



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Laiana Ferreira da Costa

**MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE CONTENDO ADITIVOS:
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO, ECONÔMICO E AMBIENTAL**

CAMPINA GRANDE – PB

2023

LAIANA FERREIRA DA COSTA

**MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE CONTENDO ADITIVOS:
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO, ECONÔMICO E AMBIENTAL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Coorientadora: Profa. Dra. Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena.

CAMPINA GRANDE – PB

2023

C837m

Costa, Laiana Ferreira da.

Misturas asfálticas recicladas a quente contendo aditivos : avaliação do desempenho mecânico, econômico e ambiental / Laiana Ferreira da Costa. - Campina Grande, 2023.

303 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, Profa. Dra. Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena."

Referências.

1. Geotecnia. 2. Reclaimed Asphalt Pavement. 3. Zeólita. 5. Óleo de Algodão. 6. Economia Circular. 7. Avaliação do Ciclo de Vida. 8. Avaliação do Custo de Vida I. Lucena, Lêda Christiane Lopes. II. Lucena, Luciana de Figueirêdo Lopes. III. Título.

CDU 624.13(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA ITAPUANA SOARES DIAS GONÇALVES CRB-15/093

LAIANA FERREIRA DA COSTA

**MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE CONTENDO ADITIVOS:
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO, ECONÔMICO E AMBIENTAL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.
Área de concentração: Geotecnia

Aprovada em 15/05/2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES
Data: 14/06/2023 11:48:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena (UFCG)
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 LUCIANA DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA
Data: 13/06/2023 14:53:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena (UFRN)
Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 CLAUDIA COUTINHO NOBREGA
Data: 14/06/2023 18:11:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Cláudia Coutinho Nóbrega (UFPB)
Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 KAMILLA VASCONCELOS SAVASINI
Data: 18/06/2023 15:30:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Kamilla Vasconcelos Savasini (USP)
Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA
Data: 19/06/2023 11:38:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena (UFCG)
Membro Interno

JONNY DANTAS
PATRICIO:07165586458  Assinado de forma digital por JONNY
DANTAS PATRICIO:07165586458
Dados: 2023.06.19 20:23:21 -03'00'

Dr. Jonny Dantas Patricio (UFCG)
Membro Interno

Campina Grande, 2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

2. ALUNO(A): LAIANA FERREIRA DA COSTA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^ª LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^ª LUCIANA DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - COORIENTADORA, DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG - EXAMINADOR INTERNO, DR.^ª KAMILLA VASCONCELOS SAVASINI - USP - EXAMINADORA EXTERNA, DR.^ª CLÁUDIA COUTINHO NÓBREGA - UFPB - EXAMINADORA EXTERNA, DR. JONNY DANTAS PATRICIO - EXAMINADOR INTERNO (PORTARIA 13/2023). / TITULO DA TESE: "MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE CONTENDO ADITIVOS: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E DA SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 08:30 HORAS / NA SALA 02 DO BLOCO CT, LABORATÓRIO DE PAVIMENTOS, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, EM FORMATO HÍBRIDO.

3. EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.

4. CAMPINA GRANDE, 15 DE MAIO DE 2023

5.

6.

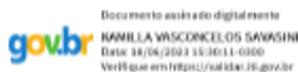
7.

8.

9. KAMILLA VASCONCELOS SAVASINI - USP – EXAMINADORA EXTERNA

10.

11.



12.

13.

14.



Documento assinado digitalmente
CLAUDIA COUTINHO NOBREGA
Data: 11/05/2023 14:11:13-0300
Verifique em <https://validar.se.gov.br>

CLÁUDIA COUTINHO NÓBREGA - UFPB - EXAMINADORA EXTERNA

Documento assinado eletronicamente por **Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena, Usuário Externo**, em 15/05/2023, às 14:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 15/05/2023, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/05/2023, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 16/05/2023, às 11:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Laiana Ferreira da Costa, Usuário Externo**, em 16/05/2023, às 13:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonny Dantas Patricio, Usuário Externo**, em 16/05/2023, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador 3356064 e o código CRC 98D203E7.

DEDICATÓRIA

Ao Bom Deus, que me guiou até aqui e nunca me abandonou.

