados e filler	ver Tabela 1	kg
m _{RAP}	Massa do RAP	ver Tabela 1	kg

Fonte: Autores

O fator *Casing Loss* (CL) é o componente da ET que representa o calor utilizado pelo misturador, mas que acaba não sendo usado para aquecer algum componente da mistura, irradiando posteriormente para a atmosfera (NASEM, 2014). A empresa não foi capaz de fornecer um valor específico de CL, sendo retirado de Santos *et al.* (2018). Os valores dos coeficientes de calor específico do ligante virgem 50/70 e dos agregados de origem granítica foram retirados de Siverio Lima *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2018), respectivamente. Em 2021, a temperatura ambiente média anual da usina em Fortaleza foi de 26°C, sendo assumida como temperatura inicial dos agregados virgens e do RAP. A temperatura t_{mis} é a temperatura final da massa da mistura asfáltica sendo a mesma para todos os casos (175°C).

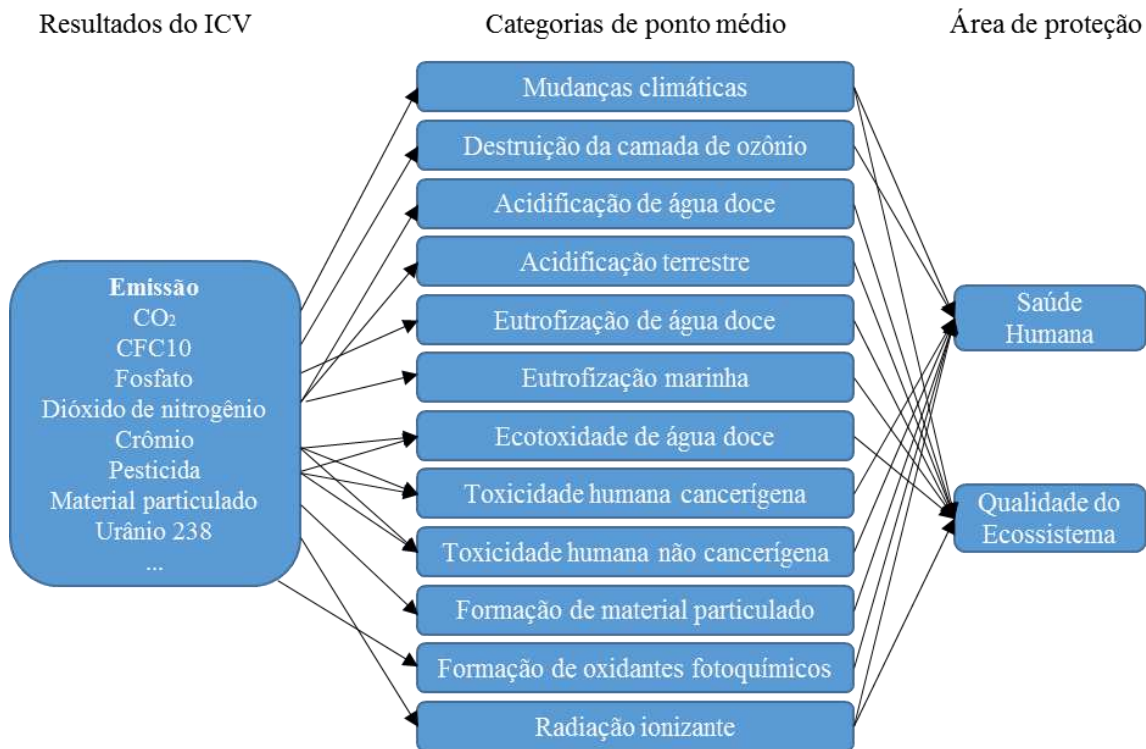
Os impactos ambientais da fase de produção das misturas foram incluídos na modelagem como o processo unitário “*heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1 MW | heat, district or industrial, other than natural gas | cut-off, U*” e “*heat production, natural gas, at industrial furnace > 100 kW | heat, district or industrial, natural gas | cut-off, U*” da base de dados da *Ecoinvent*.

Os dados referentes aos processos e consumo energético do beneficiamento do RAP não foram fornecidos pela empresa. Neste caso, a subfase de beneficiamento do RAP componente das misturas recicladas foi modelada como processo unitário “*Limestone, crushed, for mill | production*” (Siverio Lima *et al.*, 2021), disponível na base de dados da *Ecoinvent*. Por fim, todas as entradas e saídas foram modeladas usando SimaPro v 9.2.0.2 (PRé Consultants, 2019).

7.2.4 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Os dados do inventário foram agregados e analisados como impactos ambientais, sendo aplicadas as etapas de classificação e caracterização neste estudo. Os potenciais impactos ambientais foram medidos por meio da aplicação do método de avaliação de impacto *IMPACT World+* ao nível do ponto médio (Bulle *et al.*, 2019). Especificamente, as seguintes categorias de impacto foram consideradas: Mudanças climáticas, Destruição da camada de ozônio, Ecotoxicidade da água doce, Toxicidade humana cancerígena, Toxicidade humana não cancerígena, Acidificação terrestre, Acidificação de água doce, Eutrofização de água doce, Eutrofização marinha, Formação de material particulado, Formação de oxidantes fotoquímicos e Radiação ionizante. A Figura 2 relaciona as categorias de impactos de ponto médio selecionadas com os resultados de ICV e os danos à saúde humana e à qualidade do ecossistema.

Figura 2 - Categorias de impactos de pontos médios selecionados e danos para o método *IMPACT World+*



Fonte: Adaptado de Bulle *et al.* (2019)

7.3 Resultados

A Tabela 4 traz os resultados da AICV da mistura convencional, M0, em todas as categorias de impacto consideradas. A Figura 3 apresenta a variação relativa das categorias conforme as misturas asfálticas recicladas analisadas, sendo calculadas com base na mistura convencional. A lógica da interpretação dos resultados é entendida de modo que números relativos negativos associados às misturas recicladas representem uma piora nos resultados de potenciais impactos da AICV em relação à mistura convencional. Por outro lado, os números positivos representam melhoras no perfil ambiental.

Os resultados na Figura 2 indicam que todas as misturas contendo RAP apresentam reduções em todas as categorias de impacto em comparação a mistura de referência. Os ganhos ambientais são tão maiores quanto maior é o RBR na mistura, sendo R30 a opção de mistura mais ecologicamente sustentável entre todas as opções analisadas. As maiores reduções da R30 são observadas nas categorias de Eutrofização da água doce, Radiação Iônica e Depleção de camada de ozônio (29%, 28,9% e 28,8%, respectivamente). A

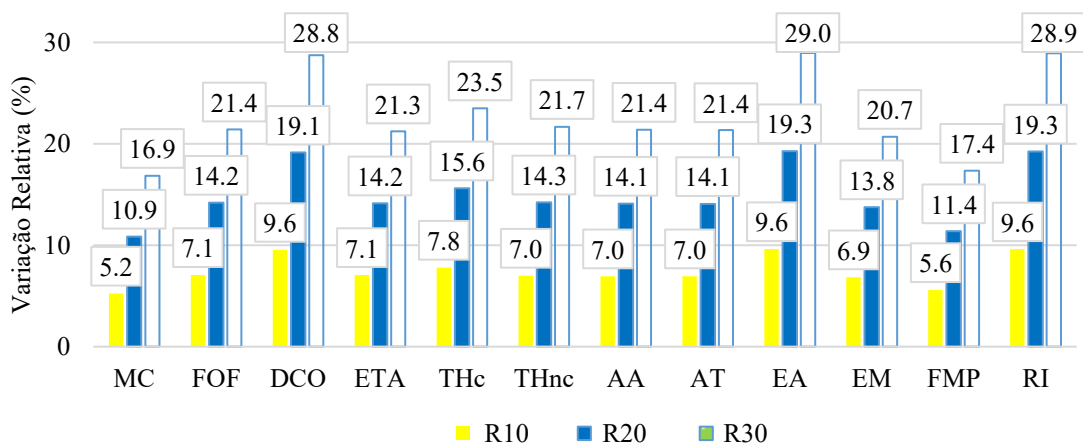
primeira causa danos à qualidade do ecossistema enquanto as duas últimas estão relacionadas com danos à saúde humana (Vega *et al.*, 2016).

Tabela 4 - AICV da mistura convencional (Mref)

Categoria de impacto	Unidade	Mref	R15	R30
Mudança climática (MC)	kg CO2 eq	4,35E+04	4,00E+04	3,62E+04
Formação de oxidantes fotoquímicos (FOF)	kg NMVOC eq	3,49E+02	3,12E+02	2,74E+02
Depleção da camada de ozônio (DCO)	kg CFC-11 eq	4,56E-02	3,91E-02	3,25E-02
Ecotoxicidade da água doce (ETA)	CTUe	1,36E+08	1,21E+08	1,07E+08
Toxicidade humana cancerígena (THc)	CTUh	4,78E-04	4,22E-04	3,66E-04
Toxicidade humana não cancerígena (THnc)	CTUh	2,13E-03	1,90E-03	1,67E-03
Acidificação de água doce (AA)	kg SO2 eq	9,12E-04	8,16E-04	7,16E-04
Acidificação terrestre (AT)	kg SO2 eq	7,85E-01	7,02E-01	6,17E-01
Eutrofização da água doce (EA)	kg PO4 eq	7,13E+00	6,10E+00	5,06E+00
Eutrofização da água marinha (EM)	kg N eq	6,89E+00	6,18E+00	5,46E+00
Formação de material particulado (FMP)	kg PM2.5 eq	2,82E+01	2,58E+01	2,33E+01
Radiação ionizante (RI)	Bq C-14 eq	1,17E+06	1,00E+06	8,32E+05

Fonte: Autores

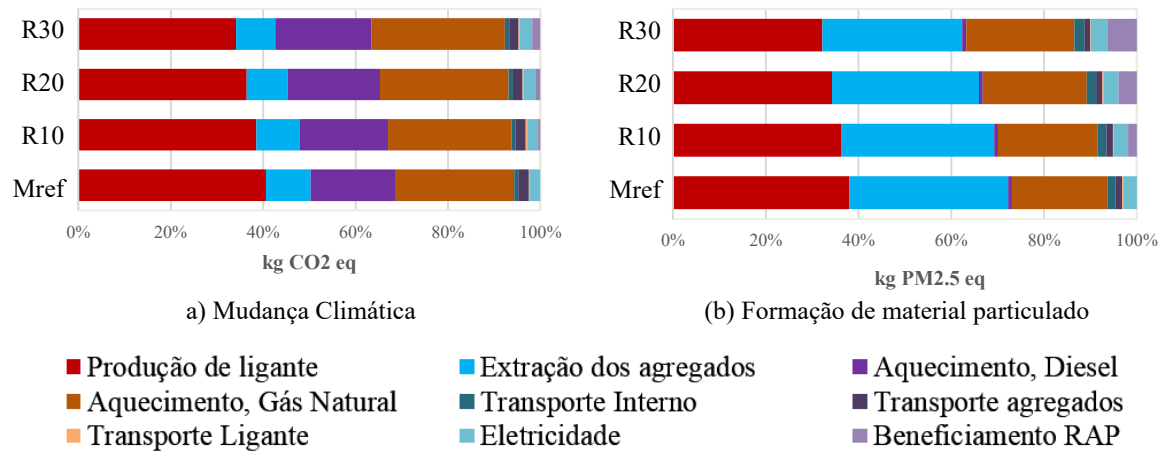
Figura 3 - Potenciais impactos ambientais relativos das misturas recicladas (R10, R20 e R30) comparadas à mistura de referência, Mref.



Fonte: Autores.

A Figura 4 mostra a contribuição relativa de cada fase e subfase na pontuação total dos impactos ambientais relacionados à produção de misturas asfálticas. Para visualizar as demais figuras referentes a este estudo, favor consultar o Anexo B da dissertação.

Figura 4 - Contribuição relativa dos processos em relação às categorias de impactos ambientais



Fonte: Autores.

De um modo geral, na Figura 4 é possível notar que, em todos os cenários, os impactos ambientais são causados majoritariamente pelos processos de produção de ligante, extração dos agregados e aquecimento dos materiais para a produção das misturas, algo observado também em Siverio Lima *et al.* (2020) e Vega *et al.* (2020). Por outro lado, a ordem de influência desses processos varia com a categoria de impacto.

A etapa de produção de ligante é mais influente nas categorias de EA, RI e DCO com contribuição média de aproximadamente 94% para cada. Já a extração de agregados contribui com maior impacto nas categorias de ETA, THc e EM com contribuição média de 82, 78 e 62%, respectivamente. Portanto, estudar materiais alternativos para aplicação em camadas de pavimentos flexíveis, além de diminuir o consumo de matérias-primas não renováveis, também reduzem as emissões já citadas. Nas condições apresentadas, o processo de aquecimento e secagem dos materiais é o que mais contribui, com uma média de 40%, para a emissão de gases do efeito estufa e representado na categoria MC.

Quando analisado somente os processos e subprocessos que ocorrem na usina, o aquecimento representa uma média de 92% de contribuição em MC e mais de 80% em média na contribuição das categorias de DCO, THnc, AT, AA, EA e RI. Assim, misturas mornas são incentivadas na pavimentação, visto que a diminuição de temperatura na usinagem reduz tanto as emissões quanto o consumo energético. Ainda nesse contexto, no cenário de maior RBR, mistura R30, o beneficiamento do RAP teve uma contribuição expressiva na ETA, EM e FOF (57, 39 e 32%, respectivamente)

Os transportes de matérias-primas, a movimentação de materiais na usina e a eletricidade contribuíram com menos de 5% para todas as categorias de impacto e em todos os cenários, sendo essas as atividades relativamente menos impactantes quando comparadas aos demais processos abordados na pesquisa.

Os ganhos ambientais são tão maiores quanto maior é RBR na mistura. Tal comportamento é observado principalmente nas etapas de extração das matérias-primas virgens, assim como o transporte delas até a usina. Desta forma, a redução de emissões em todas as categorias de impacto é compatível com a substituição desses componentes nas misturas recicladas M10, M20 e M30 em comparação a M0, ou seja, 10, 20 e 30%, respectivamente.

7.4 Conclusões

Nesse artigo foram estimados os potenciais impactos ambientais de misturas asfálticas usadas na RMF, sendo comparadas 3 misturas recicladas a quente a uma mistura convencional. A técnica de ACV comparativa atribucional com abordagem de *cradle-to-gate* foi utilizada. A ACV foi conduzida tendo como referências as normas da ISO 14044 e a *Pavement LCA Framework* proposta pela FHWA. Foram considerados 3 níveis de RBR (10, 20, 30%) para misturas asfálticas aplicadas em camadas asfálticas, considerando a mesmo desempenho durabilidade. Além disso, foram considerados dados coletados da principal usina do local para compor parte do inventário. Por fim, o estudo de caso foi modelado utilizando o software Simapro v9.2.0.2 e os impactos ambientais foram estimados com base na metodologia de avaliação de impacto *IMPACT World+* em 12 categorias de impacto.

A partir da metodologia, premissas e resultados obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- As misturas recicladas são as opções mais ambientalmente sustentáveis em comparação a mistura convencional.
- Os ganhos ambientais são tão maiores quanto maior é a taxa do teor ligante substituída nas misturas analisadas.
- Os impactos ambientais avaliados tiveram influência principalmente dos processos de extração de agregados e produção do ligante asfáltico.
- As etapas de extração de matérias-primas e transporte delas até a usina sofrem reduções nas emissões em todas as categorias diretamente proporcionais a quantidade de RAP na mistura.

- Os processos de transporte das matérias-primas e a movimentação interna na usina de materiais representaram as menores contribuições em relação aos demais processos no limite do sistema.

A consideração de dados secundários, ou seja, informações coletadas a partir de fontes já existentes, de forma predominante aponta um desafio que o Brasil deve superar nos próximos anos. A grande extensão geográfica, diferentes tecnologias e uma variedade de materiais disponíveis em projetos de misturas asfálticas são algumas das variáveis que demandam esforço para a construção de um banco de dados mais completo e condizente com diversas realidades.

Apesar do estudo evidenciar indícios dos benefícios ambientais com utilização do RAP, faz-se necessário o complemento das outras fases do ciclo de vida (construção, manutenção e remoção ao final do ciclo de vida), assim como a ACV da estrutura como um todo com a inclusão das camadas subjacentes. Neste caso, também é necessária a análise de ACV no tempo com o estudo do desempenho mecânico das misturas e a evolução de falhas das mesmas com uso de software de dimensionamento.

A abordagem *cradle-to-gate* também pode fomentar a adoção de outros instrumentos, como, por exemplo, a elaboração de Declarações Ambientais de Produto - DAPs (ou EPDs, do inglês, *Environmental Product Declarations*) (EPD System, 2017). Essas ações podem auxiliar em compras públicas sustentáveis, estimulando padrões de produção e consumo mais sustentáveis no setor da pavimentação rodoviária.

Outro desafio para pesquisas futuras é de interligar a ACV ambiental às avaliações social e econômica de maneira a formar um pensamento de ciclo de vida completo de misturas asfálticas para auxiliar na tomada de decisões. Tais esforços requerem uma ampla discussão, participação e esforço de representantes do governo, academia e sociedade civil.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP/Petrobras pela bolsa do primeiro autor, à Funcap pela bolsa de inovação tecnológica da segunda autora, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do terceiro autor; ao CNPq (CNPq 408682/2021-3) pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

- AURANGZEB, Q. et al. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resource, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 77–86, 2014.
- BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 031/2006**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.
- BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 033/2021**: Pavimentação - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2021.
- BRASIL. **Resolução nº 14**, de 8 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Edição 129, n. 129, p. 53, 12 jul. 2021.
- BULLE, C. et al. IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 9, p. 1653-1674, 2019.
- CONAMA. **Resolução n. 403**, de 11 de novembro de 2008: Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 dez. 2008.
- ECOINVENT CENTER. **Ecoinvent Database: Version 3.7.1**. Zurich, Switzerland, 2020.
- EPD SYSTEM. **General Programme Instructions for the International EDP® System**. 2017.
- FARINA, A., ZANETTI, M. C., SANTAGATA, E., BLENGINI, G. A. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 117, p. 204–212, 2017.
- HARVEY, J. et al. **Pavement Life-Cycle Assessment Framework**. FHWA-HIF-16-014. Federal Highway Administration, Washington, 2016.
- ISO. **ISO 14040**: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Geneva, Switzerland, 2006.
- ISO. **ISO 14044**: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland, 2006.
- KRAU, M. M. T. et al. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na Pavimentação Asfáltica: uma Revisão Sistemática da Literatura. In: XXXV ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. **Anais [...]**. Digital, 2021.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* **IPCC, 2021: 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, 2021.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies.** 2014. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: <https://doi.org/10.17226/22272>.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões brasileiras de Gases do Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020.** Documento Analítico, 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 20 de maio de 2022

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/download/50190/91863>. Acesso em: 20 de maio de 2022.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Tutorial.** LE Amersfoort, The Netherlands: PRÉ Sustainability, 2019.

ROGELJ, J., SCHAEFFER, M., MEINSHAUSEN, M., KNUTTI, R., ALCAMO, J., RIAHI, K., & HARE, W. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection. **Environmental Research Letters**, 10(10), 105007. IOP Publishing, 2015.

SANTOS, J., BRESSI, S., CERESO, V., LO PRESTI, D., & DAUVERGNE, M. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, 138, 283–297. Elsevier BV, 2018

SANTOS, J., FLINTSCH, G., & FERREIRA, A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. **Resource, Conservation and Recycling**, 116, 15–31. Elsevier BV, 2017.

SAVIETTO, J. Análise de impactos ambientais da restauração de pavimentos asfálticos pela avaliação do ciclo de vida. 2017. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SCHRIJVERS, D. L., LOUBET, P., SONNEMANN, G. Critical review of guidelines against a systematic framework with regard to consistency on allocation procedures for recycling in LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 21(7), 994–1008. Springer Science and Business Media LLC, 2016

SIVERIO LIMA, M. S.; HAJIBABAEI, M.; HESARKAZAZI, S.; SITZENFREI, R.; BUTTGEREIT, A.; QUEIROZ, C.; HARITONOV, V.; GSCHÖSSER, F. Determining the Environmental Potentials of Urban Pavements by Applying the Cradle-to-Cradle LCA Approach for a Road Network of a Midscale German City. **Sustainability**, vol. 13, p. 12487, 2021.

SIVERIO LIMA, M. S.; HAJIBABAEI, M.; HESARKAZAZI, S.; SITZENFREI, R.; BUTTGEREIT, A.; QUEIROZ, C.; TAUTSCHNIG, A.; GSCHÖSSER, F. Environmental

Potentials of Asphalt Materials Applied to Urban Roads: Case Study of the City of Münster. **Sustainability**, vol. 12, no. 15, p. 6113, 2020.

VEGA A., D. L.; SANTOS, J.; MARTINEZ-ARGUELLES, G. Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction. **International Journal of Pavement Engineering**, vol. 23, no. 4, pp. 923–936, 2020.

XIAOFENG, L.; SIWEI, L.; YUE, Y. **Analysis of The Impact of Highway Construction Related to Social and Environment**. In: L. ZHANG, S. DEFILLA, & W. CHU, ORGS. E3S WEB OF CONFERENCES, v. 233, p. 01113, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202123301113.

8 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO, AMBIENTAL E ESTRUTURAL, DE MISTURAS RECICLADAS A QUENTE PARA TOMADA DE DECISÃO

"Submetido ao periódico *Construction and Building Materials*."

Evaluation of environmental and structural performance of asphalt mixtures with recycled asphalt pavement

Thiago M. da Frota^{a*}, Aline C. F. Vale^a, Juceline B. dos S. Bastos^b, Jorge B. Soares^a

^a Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

^b Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil

*Autor correspondente

E-mail: thiagofrota@det.ufc.br (Thiago M. da Frota), alinevale@det.ufc.br (Aline C. F. Vale) jucelinebatista@det.ufc.br (Juceline B. dos S. Bastos), jsoares@det.ufc.br (Jorge B. Soares)

ABSTRACT

The use of simulation techniques, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), and effective management in mixture production are sustainable practices that help and improve green pavement design. This study evaluated the environmental and structural performance of recycled asphalt added to asphalt mixtures in the surface layer. To evaluate the environmental performance Life Cycle Assessment (LCA) was used. For the structural performance analysis, laboratory tests and pavement design simulations were performed on asphalt mixtures from Ceará. The fine fraction of RAP (< 4.75mm) was used to fabricate the 0, 15 and 30% RAP Binder Ratio (RBR) mixtures (Mref, R15, and R30, respectively). Multicriteria Decision Analysis (MCDA) was performed to integrate the environmental and structural performance results into a single score for each mixture, which showed that R30 had the highest overall performance score. This study suggests that the use of modeling softwares pointed the 30% RBR mixtures can contribute to the development of more sustainable road construction practices when compared with raw and 15% RBR.

Keywords: Recycled asphalt mixtures, Life Cycle Assessment, Environmental performance, Structural performance, Sustainable Road, Multicriteria decision analysis.

8.1 Introduction

To control global warming to 1.5°C above pre-industrial levels, Greenhouse Gas (GHG) emissions must be drastically, rapidly, and sustainably reduced across all human activities (IPCC, 2023). Transportation is the main source of GHG emissions in the Brazilian energy sector with road traffic transportation responsible for approximately 42% of that total (Observatório do Clima, 2023). Moreover, there is no national data regarding emissions caused by the Brazilian road pavement infrastructure sector regarding their life cycle.

The pavement life cycle assessment (LCA) is already a reality in some countries when applied to both new project management and maintenance projects. Regarding LCA studies that cover all pavement stages (materials, production, use, maintenance), they indicate that the stages of production processes of the mixtures are the ones that have the greatest impact (Aurangzeb *et al.*, 2014; Farina *et al.*, 2017; Bressi *et al.*, 2019; Siverio Lima *et al.*, 2021). In Brazil, this is still an incipient theme, even when considered the research area (Vega *et al.*, 2022). There are difficulties in standardizing the functional unit, hindering comparative analysis between different studies. Also, there is a predominance of using secondary data, which is justified by the difficulty in obtaining data for all stages involved in the process (Saviotto, 2017)). For the limitations of LCA for Brazilian asphalt pavement, the amount of data to enhance analysis is not as satisfactory as expected.

One of the alternatives employed to mitigate most of these impacts is pavement recycling, a traditional technique that involves the incorporation of milled asphalt material from deteriorated pavements, known as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), into the composition of new asphalt mixtures or underlying layers (Krau *et al.*, 2021). The advantage of this technique also guarantees economic competitiveness in pavement construction and maintenance since the milled material contains the highest economically valuable component of the mixture, the asphalt binder. In Brazil, there is no standardized recommendation RBR to be used, but in Ceará state, it is a common practice to use an average of 15% RBR mixtures.

In the last few decades, many regulations have often restricted the use of RAP to no more than 25 percent in the surface layer due to the negative impact of high RAP content on the long-term performance of asphalt concrete (Kandall and Mallick, 1997). Today, this percentage increases. For example, the utilization of a rejuvenator represents one of the solutions for achieving feasibility in high RAP mixtures (>25%). However, asphalt plants face a major challenge due to the variability in RAP sources, which directly impacts the type and extent of binder aging within the material. The interaction between the rejuvenator type and different RAP binders can lead to varying softening effects (Huang *et al.*, 2015). Consequently, the positive effects observed with a rejuvenator on one RAP source cannot be guaranteed to produce similar outcomes when applied to RAP obtained from a different source (Moghaddam, and Baaj, 2016). Additionally, limitations regarding RAP utilization are associated with specific material properties such as the presence of fines and RAP chunks (Zaumanis and Haritonovs, 2018; Zaumanis, 2021). A good RAP management practices are important to ensure the greatest economic benefit for RAP and the highest quality of recycled asphalt mixtures (West, 2015).

The inadequate performance could potentially nullify the environmental and economic advantages of using RAP materials (Aurangzeb and Al-Qadi, 2014). Thus, a project-specific break-even level was proposed for high RAP mixtures' performance, demonstrating that such mixtures are more sustainable than raw mixtures only if they can outperform a certain proportion of its performance. This paper aims to evaluate the environmental impact and pavement performance simulation of two recycled asphalt mixtures in comparison to a raw mixture, providing a ranking of the mixtures.

8.2 Materials and Methods

8.2.1 Materials and mixture design

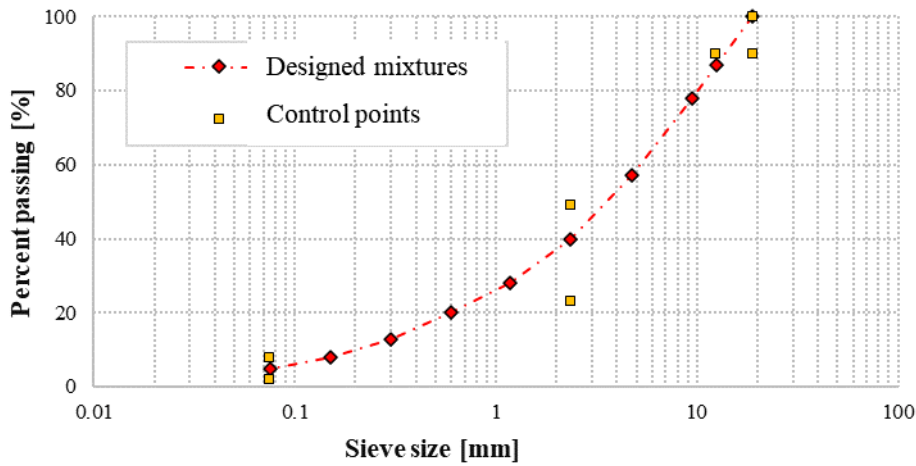
Three different asphalt mixtures with different amounts of RAP were utilized. The neat asphalt binder has a penetration grade of 50/70 with Performance Grade (PG) 64-XX (AASHTO, 2022). The mineral aggregates of granite origin and RAP used in this research were collected from Insttale Engenharia, a company located in the Metropolitan Region of Fortaleza. In the laboratory, RAP was separated using a mechanical sieve to obtain only its fine fraction, i.e., the portion passing through the 4.75mm sieve, the fraction that contains the highest percentage of asphalt cement, as the particles in this fraction have the highest surface area originally coated with asphalt cement. The fine fraction of RAP had the binder content of 5.9% (DNIT, 2011).

The reference mixture (Mref) was designed following an adaptation of the Superpave methodology (AASHTO, 2017). For the recycled mixtures, the addition of RAP was based on the RBR (RAP Binder Ratio) parameter, which represents the proportion of binder from RAP in relation to the total asphalt binder in the mixture. Two mixtures with RBR values of 15 and 30%, R15 and R30, respectively, were designed following the same design method. Prior to preparing the mixtures, volumetric properties and aggregate gradation were standardized using an aggregate sieving process and gyratory compaction control.

The binder content and air voids for all mixtures was set at 4.5% and 4%, respectively. Mixing and compaction temperatures were 154 °C and 142 °C, respectively. In the preparation of R15 and R30 mixtures, RAP was heated for 4 hours prior to mixing at a temperature of 150°C, as determined by Pires (2018), as well as adaptations suggested by Gaspar (2019). Therefore, it is considered that the binder present in the RAP reaches 100% DoA (Degree of Activity).

The same gradation was maintained for all mixtures by sieving prior to weighing and mixture fabrication. The RAP aggregate is used as the gradation curve after complete binder extraction. The sieves used ranged from 19.0mm to 0.075mm, with aggregate sizes falling within the limits of gradation C of DNIT and control points (AASHTO, 2017), as shown in Figure 1.

Figure 1 - Gradation of the mixtures



8.2.2 Asphalt mixture linear viscoelastic behavior characteristic

The stiffness evaluation based on the linear viscoelastic models was carried out by means of the Dynamic Modulus test (DNIT, 2019). The samples were subjected to temperatures of -10, 4, 20, 40, and 54°C, and a sinusoidal load with frequencies of 25.0, 10.0, 5.0, 1.0, 0.5, and 0.1Hz was applied at each temperature. The loads applied to result in axial deformations within the Linear Viscoelastic Region (LVER) ranged between 50 and 75 microstrains ($\mu\text{m}/\text{m}$). According to Bari and Witczak (2006) and Gouveia (2016), the dynamic modulus master curve of asphaltic mixtures can be estimated using a sigmoidal function based on the tested dynamic modulus ($|E^*|$). Equation (1) demonstrates this approximation where f_{red} is load time at the reference temperature; δ is the minimum value for dynamic modulus; $\delta+\alpha$ is the maximum value for dynamic modulus; β and γ are parameters that describes the sigmoidal function.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta+\gamma \cdot \log f_{red}}} \quad (1)$$

8.2.3 Asphalt mixture fatigue damage characterization

Fatigue characterization was performed using a uniaxial tension-compression test. AASHTO M 107-2018 describes the testing and analysis procedures to obtain S-VECD model parameters, using loading frequency of 10Hz and a temperature of 19°C. Material integrity, represented by the characteristic damage curves (C vs S), was obtained by fitting power law equation [cf. Equation (2)], in which C11 and C12 are adjustment coefficients.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (2)$$

The GR failure criterion Sabouri and. Kim (2014) was calculated using Equation (3), which includes the fitting coefficients Y and Δ . GR represents the rate of change of the average pseudo strain energy released per cycle during the entire test. N_f is the number of cycles in which fatigue failure occurs, determined by the phase angle decrease during the test.

$$G^R = Y(N_f)^\Delta \quad (3)$$

8.2.4 Asphalt mixture permanent deformation characterization

To characterize permanent deformation in asphalt mixtures the triaxial SSR test was used, following protocols outlined by Kim and Kim (2017) and Vale (2020). The test involves 600 loading cycles divided into three sections of 200 cycles, with varying levels of vertical stress applied at two different temperatures and a constant confining stress of 69kPa. For the high-temperature test (Th) at 47°C (Choi, 2013), researchers applied vertical stresses of 689, 483, and 896kPa. Each stress level involved 200 loading cycles with a load application period of 0.4s and a rest period of 3.6s. For the low-temperature test (Tl) at 17°C (Choi, 2013), the applied stresses are 483, 689, and 896kPa, to each section of loading, with a load application period of 0.4s and a rest period of 1.6s. The shift model, mainly based on Eqs. (4)–(6) was used to analyze the data obtained from the SSR tests. Protocol indicates the obtention of a reference curve for predicting rutting evolution and to define main model parameters, data from the first 200 cycles of the Th are used.

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\varepsilon_0 \times N_{red}}{(N_1 + N_{red})^\beta} \quad (4)$$

$$a_{\xi_p} = p_1 \log \log(\xi_p) + p_2 \quad (5)$$

$$a_{\sigma_v} = d_1 \left(\frac{\sigma_v}{p_a} \right)^{d_2} \quad (6)$$

In Eqs. (4)–(6), ε_{vp} is the viscoplastic strain (i.e., permanent strain); ε_0 , N_1 , β are coefficients of the incremental model; N_{red} is the reduced number of cycles at reference loading conditions; a_{ξ_p} is the reduced load time shift factor; ξ_p reduced load time; p_1 , p_2 and p_3 are the coefficients of reduced load time shift factor; a_{σ_v} vertical stress shift factor, σ_v is vertical stress; d_1 and d_2 are coefficients of vertical stress shift factor.

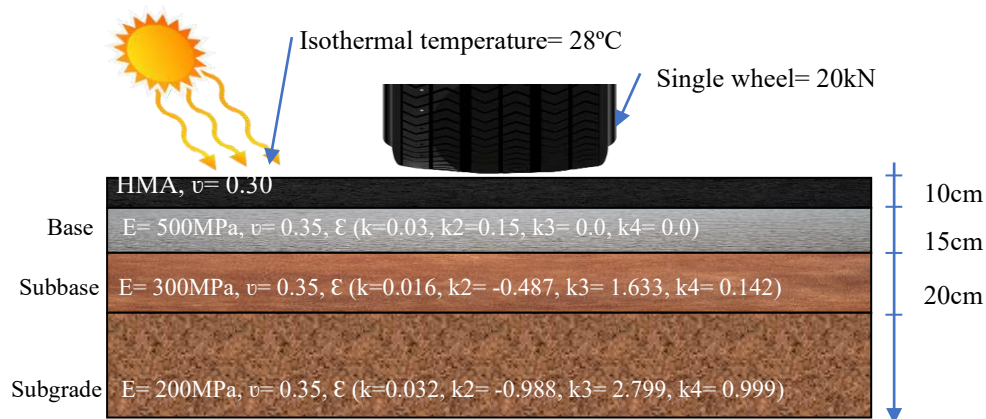
8.2.5 CAP3D-D simulation (Analysis of fatigue cracking and rutting prediction)

The CAP3D-D pavement design program (Holanda *et al.*, 2006; Torquato e Silva *et al.*, 2014), developed by the Federal University of Fortaleza group, predicts fatigue damage and rutting evolution in the asphalt layer. The CAP3D-D employs elastic-linear analysis, using response moduli from the master curve of $|E^*|$, for calculating stresses, strains, and displacements. This approach offers a cost-effective alternative with relatively high precision compared to the viscoelastic-linear analysis method. The program considers granular layers as linearly elastic with a constant modulus (MR), while the subgrade is treated as semi-infinite. Moreover, the inputs data from fatigue and permanent deformation tests, with $|E^*|$, give the prediction fatigue damage and rutting evolution in the asphalt layer, respectively.

To perform the analysis of the evolution of distresses in pavement design programs, since the objective was to observe the asphaltic surface layer, the subjacent structure was previously defined. The standard structure (Fig. 2) considered typical base, subbase, and subgrade materials from the region, used on a road monitored by the UFC pavement laboratory research group in Fortaleza, Ceará, Brazil.

Figure 2 contains the model coefficients for the granular layers and the design simulations that used two traffic level conditions. For medium and heavy traffic level, it was considered the values of 5×10^6 and 1×10^8 ESAL (Equivalent Single Axle Loads), respectively, and a linear growth rate of 2% per year with a simulation time for project analysis is 10 years. Also, a single wheel load of 40kN. The speed was fixed at 60km/h. And a constant air temperature of 28°C, which represents the average temperature of the state of Ceará.

Figure 2 - Standard structure for design pavement simulations



8.2.6 Life Cycle Assessment

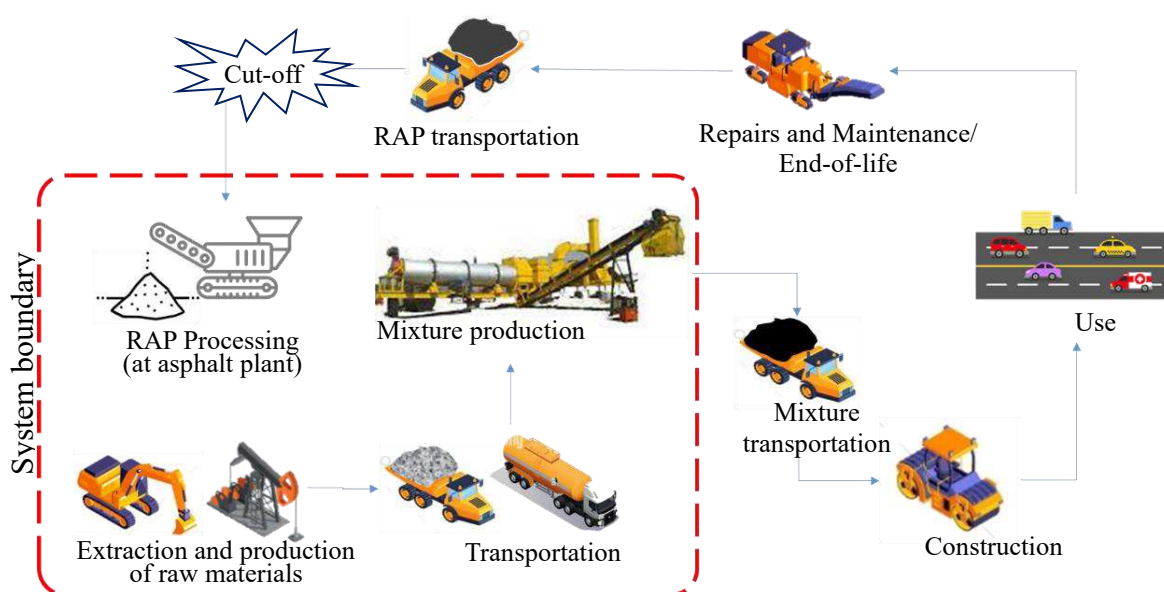
The study on LCA was created following ISO 14040 (ISO, 2006a) and ISO 14044 (ISO, 2006a) regulations and adjusted to the Federal Highway Administration's (FHWA) Pavement LCA Framework (Harvey *et al.*, 2016) when required. This work used various stages of the LCA, with different techniques and a specific modeling.

8.2.6.1 Goal and scope definition phase

The goal of this LCA study is to assess the potential environmental impacts of typical asphalt mixtures produced in the state of Ceará, located in the northeastern region of Brazil. These mixtures were made using the hot-mix technique, with or without RAP, and were intended for use in asphalt pavement surface layers.

The study utilized a cradle-to-gate approach to analyze the partial life cycle of asphalt mixtures, encompassing stages from the extraction and production of raw materials to the finished mixture at the plant (i.e., just before transportation to the construction site). The system boundaries and processes considered in the paper are shown in Figure 3.

Fig. 3 - Pavement LCA system boundary



The study collected primary data through questionnaires answered by the largest asphalt producer in Ceará and one of the largest in the northeast region of Brazil. This included information on distances from suppliers to the plant, fuel consumption with supplies transportation, composition of mixture materials, annual production of the asphalt plant, and energy expenditures to produce asphalt mixtures. Secondary data were obtained from the Ecoinvent v3.7.1 database Ecoinvent Center (2020) and modified, when necessary, to align with the geographical reality of the study. These data mainly pertained to the inventory analysis of the extraction and production of all components of the asphalt mixture, fuels, and transport vehicles.

8.2.6.2 Life cycle inventory (LCI) analysis phase

The production phase of materials was analyzed in terms of two subphases - raw materials production and transportation. Table 2 provides the composition of each mixture analyzed and Table 3 presents the associated Ecoinvent unit processes for the production and transportation of aggregates and binder.

Table 2 - Mass values for each mixture.

Mixtures	Mass (kg/t)		
	Aggregates + filler (m_a)	Neat binder (m_b)	RAP (m_{RAP})
Mref	955	45	0
R15	848	38	114
R30	741	31	228

Table 3 - Ecoinvent processes and unit processes.

Process	Unit Process (Ecoinvent)
Virgin aggregates production	<i>Gravel, crushed gravel production, crushed {Brasil}</i>
Virgin binder production	<i>Pitch petroleum refinery operation {Brasil}</i>
Aggregates and binder transportation	<i>Transport, freight, lorry > 32 metric tonne, EURO5 {GLO}</i>

The transportation of materials to the asphalt plant was measured in ton-kilometers (t.km), and the distances from the binder supplier and the quarry to the plant were considered as 33km and 15km, respectively. The average consumption of diesel for aggregates and binder transportation was calculated as 2.5km/l and 2km/l respectively, for a round trip. The EURO 5 emission standard was adopted, similar to emissions from new heavy vehicles of Phase P-7 of the Brazilian Program for Controlling Air Pollution from Motor Vehicles (CONAMA, 2008).

The asphalt mixtures are produced in a single plant where there are 2 counterflow drum-mixers, each powered by a different heating energy source, including natural gas and diesel. The cold milling material input method was utilized. The study considered different scenarios of RAP content, and the annual production of asphalt mixture in these plants was documented as 100,000 tons, with 23,000 tons of RAP collected. The Thermal Energy (TE) required for producing each mixture was calculated using Equation 7 (Santos *et al.*, 2017), which considers the percentage of RAP, moisture content of the materials, and ambient temperature.

$$TE = \left[\sum_{i=0}^M m_a \cdot C_a \cdot (t_m - t_0) + m_b \cdot C_b \times (t_m - t_0) + m_{RAP} \times C_{RAP} \times (t_m - t_0) + \sum_{i=0}^M m_a \times W_a \times C_w \times (100 - t_0) + L_v \times \sum_{i=0}^M m_a \times W_a + \sum_{i=0}^M m_a \times H_a \times C_v \times (t_m - 100) \right] \times (1 + CL) \quad (7)$$

Where TE is the Thermal Energy (MJ) required to produce 1 ton of asphalt mixture. The remaining variables and parameter values, as well as their respective units, used to calculate the TE for each mixture are specified in Tables 2 and 4. These are based on literature data, as well as actual conditions and practices of the asphalt plant located in Fortaleza.

Table 4 - Variables and parameters for calculating TE.

Parameters		Value	Unit
C_b	Specific heat coefficient of bitumen (50/70)	2.09	kJ/kg/°C
C_a	Specific heat coefficient of aggregates (granitic)	0.74	kJ/kg/°C
C_w	Specific heat coefficient of water (26 °C)	4.18	kJ/kg/°C
C_v	Specific heat coefficient of water vapor	1.83	kJ/kg/°C
C_{RAP}	Specific heat coefficient of RAP	0.74	kJ/kg/°C
W_a	Water content of aggregates	3	%/m _{agr}
L_v	Latent heat of vaporization of water	2256	kJ/kg
CL	Casing losses factor	25	%
T_0	Ambient temperature	28	°C
t_m	Asphalt mixture temperature	175	°C
m_b	Mass of virgin binder	cof. Table 1	kg
m_a	Mass of virgin aggregates	cof. Table 1	kg
m_{RAP}	Mass of RAP	cof. Table 1	kg

The Casing Loss (CL) factor represents the heat used by the mixer but not utilized in heating any component of the mixture (TRB, 2014). The the specific heat coefficients of the virgin 50/70 binder, and the granite-origin aggregates were taken from Santos *et al.* (2018) and Siverio Lima *et al.* (2020). The ambient temperature at the plant in Fortaleza was 28°C in 2022, assumed as the initial temperature of aggregates and RAP. The t_{mix} is the final temperature of the asphalt mixture, of 175°C. The Ecoinvent database processes "heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1 MW | heat, district or industrial, other than natural gas | cut-off, U" and "heat production, natural gas, at industrial furnace > 100 kW | heat, district or industrial, natural gas | cut-off, U" were used to model the environmental impacts of the production phase of the asphalt mixes.

The company did not provide any data related to the processing of RAP. As a result, the subphase related to recycled mixes was modeled using the Ecoinvent database process "Limestone, crushed, for mill | production" (Siverio Lima *et al.*, 2021). SimaPro v 9.2.0.2 (PRé Consultants, 2019) was used to model all inputs and outputs.

8.2.6.3 Life cycle impact assessment (LCIA) phase

Energy and material flows, and environmental releases are quantified and converted to environmental impacts during the life cycle inventory and life cycle impact assessment phases, respectively. The IMPACT World+ (Bulle *et al.*, 2019) is an environmental impact model that propose a midpoint-damage framework with four distinct complementary viewpoints to present an LCIA profile: (1) midpoint impacts, (2) damage

impacts, (3) damages on human health, ecosystem quality, and resources & ecosystem service areas of protection, and (4) damages on water and carbon areas of concerns. Specifically, the following impact categories were considered: climate change (CC), freshwater ecotoxicity (FEc), freshwater eutrophication (FEu), human toxicity cancer (HTc), human toxicity non cancer (HTnc), marine ecotoxicity (EM), particulate matter formation (PMF), terrestrial acidification (TA), ozone depletion (OD), photochemical oxidant formation (FOF) and ionizing radiations (IR).

8.2.7 Multicriteria Decision Analysis

Weighted Linear Combination (WLC) is a common approach used in Multicriteria Decision Analysis (MCDA) to combine multiple criteria into an overall score or ranking for a set of alternatives (Roy, 1996; Figueira *et al.*, 2005). WLC uses weights to assign importance to each criterion and linearly combines the normalized scores of each criterion to obtain an aggregate score for each alternative. Equation (8) demonstrates this normalization process where x_{ij} is the original value of a criterion and x_j^{min} is the minimum value of the criteria

$$x'_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}} \quad (8)$$

After normalization, the scores for each criterion are calculated by multiplying the normalized scores by their corresponding weights. The overall score for each alternative is then obtained by summing the weight scores across all criteria using the Equation (9), where S_i is the overall score for alternative i ; w_j is the weight assigned to criterion j ; x_{ij} is the normalized score of alternative i for criterion j ; and m is the number of criteria.

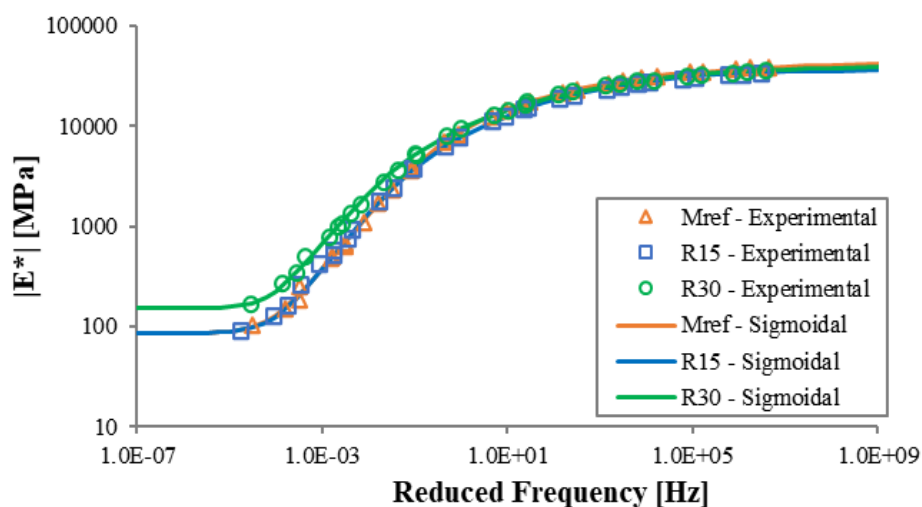
$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij} \quad (9)$$

8.3 Results and Discussion

8.3.1 Dynamic modulus

Figure 4 shows the results from the dynamic modulus test for mixtures and application of their sigmoidal function. The reference temperature used was 20°C. At -10°C (results appearing at high frequency on the master curves), mixtures with neat binder had higher stiffness, which can indicate that mixtures with RAP tend to have higher resistance to thermal fatigue. This behavior is considered unexpected but can be observed in other studies (Suzuki, 2019; Luzzi, 2019; Zappe, 2020; Correa *et al.*, 2023). At 27.7 and 54.4°C (results appearing at low frequency on the master curves), the higher RBR produced the mixture with the highest stiffness. At these frequencies, stiffness is usually related to permanent deformation, meaning that mixture R30 might have higher resistance to this distress.

Figure 4 - Experimental dynamic modulus and sigmoidal function for mixtures



8.3.2 Fatigue test

Figure 5 presents the fitting of the characteristic damage curves of the three investigated mixtures, besides the GR vs. Nf curves. Analyzing Fig. 5 (a) it is noticed that the mixture with more RBR had higher integrity for the same accumulated damage followed by Mref and R15. According to Babadopulos (2014), higher values of material integrity for a given value of damage accumulation (S) do not necessarily mean better materials with respect to fatigue life performance. Analyzing Fig. 5 (b), R30 shows a slightly different inclination in

the GR vs. Nf curves compared to the neat binder and R15. This shows that mixtures with higher RAP content require more cycles to release the same pseudo strain energy (per cycle) throughout the test history, and this energy dissipation can be an indicator of the asphalt mixture fatigue life. All R^2 for power models that fit the GR vs. Nf curves were greater than 0.98, demonstrating the low variability of the data.

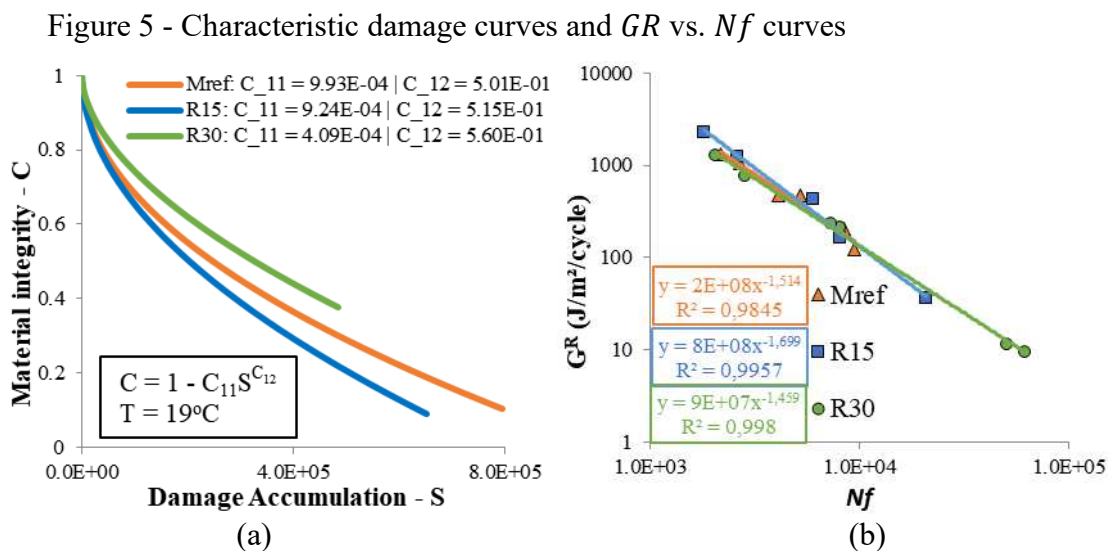
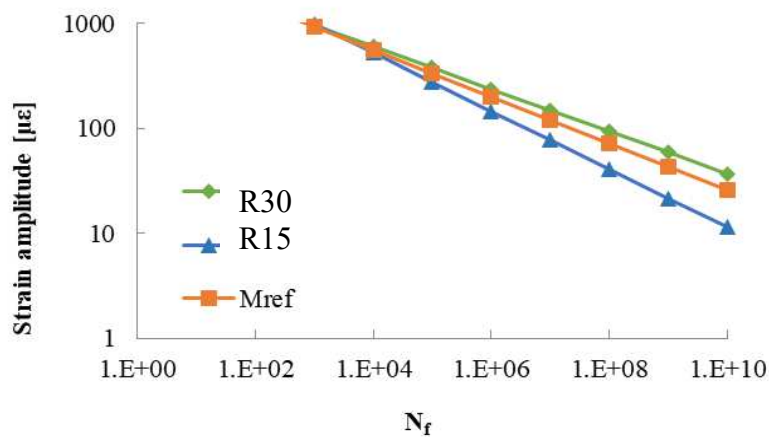


Figure 6 contains the Wöhler curves for the mixtures analyzed. Nascimento (2015) models the behavior of fatigue using strain as an input to different maximum cycles. The curves indicate that as the strain amplitude declines, mixture R30 presents higher resistance to fatigue cracking performance, while mixture R15 has the lower values of fatigue life (Nf).

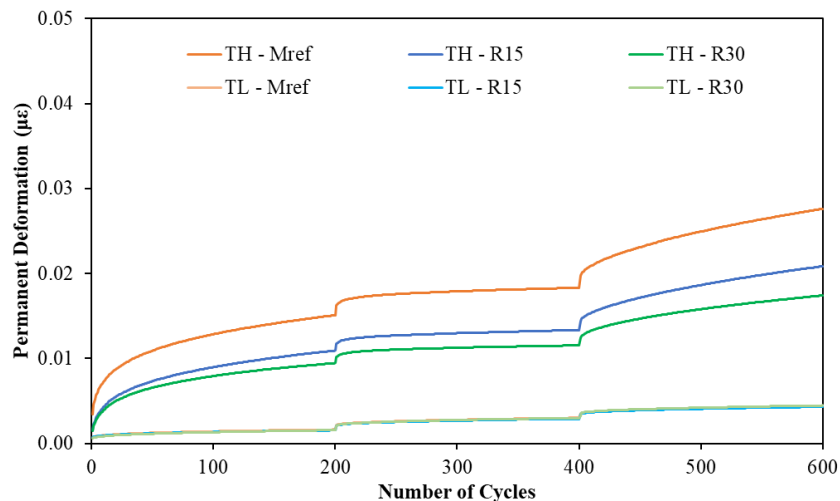
Figure 6 - Wöhler curves for mixtures Mref, R15 and R30



8.3.3 Stress Sweep Rutting test

Figs. 7 shows SSR test results for mixtures. It shows the predicted permanent deformation ($\mu\epsilon$) for both TH and TL considering the reduced number of cycles and the shift factor for load time and vertical stress. Figure 7 also shows raw test data. It is possible to observe that the permanent deformation at the end of the 600 cycles was higher for the reference mixture (Mref) ($0.0195\mu\epsilon$), and there was a decrease in this deformation with the addition of RAP in the mixture, with reductions of 23% and 35% for R15 and R30, respectively. These isolated results might indicate that permanent deformation can decrease with the addition of RAP in the mixtures, as observed in Centofante (2018).

Figure 7 - SSR test results for mixtures



8.3.4 CAP3D-D simulations

All parameters presented in Table 5 are used as input data for CAP3D-D. Figure 8(a) shows the predictions for the cracked area for the wearing course layer over a period of 120 months, respectively. For a medium traffic condition, only R15 mixture showed a cracked area of 13.22%. For the heavy traffic condition, Fig. 8(b) shows a smaller cracked area (6.75%) in the mixture with higher quantity of RAP, R30.

On the other hand, structures with R15, for the heavy traffic condition, reaches the limit of 20% cracked area indicated by DNIT (2005) at the month 86, indicating the necessity of intervention before the end of the time analyzed when comparing with Mref (15.66%) and R30 (6.75%). This is an unexpected behavior when compared with Correa *et al.* (2023).

Table 5 - Results of parameters and coefficients used in CAP3D-D simulation.

Modeling	Parameters and coefficients	Asphalt Mixtures		
		Mref	R15	R30
Sigmoidal curves parameters	δ	1.16	1.03	1.10
	α	3.40	3.48	3.44
	β	1.47	1.52	1.62
	γ	0.60	0.56	0.53
	a_1	0.0010	0.0009	0.0011
	a_2	-0.1853	-0.1796	-0.1856
	a_3	3.4704	3.3721	3.4331
Fatigue parameters	Y	157751695	819037886	91237428
	Δ	-1.5139	-1.6987	-1.4586
	α	4.9861	5.1729	6.0933
	C11	0.0010	0.0009	0.0004
	C12	0.5010	0.5151	0.5599
Shift model parameters and shift factors coefficients	ε_0	0.00442	0.00245	0.00247
	N_1	0.40546	1.16960	1.62435
	β	0.76803	0.71666	0.74534
	p_1	0.75318	0.57911	0.60009
	p_2	0.29972	0.23045	0.23880
	d_1	0.05602	0.01459	0.03035
	d_2	1.52471	3.47315	2.73172

Figure 8 - Predicted cracked area for all mixtures

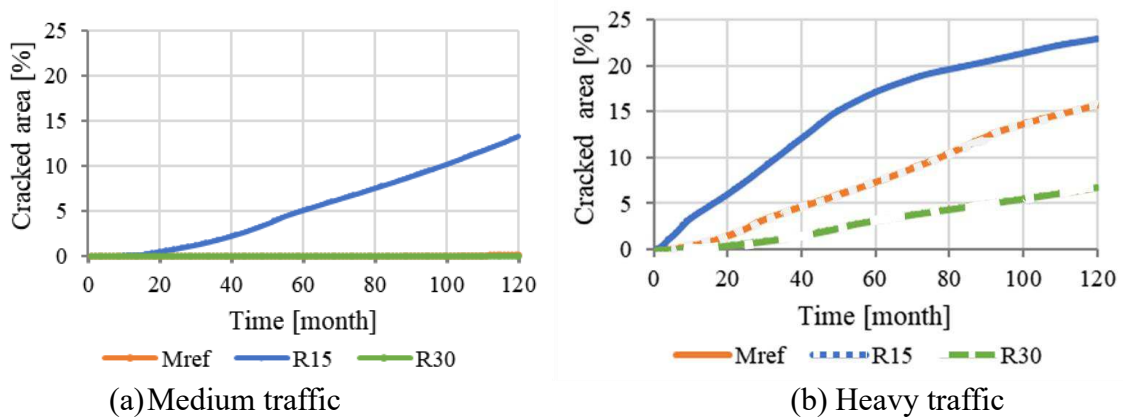
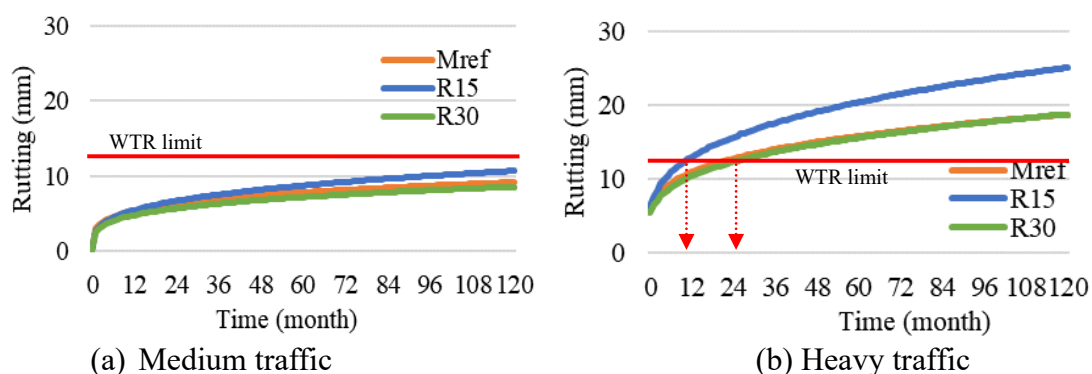


Figure 9(a) presents the predicted rutting evolution for the three mixtures analyzed, considering only the surface layer. In general, values of permanent deformation up to 12.5mm are acceptable (Choi, 2013; Lacroix, 2013), and this limit is adopted as the maximum criterion for permanent deformation by both North American research groups (e.g., North Carolina State University, NCSU) and national research groups (e.g., Petrobras/Cenpes in their experimental tracks at the Federal University of Rio de Janeiro, UFRJ). In the Brazilian context, the acceptable magnitude of pavement deflection demonstrates variability.

For instance, the maximum allowable subsidence defined by the São Paulo State Agency for Transport (ARTESP) stands at 7 mm. When measurements exceed this threshold, corrective measures must be implemented on the roadway. In analogous vein, Faccin (2018) reports that within the stretches of highways under concession in the Rio Grande do Sul state, the National Land Transportation Agency (ANTT) prescribes a more stringent threshold of 5.0 mm for the permissible deflection value along the BR-290 highway, managed by the CONCEPA consortium. Alternatively, for the BR-116 and BR-392 highways, both administered by Ecosul, deflection tolerances extend to 7.0 mm. Instances wherein these established limits are surpassed necessitate prompt intervention and remediation of the pavement structure.

For the heavy traffic condition, Figure 9(b) shows that R15 reached the 12.5mm rutting by the end of the first year. On the other hand, structures with R30 and Mref had the similar behavior reaching the same condition approximately twice the time.

Figure 9 - Predicted rutting evolution for all mixtures



As observed in Figs. 8 and 9, the R15 exhibited the worst behavior in the structural simulations. This unexpected bias could be explained by the poor distribution of RAP fraction within the asphalt mixture samples during the mixing process or due to the overheating of the small amount of RAP

8.3.5 LCA environmental impacts evaluation

Table 6 summarizes the LCIA results for the mixtures. Figure 10 illustrates the relative variations in the various life cycle environmental impact scores for R15 and R30 in

relation to those associated with Mref. The logic of interpreting the results is such that positive relative numbers associated with recycled mixtures represent a deterioration in the potential impact results of AICV compared to the conventional mixture. On the other hand, negative numbers represent improvements in the environmental profile. The results in Figure 10 indicate that all mixtures containing RAP show reductions in all impact categories compared to the reference mixture. The environmental gains are greater as the RBR in the mixture increases, with R30 being the most environmentally sustainable mixture option among all analyzed options.

Table 6 - LCIA results per mixture.

Impact category	Unit	Mref	R15	R30
Climate change (CC)	kg CO ₂ eq	4.35E+04	4.00E+04	3.62E+04
Photochemical oxidant formation (FOF)	kg NMVOC eq	3.49E+02	3.12E+02	2.74E+02
Ozone layer depletion (OLD)	kg CFC-11 eq	4.56E-02	3.91E-02	3.25E-02
Freshwater ecotoxicity (FEc)	CTUe	1.36E+08	1.21E+08	1.07E+08
Human toxicity cancer (HTc)	CTUh	4.78E-04	4.22E-04	3.66E-04
Human toxicity non-cancer (HTnc)	CTUh	2.13E-03	1.90E-03	1.67E-03
Freshwater acidification (FA)	kg SO ₂ eq	9.12E-04	8.16E-04	7.16E-04
Terrestrial acidification (TA)	kg SO ₂ eq	7.85E-01	7.02E-01	6.17E-01
Freshwater eutrophication (FEu)	kg PO ₄ eq	7.13E+00	6.10E+00	5.06E+00
Marine eutrophication (ME)	kg N eq	6.89E+00	6.18E+00	5.46E+00
Particulate matter formation (PMF)	kg PM _{2.5} eq	2.82E+01	2.58E+01	2.33E+01
Ionizing radiation (IR)	Bq C-14 eq	1.17E+06	1.00E+06	8.32E+05

Figure 10 - Relative variations in the LCIA results for R15 and R30 mixture relative to the baseline mixture (Mref).

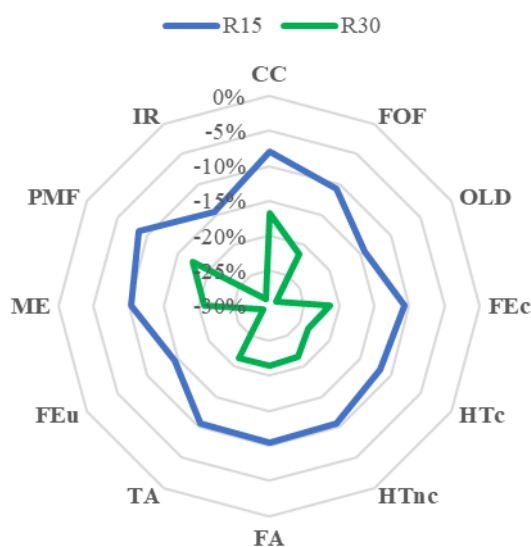
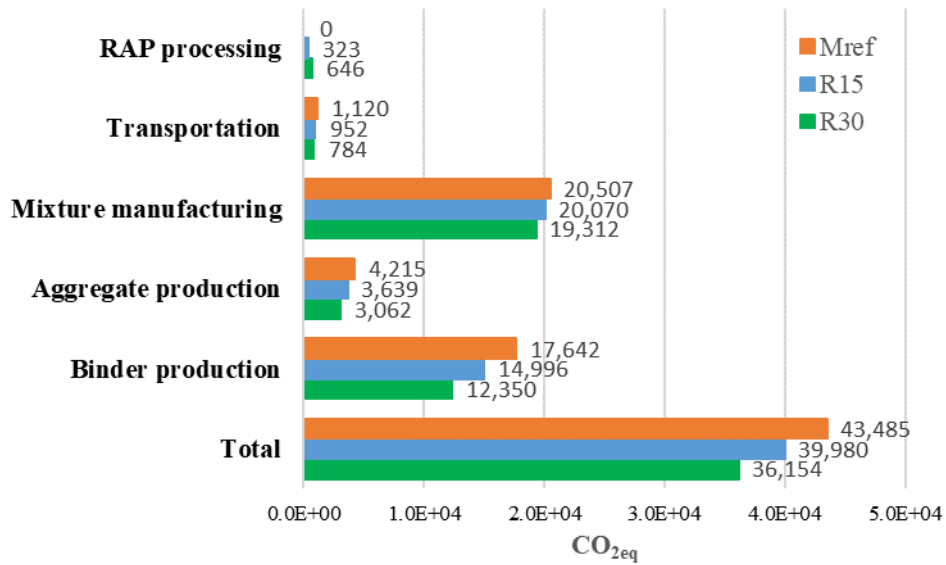


Figure 11 provides a discretization of the CO₂eq emissions associated with the cradle-to-gate phases. Overall, the incorporation of RAP led to a reduction of 8% and 17% of all damages for R15 and R30, respectively. The mitigation of CO₂eq emissions is closely linked to the production of binder due to crude oil extraction, energy-intensive processes, carbon release during oxidation. On the other hand, the damages from RAP processing did not outweigh its use as they had minimal impacts in all categories.

Figure 11 - CO₂eq emissions from cradle-to-gate phase



The production phase of the mixture contributes the most to the total impacts, an average of 50% similar to Ma *et al.* (2016). However, this phase does not have a direct relationship with damage reductions as it was assumed that the same amount of electricity and fuel was used to produce one ton of the mixtures. The impacts from the transportation phase are relatively lower compared to the other phases, and the benefits gained are minimal due to the short distances involved.

8.3.6 Classification of asphalt mixtures based on multicriteria analysis

The classification of asphalt mixtures considers environmental performance, based on the climate change impact category, and both analyzed structural performance scenarios. Table 7 summarizes all absolute values from climate change impact (Table 6) and pavement failures simulations on the 120th month.

Table 7 – Environmental and structural performance results for each mixture.

Mixture	Environmental performance Climate change kg (CO ₂ eq)	Structural performance			
		Case 1: medium traffic		Case 2: heavy traffic	
		Cracked area (%)	Rutting (mm)	Cracked area (%)	Rutting (mm)
Mref	4.35E+04	0.13	9.20	15.66	18.75
R15	4.00E+04	13.22	10.70	22.85	25.10
R30	3.62E+04	0.01	8.60	6.75	18.79

Table 8 indicates the results from the normalized values from Table 7 using the Equation (8).

Table 8 - Normalized values from Table 7.

Mixture	Environmental performance Climate change	Structural performance			
		Case 1: medium traffic		Case 2: heavy traffic	
		Cracked area	Rutting	Cracked area	Rutting
Mref	0.832	0.077	0.932	0.431	1.000
R15	0.905	0.001	0.800	0.295	0.747
R30	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998

The environmental and structural performance are considered with the same relative importance. The sum of weights is 1, in this case for each performance category, the weights (w_j) were attributed being 0.5 ($w_{\text{climate_change}} = 0.50$, $w_{\text{cracked_area}} = 0.25$, and $w_{\text{rutting}} = 0.25$). Table 9 indicates each criterion results from weighted values, that is, normalized values (from Table 8) multiply for the respective weights.

Table 9 - Weighted values from Table 8.

Mixture	Environmental performance Climate change	Structural performance			
		Case 1: medium traffic		Case 2: heavy traffic	
		Cracked area	Rutting	Cracked area	Rutting
Mref	4.35E+04	0.13	9.20	15.66	18.75
R15	4.00E+04	13.22	10.70	22.85	25.10
R30	3.62E+04	0.01	8.60	6.75	18.79

The classification of asphalt mixtures, in both traffic cases, is presented in Table 10. The results are provided from the aggregate values using Equation (9).

Table 10 - Aggregated values from Table 9.

Aggregate values		
Mixture	Case 1: medium traffic	Case 2: heavy traffic
Mref	0.67	0.77
R15	0.65	0.71
R30	1.00	1.00

The highest aggregates values, in both cases, were identified in the mixture R30, indicating the best option choice. In all scenarios, the ranking is completed by Mref followed by R15 with slight difference between them.

8.4 Conclusions

The experimental study discussed in this paper evaluates the structural and environmental performance of recycled mixtures with 0, 15 and 30% RBR (Mref, R15 and R30, respectively). Laboratory experiments, design pavement software simulations, LCA and MCDA were conducted. Based on the results, the following conclusions were drawn:

- Comparing with Mref mixtures, increasing the RBR reduced the stiffness of the mixtures at low and intermediate temperatures. On the other hand, R30 had the highest stiffness at the high temperature when compared to the Mref and R15.
- Adding RAP, the results from SSR test show the increased the permanent deformation resistance comparing with the mixture without RAP. From the fatigue test, the mixture with higher RBR had greater integrity for the same accumulated damage compared with the other mixtures.
- Despite being the most common mixture used in practice, in terms of RBR, the simulation showed the R15 with the worst structural performances in all situations. This behavior can be explained by the arrangement of the fine fraction particles of RAP inside the specimen that affect mainly the stiffness and fatigue behavior. On the other hand, with the highest stiffness, R30 has the best performance, among the three mixtures.
- For evaluated structures, the insertion of RAP in asphalt layers has the best performance for the medium traffic scenario. Hence, a comprehensive characterization of mixtures containing RAP can facilitate their utilization, considering both technical and environmental aspects, thereby mitigating the consumption of natural resources.
- The potential reduction of damages is strongly associated with the phase of production binder with the RBR. This phase also provided the same benefit for RBR increase

where R30 reduced by 29% in the categories of Freshwater Eutrophication, Ionizing Radiation, Ozone Depletion, and by 17% in CO₂eq emissions.

- The RAP processing phase, despite having minimal impacts in various scenarios, did not surpass the benefits of using RAP. The study focused on utilizing the fine RAP fraction, which contains a high percentage of asphalt cement, while the coarse fraction could be used in the base or subbase layer. This promotes the adoption of best management practices by asphalt producers, facilitating the effective utilization of RAP in asphalt paving mixtures from collection to processing, mix design, and quality control practices during production.

- The production phase of the mixture is practically the same for three mixtures and contributes the half to the total impacts and is a hotspot to consider for technical investments and improvements.

- A multicriteria decision analysis was performed to integrate the environmental and structural performance results into a single score for each mixture. The results showed that R30 had the highest score, indicating that it is the best overall performer among the three mixtures analyzed.

- It is important to acknowledge that the aforementioned analyses pertain exclusively to the materials examined within this study. It should be recognized that diverse materials and technologies may produce disparate outcomes. For subsequent investigations, it is recommended to incorporate rejuvenators, varies the mix design and utilizes other RAP fractions combinations as a means of verifying the enhancements in fatigue resistance, permanent deformation characteristics, and their consequent effects on environmental degradation.

In summary, this study recommends using RAP as a partial substitute for asphalt binder and mineral aggregate in order to enhance the environmental performance of asphalt mixtures while maintaining their structural integrity. The primary objective of the study was to provide a straightforward framework and case study that can aid organizations and governments in decision-making and promote the increased use of recycled materials in flexible pavements. It is important to interpret these findings within the outlined framework and consider them as evidence of the effectiveness of the proposed approach in achieving improved trade-off margins for decision-makers. This investigation should be seen as an initial step towards establishing more robust decision-making principles, serving as a demonstration of the methodology. It is expected that the framework can be expanded and integrated with existing LCA frameworks and mechanistic-empirical models.

Acknowledgement

This work was financially supported by ANP/Petrobras of the first author, CAPES for the scholarship of the second author, Funcap for the technological innovation scholarship of the third author, CNPq for the research productivity scholarship of the fourth author; the Asphalt Technology Network - Petrobras for supporting the research group at the Federal University of Ceará (UFC); and CNPq (CNPq 408682/2021-3) for funding the project.

REFERENCES

AASHTO. **AASHTO M 107**: Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test. Washington, D.C., 2018.

AASHTO. **AASHTO M 320**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D.C., 2022.

AASHTO. **AASHTO M 323**: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Washington, D.C., 2022.

AURANGZEB, I. L.; AL-QADI, J. Asphalt Pavements with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. **Transportation Research Record**, v. 2456, p. 161–169, 2014.

AURANGZEB, Q. *et al.* Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resource, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 77–86, 2014.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A Contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BAGHAE MOGHADDAM, T.; BAAJ, H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. **Construction and Building Materials**, vol. 114, pp. 805-816, 2016. ISSN 0950-0618.

BARI, M. W.; WITCZAK, E. Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures (with discussion). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 75, 2006.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 158**: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2011.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 416**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2019.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos** - 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

BRESSI, S., SANTOS, J., OREŠKOVIĆ, M., & LOSA, M. A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. **International Journal of Pavement Engineering**. 2019.

BULLE, C. et al. IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 9, p. 1653-1674, 2019.

CENTOFANTE, R. et al. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, 2018.

CHOI, Y-T. **Development of a mechanistic prediction model and test protocol for the permanent deformation of asphalt concrete**. 2013. Dissertação (Mestrado) - North Carolina State University, Raleigh, 2013.

CONAMA. **Resolução n. 403**, de 11 de novembro de 2008: Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 dez. 2008.

CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

ECOINVENT CENTER. **Ecoinvent Database: Version 3.7.1**. Zurich, Switzerland, 2020.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente**. 2018 Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

FARINA, A., ZANETTI, M. C., SANTAGATA, E., BLENGINI, G. A. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 117, p. 204–212, 2017.

FIGUEIRA, S.; GRECO, M.; EHROGOTT, M. **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. Springer New York, 2005.

GASPAR, M. S. **Mecanismo de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. 2019, Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GOUVEIA, B. C. S. **Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

HARVEY, J. *et al.* **Pavement Life-Cycle Assessment Framework**. FHWA-HIF-16-014. Federal Highway Administration, Washington, 2016.

HOLANDA, E.; PARENTE JR, T. D.; ARAÚJO, L. T. B.; MELO, F.; EVANGELISTA JR, J. B.; SOARES, J. B. Finite Element Modeling of Flexible Pavements. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING (CILAMCE), 27, 2006. **Anais [...]** Belém, 2006.

HUANG, S. C., QIN, Q., GRIMES, R. W., PAULI, A. T., & GLASER, R. Influence of rejuvenators on the physical properties of RAP binders. **Journal of Testing and Evaluation**, 43, 594–603. 2015.

IPCC. **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland, 2023.

ISO. **ISO 14040**: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO. **ISO 14044**: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland, 2006.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, Report Number FHWA-SA-98-042, 1997.

KIM, D.; KIM, Y. R. Development of Stress Sweep Rutting (SSR) Test for Permanent Deformation Characterization of Asphalt Mixture. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 373-383, 2017

KRAU, M. M. T. *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na Pavimentação Asfáltica: uma Revisão Sistemática da Literatura. In: XXXV ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. **Anais [...]**. Digital, 2021.

LACROIX, A. T. **Performance prediction of the NCAT test track pavements using mechanistic models**. 2013. Dissertação (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, NC, 2013.

LUZZI, F. C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MA, F., SHA, A., LIN, R., HUANG, Y., & WANG, C. Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Construction: A Case Study in China. 2016. **International Journal of Environmental Research and Public Health** (Vol. 13, Issue 3, p. 351). MDPI AG. 2016.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil**. 2015. Dissertation (PhD). North Carolina State University. North Carolina, 2015.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões brasileiras de Gases do Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020**. Documento Analítico, 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 20 de maio de 2022.

PIRES, G. M. **A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation**. 2018. MSc thesis. University of Nottingham, Nottingham, 2018

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Tutorial**. LE Amersfoort, The Netherlands: PRÉ Sustainability, 2019.

ROY. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Springer US. DOI: 10.1007/978-1-4757-2500-1, 1996.

SABOURI, Y. R. KIM. **Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading**. In: TRB ANNUAL MEETING. Washington, D.C., United States, 2014.

SANTOS, J., BRESSI, S., CERESO, V., LO PRESTI, D., & DAUVERGNE, M. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, 138, 283–297. Elsevier BV, 2018

SAVIETTO, J. **Análise de impactos ambientais da restauração de pavimentos asfálticos pela avaliação do ciclo de vida**. 2017. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SIVERIO LIMA, M. S.; HAJIBABAEI, M.; HESARKAZAZI, S.; SITZENFREI, R.; BUTTGEREIT, A.; QUEIROZ, C.; HARITONOV, V.; GSCHÖSSER, F. Determining the Environmental Potentials of Urban Pavements by Applying the Cradle-to-Cradle LCA Approach for a Road Network of a Midscale German City. **Sustainability**, vol. 13, p. 12487, 2021.

SIVERIO LIMA, M. S.; HAJIBABAEI, M.; HESARKAZAZI, S.; SITZENFREI, R.; BUTTGEREIT, A.; QUEIROZ, C.; TAUTSCHNIG, A.; GSCHÖSSER, F. Environmental Potentials of Asphalt Materials Applied to Urban Roads: Case Study of the City of Münster. **Sustainability**, vol. 12, no. 15, p. 6113, 2020.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 2019.

TORQUATO e SILVA, S.; SOARES, J. B.; HOLANDA, A. S.; OLIVEIRA, J. A. Utilização do método dos elementos finitos em retroanálise de pavimentos flexíveis. In: XXVIII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2014, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, 2014.

VALE, A. C. F. **Analysis of the evolution of permanent deformation of asphalt mixtures using the stress sweep rutting (SSR) test methodology**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

VEGA A, D. L. et al. Environmental performance evaluation of warm mix asphalt with recycled concrete aggregate for road pavements. **International Journal of Pavement Engineering**, [S.l.], v. 23, n. 5, p. 613-627, 2022.

WEST, R. C.; COPELAND, A. **High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice — Lessons Learned**. Information Series 139. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association, 2015.

ZAPPE, A. P. S. **Avaliação de diferentes fontes de material fresado com ligantes não-convencionais na reciclagem à quente**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ZAUMANIS, D.; LOETSCHER, S.; MAZOR, F.; STÖCKLI, L.; POULIKAKOS, L. Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 307, p. 125114, 2021.

ZAUMANIS, J.; OGA, V.; HARITONOV, V. How to reduce reclaimed asphalt variability: A full-scale study. **Construction and Building Materials**, Riga, v. 180, p. 546–554, 2018.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

9.1 Considerações

O objetivo geral da presente pesquisa foi contribuir para a compreensão dos efeitos ambientais e a previsão do desempenho no pavimento decorrentes da substituição de agregados virgens e ligante asfáltico por RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) em misturas asfálticas a quente. Para compreensão do comportamento mecânico foram usados 1 ligante asfáltico, agregados de uma mesma fonte mineralógica e RAP coletado no mesmo dia e em uma única usina. Este conjunto de materiais possibilitou produção de 3 misturas asfálticas. Duas escalas foram analisadas: mistura asfáltica e estrutura do pavimento. Foram usados, além dos ensaios de caracterização do ligante, agregado e RAP: 4 diferentes ensaios em misturas e 1 programa computacional de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos. Para compreensão dos potenciais impactos ambientais foram analisadas 3 misturas, 1 metodologia para avaliar os impactos e 3 fontes de dados. Foi utilizado o escopo cradle-to-gate: produção e extração das matérias-primas, transporte delas até a usina e produção das misturas na usina. Foi usado 1 programa computacional para modelagem, 1 *database* de inventário de ciclo de vida e 1 método para avaliação dos impactos. Para tomadas de decisões foi usado 1 método de análise de decisão multicritério.

A dissertação foi apresentada na forma de artigos já publicados em congressos, além de artigo que será submetido a um periódico. O artigo 1 analisa a aderência dos resultados de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) da etapa de produção de misturas asfálticas recicladas a quente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030. O artigo 2 aborda os efeitos da fração fina de RAP (<4,75mm) na rigidez e na resistência mecânica em misturas asfálticas recicladas a quente. O artigo 3 se destina a determinar a evolução da deformação permanente no revestimento asfáltico, considerando estruturas típicas de pavimentos do estado do Ceará, com variação de *RAP Binder Ratio* (RBR), ou seja, proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. O artigo 4 propõe um questionário como documento padrão estruturado para coleta de dados e informações para o auxílio na complementação de dados de inventário do ciclo de vida de pavimentos asfálticos. O artigo 5 avalia os possíveis impactos ambientais da produção de misturas recicladas da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). O artigo 6 trata da tomada de decisões de escolha de misturas asfálticas recicladas em função do desempenho ambiental e da previsão de desempenho estrutural.

9.2 Principais Contribuições da Dissertação

À luz dos materiais investigados e das técnicas empregadas, as principais contribuições da dissertação são listadas a seguir:

- A fração fina do RAP, aquela que contém maior quantidade de ligante, altera o comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com o aumento da resistência mecânica e rigidez de forma proporcional ao aumento de RAP Binder Ratio (RBR), ou seja, proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. Tais comportamentos podem contribuir para o projeto estrutural de pavimentos.

- O questionário proposto foi utilizado e mostrou-se uma ferramenta útil para a construção de uma base de dados nacional referente aos processos importantes de todo ciclo de vida do pavimento. Além disso, contribui para o aprimoramento da metodologia da ACV específica para pavimentos asfálticos. Isso pode facilitar futuras pesquisas e estudos na área, proporcionando uma base sólida para a realização de avaliações mais abrangentes e comparativas de diferentes tipos de pavimentos.

- As misturas recicladas apresentaram potenciais ganhos ambientais quando comparadas a mistura convencional, sendo estes tão maiores quanto maior for a taxa do teor ligante substituída nas misturas. Desta forma, as substituições parciais de agregados e ligantes do RAP se mostraram benéficos em todas as categorias de impactos ambientais analisadas.

- Com o uso de programas de modelagem é possível fazer escolhas mais sustentáveis ainda na fase de projeto. A partir do CAP3D-D e Simapro, as misturas recicladas apresentaram viabilidade, tanto ambiental quanto estrutural, respectivamente, na utilização em camadas de rolamento.

9.3 Síntese das Principais Conclusões

9.3.1 Quanto às análises de aderência dos ganhos ambientais de reciclagem de pavimentos com RAP aos ODS

A técnica de reciclagem de misturas asfálticas vai muito além de ganhos econômicos já conhecidos, uma vez que reconhecidamente se adequam também aos ODS e suas metas relacionadas à saúde, água potável e saneamento, inovações e infraestrutura, cidades e comunidades sustentáveis, produção e consumo responsável, mudanças climáticas, ecossistemas aquáticos e terrestres. Essa investigação permitiu inferir que as boas práticas de

reciclagem contribuem significativamente para o alcance de compromissos firmados internacionalmente, pelo Brasil, com potenciais reflexos positivos para o desenvolvimento sustentável, também, em nível local.

9.3.2 Quanto às análises efeito da fração fina do RAP na resistência mecânica e na rigidez de misturas asfálticas recicladas a quente

A fração fina de RAP modificou as propriedades analisadas, principalmente nas maiores quantidades estudadas. Ao analisar o ensaio de módulo dinâmico, a mistura com 30% RBR possui a maior rigidez entre as misturas analisadas, porém as misturas com 15% RBR tiveram rigidez semelhante à mistura com ligante virgem. Desta forma, a mistura tradicionalmente usada no estado do Ceará, R15, pode não conter o teor que traz os maiores benefícios mecânicos. Quanto aos resultados de RT, conforme esperado, ocorreu aumento em função do aumento do RBR. Acredita-se que utilização da fração fina de RAP tenha melhorado a resistência à tração da mistura devido a presença do ligante já oxidado. Esses resultados corroboram que a utilização do RAP poderia contribuir para o projeto estrutural de pavimentos em virtude do ganho de rigidez. Além disso, práticas de beneficiamento do fresado podem reduzir a variabilidade e potencializar a reutilização do ligante presente no fresado.

9.3.3 Quanto às análises do efeito do RAP na evolução de afundamento de trilha de roda em camadas de misturas asfálticas recicladas a quente

Com a análise dos resultados de SSR, conforme esperado, ocorreu diminuição de deformação permanente com o aumento do teor de fresado. Por outro lado, no ensaio de Módulo Dinâmico, a mistura 15% RBR foi a que apresentou a menor das rigidezes dentre as misturas analisadas. De um modo geral, as misturas recicladas apresentaram ATR menores que 11mm ao final do período simulado de 10 anos, ou seja, há indicação da viabilidade dessas misturas em projetos de rodovias brasileiras. Vale destacar a utilização do *software* de análise e dimensionamento desenvolvido na UFC, permitindo que o estudo de previsão de ATR para misturas asfálticas recicladas a quente seja realizado no Brasil.

9.3.4 Quanto à proposta de questionário para auxiliar o estudo de avaliação ciclo de vida de pavimentos asfálticos

O documento contempla as fases do ciclo de vida do pavimento, sendo recomendada a aplicação junto aos produtores de misturas asfálticas, empresas e órgãos responsáveis pela construção e manutenção de pavimentos rodoviários. É indicado que o questionário proposto seja modificado de modo a atender as etapas do objetivo e o escopo do estudo e, além disso, os resultados dos impactos ambientais sejam mais próximos à realidade local. Ademais, o levantamento dessas informações é importante para a criação de uma base de dados nacional mais representativa de ACV de pavimentos.

9.3.5 Quanto às análises da avaliação dos potenciais impactos ambientais na produção de misturas asfálticas recicladas para a cidade de Fortaleza

As misturas recicladas são opções mais ambientalmente sustentáveis em comparação a mistura convencional. Sem a utilização de agente rejuvenescedor e, considerando que as misturas terão a mesma durabilidade, os ganhos ambientais são tão maiores quanto maior é o RBR nas misturas analisadas. Os processos de extração de agregados e produção do ligante asfáltico são as etapas que reduzem seus impactos em todas as categorias ambientais analisadas, sendo diretamente proporcionais ao RBR. Os processos de transporte das matérias-primas e a movimentação interna na usina de materiais representaram as menores contribuições em relação aos demais processos no limite do sistema.

9.3.6 Quanto às análises da avaliação do desempenho, ambiental e estrutural, de misturas recicladas a quente para tomada de decisão

A substituição de agregados virgens e ligante asfáltico por RAP em misturas demonstrou impactos significativos no desempenho ambiental e estrutural. A adição de RAP resultou em melhorias na resistência à deformação permanente e na integridade em fadiga das misturas. No entanto, foi observado que o desempenho estrutural varia de acordo com o RBR. A utilização de RAP mostrou ser mais benéfica para o cenário de tráfego médio. Além disso, a substituição de RAP também contribuiu para a redução dos impactos ambientais negativos, especialmente na fase de extração de matérias-primas. Portanto, a adoção de melhores práticas na reciclagem de RAP e a consideração de aspectos técnicos e ambientais na escolha

de misturas asfálticas podem contribuir para o desenvolvimento sustentável e a preservação de recursos naturais. No entanto, é importante continuar pesquisando e explorando diferentes combinações de RAP e tecnologias de rejuvenescimento para melhorar ainda mais o desempenho das misturas e reduzir os impactos ambientais.

9.4 Limitações da pesquisa

Apesar dos esforços empreendidos nesta pesquisa de mestrado, é importante destacar algumas limitações que podem afetar a generalização e a aplicabilidade dos resultados obtidos. Estas limitações estão relacionadas a diversos aspectos do estudo, abordados a seguir:

- Escopo restrito de tempo e de materiais: a fim de explorar o comportamento mecânico e os impactos ambientais das misturas asfálticas convencionais e recicladas a quente, utilizou-se apenas um tipo de ligante asfáltico, agregado de uma única fonte mineralógica e uma fonte de RAP. Outra limitação foi o uso de somente uma fração do RAP, o que limitou o RBR até 30% devido a presença de finos.

- Escopo *cradle-to-gate*: a análise dos impactos ambientais concentrou-se no escopo berço-ao-portão, que inclui a produção e extração das matérias-primas, o transporte até a usina e a produção das misturas asfálticas. Outras fases do ciclo de vida, como construção, operação e manutenção dos pavimentos, não foram consideradas devido a dificuldade de obtenção de dados primários. Essas etapas adicionais podem ter um impacto significativo nos resultados, principalmente a definição da periodicidade da etapa de manutenção, e devem ser consideradas em estudos futuros.

Apesar das contribuições da pesquisa, é importante reconhecer as limitações inerentes a este estudo e considerá-las ao interpretar e aplicar os resultados. A superação dessas limitações requer pesquisas adicionais e a adoção de abordagens mais abrangentes, a fim de fornecer informações mais sólidas e confiáveis para a tomada de decisões relacionadas a misturas asfálticas.

9.5 Recomendações para trabalhos futuros

- Realizar ACV de todo o ciclo de vida do pavimento, utilizando dados primários de diferentes regiões do Brasil.

- Comparar resultados de ACV de diferentes técnicas de pavimentos, ou seja, pavimento asfáltico, com placa de concreto, com intertravado, etc.
- Investigar o efeito da combinação de diferentes tipos ligantes, agregados de outras origens mineralógicas, diferentes frações de RAP com diferentes RBR, além de agentes rejuvenescedores, na deformação permanente e trincamento por fadiga.
- Avaliar outras dimensões de impactos do pavimento asfáltico, considerando sustentabilidade econômica por meio da Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) e a sustentabilidade social por meio da Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS).
- Desenvolver ferramental de suporte à decisão sustentável baseadas em ciência de dados que possam ajudar engenheiros e agências governamentais a tomar decisões informadas sobre o projeto, construção e manutenção de pavimentos asfálticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACAI, J.; AMADI-ECHENDU, J. Pavement Infrastructure Sustainability Assessment: A Systematic Review. *In: PORTLAND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY (PICMET)*, 2018, Portland. **Proceedings**[...] IEEE, 2018.
- ANTUNES, V.; FREIRE, A.C.; NEVES, J. Investigating aged binder mobilization and performance of RAP mixtures for surface courses. **Construction and Building Materials**. [S. l.]: Elsevier BV, Feb. 2021
- AASHTO. **AASHTO M 92**. Standard Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes. Washington, DC, 2010.
- AASHTO. **AASHTO TP 134-19**: Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).
- AASHTO. **AASHTO M 107**: Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test. Washington, D.C., 2018.
- AASHTO. **AASHTO M 320**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D.C., 2022.
- AASHTO. **AASHTO M 323**: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Washington, D.C., 2022.
- ABNT. **ABNT NBR 15184**: Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.
- ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Mix Design Methods**. Manual Series no. 02 (MS-20). 7th ed. Lexington, KY: Asphalt Institute, 2014.
- AURANGZEB, I. L.; AL-QADI, J. Asphalt Pavements with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. **Transportation Research Record**, v. 2456, p. 161–169, 2014.
- AURANGZEB, Q. *et al.* Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resource, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 77–86, 2014.
- AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; BEN AMOR, M. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2187–2197, 2016.
- BABADOPULOS, L. F. A. L. **A Contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BAGHAEE MOGHADDAM, T.; BAAJ, H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. **Construction and Building Materials**, vol. 114, pp. 805-816, 2016. ISSN 0950-0618.

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2011.

BARI, M. W.; WITCZAK, E. Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures (with discussion). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 75, 2006.

BARROS, L. M.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P. Desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com diferentes ligantes. *In*: XVIII CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO (CILA), 2015, Bariloche, Argentina. **Anais [...]** Bariloche: CILA, 2015. p. 325-333.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BASTOS, J. B. S.; BORGES, R. L.; SOARES, J. B.; KLINSKY, L. M. G. Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. **TRANSPORTES**, v. 23, n. 3, p. 44, 2015.

BASUENY, A.; CARTER, A.; PERRATON, D.; VAILLANCOURT, M. Laboratory Evaluation of Complex Modulus and Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures with RAP. *In*: CANESTRARI, F.; PARTL, M. (eds.). **8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials**. Dordrecht: Springer, 2016.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 2ªed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2022.

BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do Shift Model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER ME 035**: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 031/2006**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 033/2021**: Pavimentação - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2021.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 136**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 158**: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2011.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 413**: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo. Rio de Janeiro: IPR, 2021.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 416**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2019.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 427**: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2020.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3º ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-IS 247**: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa – Instrução de Serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2021.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 184**: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

BRASIL. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos** - 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

BRASIL. **Resolução nº 14**, de 8 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Edição 129, n. 129, p. 53, 12 jul. 2021.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França**. In: 3º SALÃO DE INOVAÇÃO ABCR - 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, Oct 2011, France, 17p.

BRESSI, S., SANTOS, J., OREŠKOVIĆ, M., & LOSA, M. A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. **International Journal of Pavement Engineering**. 2019.

BULLE, C. *et al.* IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 9, p. 1653-1674, 2019.

CABRAL, S. H. de A.; BARROSO, S. de A. T.; SILVA, Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecânica-empírica de pavimentos. **Matéria** (Rio J.), v. 26, 2021.

CENTOFANTE, R. *et al.* Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, 2018.

CHAVES, A. C. B. **Análise da interação entre ligantes de mistura asfáltica com RAP, com e sem uso de agentes rejuvenescedores.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

CHOI, Yeong-Tae. **Development of a mechanistic prediction model and test protocol for the permanent deformation of asphalt concrete.** 2013. Dissertação (Mestrado) - North Carolina State University, Raleigh, 2013.

CLIMA: CEARÁ. **Climate-Data.org**, 2022. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/ceara-212/>. Acesso em: 02 set. 2022.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2021:** Relatório gerencial. Brasília, 2021.

CONAMA. **Resolução n. 403**, de 11 de novembro de 2008: Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 dez. 2008.

CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

CRH. **2021 Annual Report and Form 20-F.** CRH PLC, Dublin, Ireland, 2022. Disponível em: <https://www.crh.com/media/4081/crh-annual-report-2021.pdf>.

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: from binders to mixes. **Road Materials and Pavements Design**, Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE), v. 5, n. 1, p. 41-55, 2004.

EAPA. **Asphalt in Figures 2020.** European Asphalt Pavement Association, 2021.

EIA. **Analysis & Projections.** Disponível em: <https://www.eia.gov/analysis/>. Acesso em: 2022.

ECOINVENT CENTER. **Ecoinvent Database: Version 3.7.1.** Zurich, Switzerland, 2020.

EPD SYSTEM. **General Programme Instructions for the International EDP® System.** 2017.

FACCIN, C. Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: **Comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente.** 2018 Dissertação

(Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

FARINA, A., ZANETTI, M. C., SANTAGATA, E., BLENGINI, G. A. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 117, p. 204–212, 2017.

FHWA. **Pavement Recycling Executive Summary and Report**. Washington, D.C.: US Department of Transportation, FHWA-AS-95-060, 1996.

FIGUEIRA, S.; GRECO, M.; EHROGOTT, M. **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. Springer New York, 2005.

FROTA, T. M. *et al.* Aderência dos impactos ambientais da produção de misturas asfálticas recicladas a quente às metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU. *In: Livro de Memórias do IV SUSTENTARE e VII WIPIS: Workshop internacional de Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos. Anais [...]* Piracicaba (SP) Online, 2022.

FROTA, T. M.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. Potenciais impactos ambientais na produção de misturas asfálticas recicladas aplicando ACV *cradle-to-gate*: estudo de caso de Fortaleza. 2022 *In: XXI CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO (CILA), Punta del Leste Anais [...]*. Punta del Leste, Uruguai, 2022.

GASPAR, M. S. *et al.* Evaluation of binder blending on warm mix recycling. **TRANSPORTES**, 2020.

GASPAR, M. S. **Mecanismo de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. 2019, Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GOUVEIA, B. C. S. **Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

HARVEY, J. *et al.* **Pavement Life-Cycle Assessment Framework**. FHWA-HIF-16-014. Federal Highway Administration, Washington, 2016.

HOLANDA, E.; PARENTE JR, T. D.; ARAÚJO, L. T. B.; MELO, F.; EVANGELISTA JR, J. B.; SOARES, J. B. Finite Element Modeling of Flexible Pavements. *In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING (CILAMCE)*, 27, 2006. **Anais [...]** Belém, 2006.

HUANG, S. C., QIN, Q., GRIMES, R. W., PAULI, A. T., & GLASER, R. Influence of rejuvenators on the physical properties of RAP binders. **Journal of Testing and Evaluation**, 43, 594–603. 2015.

ISO. **ISO 14040**: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO. **ISO 14044**: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland, 2006.

ISO. **ISO 21930**: Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works—Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

IPCC. **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland, 2023.

JRC-IES. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment: Detailed Guidance**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, Report Number FHWA-SA-98-042, 1997.

KASEER, F., ARÁMBULA-MERCADO, E., & MARTIN, A. E. A Method to Quantify Reclaimed Asphalt Pavement Binder Availability (Effective RAP Binder) in Recycled Asphalt Mixes. 2019. **Transportation Research Record**, 2673(1), 205–216. 2019.

KIM, D. *et al.* Mechanistic Performance Evaluation of Pavement Sections Containing RAP and WMA Additives in Manitoba. **Construction and Building Materials**. Elsevier BV, 2016.

KIM, Y. R. Development of Stress Sweep Rutting (SSR) Test for Permanent Deformation Characterization of Asphalt Mixture. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 373-383, 2017

KRAU, M. M. T. *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na Pavimentação Asfáltica: uma Revisão Sistemática da Literatura. In: XXXV ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. **Anais [...]**. Digital, 2021.

LACROIX, A. T. **Performance prediction of the NCAT test track pavements using mechanistic models**. 2013. Dissertação (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, NC, 2013.

LO PRESTI, D.; JIMENÉZ, A.; AIREY, G.; HAJJ, E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. **Journal of Cleaner Production**, Nottingham, v. 131, p 43-51., 2016.

LO PRESTI, D.; VASCONCELOS, K.; OREŠKOVIĆ, M.; PIRES, G. M.; BRESSI, S. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. **Road Materials and Pavement Design**. [S. l.]: Informa UK Limited, 25 Apr. 2019.

LUZZI, F. C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração em Engenharia de Transportes). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MA, F., SHA, A., LIN, R., HUANG, Y., & WANG, C. Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Construction: A Case Study in China. 2016. **In International Journal of Environmental Research and Public Health** (Vol. 13, Issue 3, p. 351). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph13030351>

MACROTRENDS. **Crude Oil Price History Report**. Disponível em: <http://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>. Acesso em: 13 de janeiro de 2021.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* **IPCC, 2021: 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, 2021.

MOTTA, L.M.G. *et al.* **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Convênio UFRJ/DNIT, 2018.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil**. 2015. Dissertation (PhD). North Carolina State University. North Carolina, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NAPA. **Best Practices for RAP and RAS Management**, Lanham, MD, 2015.

NAPA. **Hot Recycling in Hot Mix Batch Plants (IS-71)**, Lanham, MD, 1985.

NAPA. **Recycling Hot Mix Asphalt Pavements (IS-123)**. Lanham, MD, 1996.

NAPA. **Use of RAP & RAS in High Binder Replacement Asphalt Mixtures: A Synthesis**. Lanham, MD, 2016.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies**. 2014. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: <https://doi.org/10.17226/22272>.

NGUYEN, V. H. **Effects of laboratory mixing methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures**. 2009. Thesis (PhD in Transportation Engineering) - University of Nottingham, Nottingham, 2009.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões brasileiras de Gases do Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020**. Documento Analítico, 2021. Disponível em: <https://seeg->

br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 20 de maio de 2022.

OLIVEIRA, J. A. **Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/download/50190/91863>. Acesso em: 20 de maio de 2022.

PIRES, G. M. **A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation**. 2018. MSc thesis. University of Nottingham, Nottingham, 2018

PRÉ. **Introduction to LCA with SimaPro**. LE Amersfoort, The Netherlands: PRÉ Sustainability, 2016.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Tutorial**. LE Amersfoort, The Netherlands: PRÉ Sustainability, 2019.

RATHORE, M.; ZAUMANIS, M.; HARITONOV, V. **Asphalt Recycling Technologies: A Review on Limitations and Benefits**. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., v. 660, 012046, 2019.

RATHORE, M.; ZAUMANIS, M. Impact of laboratory mixing procedure on the properties of reclaimed asphalt pavement mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120709, 2020.

ROBINETTE, C.; EPPS, J. A. Energy, Emissions, Materials Conservation, and Prices Associated with Construction, Rehabilitation, and Material Alternatives for Flexible Pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2179. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies, 2010. pp. 10-22.

ROGELJ, J., SCHAEFFER, M., MEINSHAUSEN, M., KNUTTI, R., ALCAMO, J., RIAHI, K., & HARE, W. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection. **Environmental Research Letters**, 10(10), 105007. IOP Publishing, 2015.

ROY. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Springer US. DOI: 10.1007/978-1-4757-2500-1, 1996.

SABOURI, Y. R. KIM. **Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading**. In: TRB ANNUAL MEETING. Washington, D.C., United States, 2014.

SALINI IMPREGILO. **Sustainability Report 2016**. Salini Impregilo S.p.A., Milan, Italy. 2016. Disponível em: <http://www.saliniimpregilo.com/static/upload/sus/sustainability-report-2016.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2023.

- SANYÉ - MENGUAL, Esther; SALA, Serenella. Life Cycle Assessment support to environmental ambitions of EU policies and the Sustainable Development Goals. **Integrated Environmental Assessment and Management**. [S. l.]: Wiley, 21 fev. 2022.
- SANTOS, J., BRESSI, S., CERESO, V., LO PRESTI, D., & DAUVERGNE, M. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, 138, 283–297. Elsevier BV, 2018
- SANTOS, J., FLINTSCH, G., & FERREIRA, A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. **Resource, Conservation and Recycling**, 116, 15–31. Elsevier BV, 2017.
- SANYÉ - MENGUAL, E., & SALA, S. Life Cycle Assessment support to environmental ambitions of EU policies and the Sustainable Development Goals. **Integrated Environmental Assessment and Management**. Wiley, 2022
- SAVIETTO, J. **Análise de impactos ambientais da restauração de pavimentos asfálticos pela avaliação do ciclo de vida**. 2017. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- SCHRIJVERS, D. L., LOUBET, P., SONNEMANN, G. Critical review of guidelines against a systematic framework with regard to consistency on allocation procedures for recycling in LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 21(7), 994–1008. Springer Science and Business Media LLC, 2016
- SIVERIO LIMA, M. S.; HAJIBABAEI, M.; HESARKAZAZI, S.; SITZENFREI, R.; BUTTGEREIT, A.; QUEIROZ, C.; TAUTSCHNIG, A.; GSCHÖSSER, F. Environmental Potentials of Asphalt Materials Applied to Urban Roads: Case Study of the City of Münster. **Sustainability**, vol. 12, no. 15, p. 6113, 2020.
- SIVERIO LIMA, M. S.; HAJIBABAEI, M.; HESARKAZAZI, S.; SITZENFREI, R.; BUTTGEREIT, A.; QUEIROZ, C.; HARITONOV, V.; GSCHÖSSER, F. Determining the Environmental Potentials of Urban Pavements by Applying the Cradle-to-Cradle LCA Approach for a Road Network of a Midscale German City. **Sustainability**, vol. 13, p. 12487, 2021.
- SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 2019.
- TORQUATO e SILVA, S.; SOARES, J. B.; HOLANDA, A. S.; OLIVEIRA, J. A. Utilização do método dos elementos finitos em retroanálise de pavimentos flexíveis. *In*: XXVIII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2014, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, 2014.
- VALE, A. C. F. **Analysis of the evolution of permanent deformation of asphalt mixtures using the stress sweep rutting (SSR) test methodology**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

VALE, A. C. F.; SILVA, L. S. V.; BASTOS, J. B. S.; BARROSO, E. S.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; PARENTE JUNIOR, E.; SOARES, J. B. Acúmulo de deformação permanente em camadas asfálticas no dimensionamento de pavimentos a partir de modelo viscoplástico. *In: XXVIII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2022, Fortaleza. Anais [...].* Fortaleza, 2022.

VASCONCELOS, K. L. **Projeto de Mistura de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente com Diferentes Teores de Material Fresado.** 2002. Monografia (Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

VEGAA, D. L. *et al.* Environmental performance evaluation of warm mix asphalt with recycled concrete aggregate for road pavements. **International Journal of Pavement Engineering**, [S.l.], v. 23, n. 5, p. 613-627, 2022.

VEGA A., D. L.; SANTOS, J.; MARTINEZ-ARGUELLES, G. Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction. **International Journal of Pavement Engineering**, vol. 23, no. 4, pp. 923–936, 2020.

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**, vol. 74, pp. 101–114, 2013.

WELLNER, F. *et al.* **High-content RA asphalt mixture design.** AllBack2Pave Project, Deliverable No D2.1. Conference of European Directors of Roads, 2015.

WEST, R. C.; COPELAND, A. **High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice — Lessons Learned.** Information Series 139. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association, 2015.

WEST, R. C.; WILLIS, J.R.; MARASTEANU, M. **Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content.** NCHRP Report 752, Transportation Research Board. Washington, DC, 2013.

WEST, R. C. **Best Practices for RAP And RAS Management.** Quality Improvement Series 129. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association, 2015.

WILLIAMS, B. A.; WILLIS, J. R.; SHACAT, J. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2021**, 12th Annual Survey (IS 138). National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, Maryland, 2022.

WORLD BANK. **Transport - Greenhouse gas emissions mitigation in road construction and rehabilitation: A toolkit for developing countries.** Washington, DC, 2011. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/660861468234281955/Transport-Greenhouse-gas-emissions-mitigation-in-road-construction-and-rehabilitation-Atoolkit-for-developing-countries>. Acesso em: 30 jun. 2023.

XIAOFENG, L.; SIWEI, L.; YUE, Y. **Analysis of The Impact of Highway Construction Related to Social and Environment.** *In: L. ZHANG, S. DEFILLA, & W. CHU, ORGS. E3S WEB OF CONFERENCES*, v. 233, p. 01113, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202123301113.

ZAPPE, A. P. S. **Avaliação de diferentes fontes de material fresado com ligantes não-convencionais na reciclagem à quente**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ZAUMANIS, D.; LOETSCHER, S.; MAZOR, F.; STÖCKLI, L.; POULIKAKOS, L. Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 307, p. 125114, 2021.

ZAUMANIS, J.; OGA, V.; HARITONOV, V. How to reduce reclaimed asphalt variability: A full-scale study. **Construction and Building Materials**, Riga, v. 180, p. 546–554, 2018.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R.B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. **International Journal of Pavement Engineering**, Worcester, v. 16, p. 39-55, 2015.

ZAUMANIS, M; CAVALLI, M. C; POULIKAKOS, L. D. Design of 100% RAP hot-mix asphalt to balance rutting and cracking performance. **Transportation Research Board: Transportations Research Record**, 2019.

ZHOU, F. *et al.* **RAP Stockpile management and processing in Texas: State of the practice and proposed guidelines**. Texas Transportation Institute Project 0-6092-1, 2010.

ANEXO A - QUESTIONÁRIO DE ICV DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Questionário para Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos

Dados da empresa

Nome:

Endereço:

Questionário preenchido por (nome / cargo):

Data:

___ / ___ / ___

Apresentação

O questionário de Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos foi estruturado com base nas normas ISO 14040 (2006) e EN 15804 (2009). A Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta de gestão ambiental que auxilia na análise dos impactos ambientais de pavimentos asfálticos.

O questionário busca auxiliar na etapa da composição do inventário do ciclo de vida. Deste modo, busca-se abordar algumas informações relacionadas à produção de misturas asfálticas, construção e manutenção do pavimento, assim como destinação final de resíduos ao final da vida útil.

Pedimos que o(s) profissional(is) respondam às perguntas da forma mais rigorosa e fiel quanto possível. Caso não tenham dados ou respostas para algumas perguntas, apenas deixe em branco.

Os dados fornecidos serão tratados de forma confidencial. Agradecemos antecipadamente o esforço e colaboração dispensados. No caso de mais informações e detalhes, estou à disposição por meio do nosso contato:

[Nome do pesquisador]

[Cargo/formação]

[Instituição]

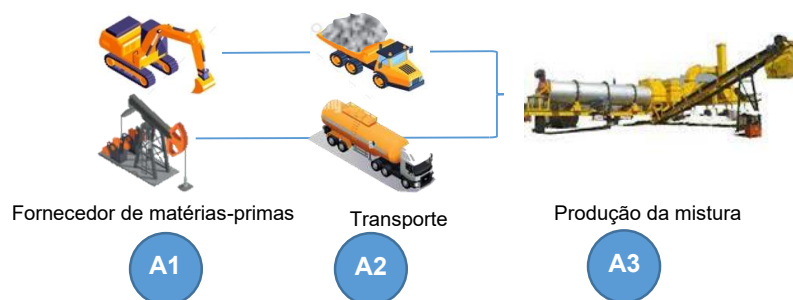
[Departamento]

[Endereço]

[Telefone]

[E-mail]

FASE DA PRODUÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS



A1. Fornecedores de matérias-primas

Matérias-primas	Fornecedores	
	Nome	Distância (km)
Agregados		
Ligante		
Fíler		
Aditivos Químicos		
Outro: _____		
Outro: _____		

A2. Transporte das matérias-primas

Veículo	Matérias-primas					
	Agregados	Ligante	Fíler	Aditivo químico	Outro:	Outro:
Tipo						
Classificação quanto fases da PROCONVE						
Capacidade (t)						
Tipo de combustível						
Consumo (viagem completa, ida + volta)						
Informações adicionais:						

A3. Produção da mistura asfáltica

Localização da usina de asfalto

Quantas toneladas de mistura asfáltica no total são produzidas na usina por ano? **(t/a)**

Quanta energia é consumida no ano? **(kWh/a)**

Indique de onde é obtida a energia elétrica? (Favor indicar proporção)

- Hidrelétrica _____%
 Solar _____%
 Eólica _____%
 Rede de distribuição elétrica local _____%
 Outro: _____, _____%

Qual fonte de energia para aquecimento é utilizada na usina?

- Óleo leve ou pesado
 Gás natural
 Outro: _____

Qual consumo energético de aquecimento é utilizado na usina por ano? **(MJ/a)**

Quanta água é consumida por ano? **(l/a)**

Qual consumo de Diesel (outro, favor especificar) em operações internas no ano? **(l/a)**

Onde os materiais são misturados? Favor indicar proporção

- Central _____%
 in situ _____%
 Outro _____, _____%

As misturas asfálticas produzidas são quentes, mornas ou frias? Por favor, indique a média das temperaturas de mistura utilizadas.

- Quente _____°C
 Morna _____°C

Informações adicionais:

Ficha de dosagem de misturas convencionais (SEM RAP)

Identificação: _____	Massa específica: _____ kg/m ³	
Faixa Granulométrica:	<input type="checkbox"/> DNIT 031/2004: <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C	
	<input type="checkbox"/> Outro: _____	
Componentes	kg/t	Tipo/ Origem
Agregado graúdo (> 4,75mm)		
Agregado miúdo (≤ 4,75mm)		
Fíler (≤ 0,075mm)		
Ligante		
Aditivo		
Proporção anual de produção: _____ %		
Informações adicionais:		

Identificação: _____	Massa específica: _____ kg/m ³	
Faixa Granulométrica:	<input type="checkbox"/> DNIT 031/2004: <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C	
	<input type="checkbox"/> Outro: _____	
Componentes	kg/t	Tipo/ Origem
Agregado graúdo (> 4,75mm)		
Agregado miúdo (≤ 4,75mm)		
Fíler (≤ 0,075mm)		
Ligante		
Aditivo		
Proporção anual de produção: _____ %		
Informações adicionais:		

+ Favor copiar essa página para mais misturas.

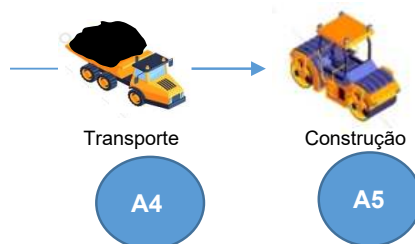
Ficha de dosagem de misturas recicladas (COM RAP)

Identificação: _____	Massa específica: _____ kg/m ³	
Faixa Granulométrica:	<input type="checkbox"/> DNIT 031/2004: <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C	
	<input type="checkbox"/> Outro: _____	
Componentes	kg/t	Tipo/ Origem
Agregado graúdo (> 4,75mm)		
Agregado miúdo (≤ 4,75mm)		
Filer (≤ 0,075mm)		
Ligante		
RAP		
Aditivo		
Tipo de adição do RAP, indicar proporção:		
Proporção anual de produção: _____%		
Impacto da adição do RAP		
Informações adicionais:		

Identificação: _____	Massa específica: _____ kg/m ³	
Faixa Granulométrica:	<input type="checkbox"/> DNIT 031/2004: <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C	
	<input type="checkbox"/> Outro: _____	
Componentes	kg/t	Tipo/ Origem
Agregado graúdo (> 4,75mm)		
Agregado miúdo (≤ 4,75mm)		
Filer (≤ 0,075mm)		
Ligante		
Aditivo		
Proporção anual de produção: _____%		
Impacto da adição do RAP		
Informações adicionais:		

+ Favor copiar essa página para mais misturas.

FASE DO PROCESSO CONSTRUTIVO



A4. Transporte da mistura asfáltica

Veículo	
Tipo	
Classificação quanto fases da PROCONVE	
Capacidade (t)	
Tipo de combustível	
Consumo (viagem completa, ida + volta) (l/km)	
Distância da usina para o local da obra (média) (km)	
Informações adicionais:	

A5. Construção do Pavimento

Descreva como o processo construtivo é realizado. Especifique qual o maquinário é utilizado para construção das camadas, tempo de serviço, ou número de passadas, e Distâncias Médias de Transporte (DMT). Além disso, mencione se há algum processo incomum e explique-o em detalhes.

Indique os principais tipos de superestruturas da região analisada

Nível de Tráfego Previsto:			N de projeto:
Camada	Tipo	Espessura (cm)	Identificação (para camadas asfálticas) ou Composição e classificação dos materiais (para camadas granulares)
Asfáltica	Revestimento		
	Binder		
	Tratamento Superficial		
	Outro:		
Granular	Base		
	Sub-base		
	Reforço		
	Regularização		

Nível de Tráfego Previsto:			N de projeto:
Camada	Tipo	Espessura (cm)	Identificação (para camadas asfálticas) ou Composição e classificação dos materiais (para camadas granulares)
Asfáltica	Revestimento		
	Binder		
	Tratamento Superficial		
	Outro:		
Granular	Base		
	Sub-base		
	Reforço		
	Regularização		

+ Favor copiar essa página para mais estruturas.

FASE DO FINAL DE VIDA ÚTIL



C1. Processo de fresagem

Onde a reciclagem do pavimento é feita?

In situ na usina

Informações adicionais:

C2. Transporte do RAP

Após a remoção de pavimentos asfálticos, por meio de corte e desbaste de uma ou mais camadas, para onde o material é enviado?

Usina de asfalto – Ver item A2 deste tópico
 Usina de reciclagem – Preencher tabela abaixo

Veículo	
Tipo	
Classificação quanto fases da PROCONVE	
Capacidade (t)	
Tipo de combustível	
Consumo (viagem completa, ida + volta) (l/km)	
Distância da obra até usina de reciclagem (km)	
Informações adicionais:	

C3. Beneficiamento do RAP

Além da fresagem do pavimento, quais outros processos são necessários para tornar o RAP utilizável em futuras obras rodoviárias?
Quantas toneladas de RAP são produzidas no total por ano? (t/a)
Quanta energia é consumida no ano para o beneficiamento do RAP? (kWh/a)
De onde é obtida a eletricidade?
Qual fonte de energia para aquecimento é utilizado na usina?
<input type="checkbox"/> Óleo leve ou pesado <input type="checkbox"/> Gás natural <input type="checkbox"/> Outro: _____
Quanto de aquecimento é utilizado na usina na produção de RAP? (MJ/a)
Quanto de água é consumida no ano para reciclagem do RAP? (l/a)
Informações adicionais:

A2. Transporte do RAP

Veículo	
Tipo	
Classificação quanto fases da PROCONVE	
Capacidade (t)	
Tipo de combustível	
Consumo (viagem completa, ida + volta) (l/km)	
Distância da obra ou usina de reciclagem até usina de asfalto (km)	
Informações adicionais:	

A3. Produção de misturas com RAP

Onde o processo de mistura é realizado?
<input type="checkbox"/> <i>In situ</i> <input type="checkbox"/> na planta
Qual tipo de reciclagem é produzida? Favor indicar proporção.
<input type="checkbox"/> Quente, _____% <input type="checkbox"/> Morna, _____% <input type="checkbox"/> Fria, _____%
Quanto de RAP em média é utilizada nas misturas recicladas? (%)
Descreva brevemente como o RAP é incorporado no processo de mistura.
Informações adicionais:

ANEXO B - CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DOS PROCESSOS EM RELAÇÃO ÀS CATEGORIAS DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Figure B – Contribuição relativa dos processos por categorias de impactos ambientais