À razão do meu viver: meus pais, Ronaldo e Lourdes, e meus irmãos, Luana e Raniel, pelo amor gratuito, verdadeiro, insubstituível e eterno.

AGRADECIMENTOS

Ao DEUS de amor, pela dádiva da vida e da saúde, pelas oportunidades que me confia e por ser minha luz e minha direção diante das incertezas, minha força e meu ânimo frente as adversidades, minha esperança perante as aflições, minha calma nos momentos de ansiedade e minha alegria por todas as vitórias conquistadas. A Ele toda a honra e toda a glória;

Aos meus pais, Ronaldo e Lourdes, por todo o esforço em prol dos meus estudos, pelo apoio, amor, cuidado, confiança e incentivo em cada etapa da minha vida e por despertarem em mim a coragem para buscar a minha independência;

Aos meus irmãos, Raniel e Luana, pela união, carinho e companheirismo de sempre e por serem meu amparo certo em todos os momentos. O jeito de cada um é minha fonte de inspiração de valores inestimáveis;

As minhas amigas Aline e Maria, pelo carinho, acolhimento, descontrações e pelos sentimentos bons que me transmitem, tornando a minha caminhada mais leve e alegre.

A minha orientadora, professora Lêda, e coorientadora, professora Luciana, pela paciência, confiança e incentivo. Obrigada por estarem sempre tão disponíveis, por todo o auxílio intelectual e pessoal e por todos os conhecimentos compartilhados.

Ao meu amigo Daniel, pela ajuda nos ensaios laboratoriais, por ter sido sempre tão altruísta e amigo e por todo o encorajamento. Sou muito grata!

Ao amigo Osires, pela ajuda nas análises e pela empatia tão importante.

A minha orientanda de iniciação científica e hoje mestranda, Letícia, muito obrigada por cada corpo de prova moldado, por cada momento de descontração, pela dedicação e prontidão que você sempre demonstrou durante toda a parte laboratorial da pesquisa.

Aos meus colegas de pós-graduação, por todos os momentos vividos nessa jornada, pela amizade e pelos conhecimentos partilhados. Jamais os esquecerei.

Aos técnicos e colaboradores do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, Arthur, Jadilson, Ildinho e Ladjane por todo o auxílio durante a minha estadia no LEP.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) pela estrutura necessária para a realização da minha pesquisa.

A UFCG, prezada instituição que me promoveu a formação de Engenheira Civil, Mestre e Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para conclusão deste trabalho. Meu muito obrigada!

RESUMO

A indústria da pavimentação tem sido cada vez mais incentivada para uma atuação mais circular, associando desenvolvimento econômico a um melhor uso de recursos naturais, devido aos expressivos impactos que as suas atividades impõem principalmente ao meio ambiente e aos recursos financeiros. Uma das práticas condizentes com a tendência de economia circular é o uso de *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)* em misturas asfálticas à quente. Alguns métodos têm sido adotados no intuito de elevar a quantidade de RAP, sem comprometer o desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas à quente, com destaque para os aditivos de misturas mornas e os óleos de origem animal e vegetal. Neste trabalho, decidiu-se avaliar a incorporação nessas misturas da zeólita e do óleo de algodão, em diferentes teores. Na primeira fase determinou-se o grau de ativação relativo do ligante RAP (DoA') por meio de parâmetros mecânicos e volumétricos. Na segunda fase verificou-se a interferência dos aditivos nas características mecânicas do RAP por meio da avaliação das propriedades de resistência à tração, rigidez e volumetria de amostras confeccionadas com 100% RAP com a adição direta dos aditivos, em condições de temperatura e tempos de condicionamento diferentes. Na terceira fase, por meio de *blending charts*, foram estabelecidas as taxas de reciclagem máximas em função das temperaturas críticas de bioligantes formulados com óleo de algodão. Para esse estudo, foram analisados dois conjuntos de misturas asfálticas recicladas: com 15%, 25% e 33% de RAP, contendo, respectivamente, 4%, 6% e 10% de óleo de algodão; e com 15%, 25% e 33% de RAP, contendo 0,3% de zeólita. Na quarta fase as misturas foram avaliadas tanto por aspectos de desempenho mecânico, como também por aspectos ambientais e econômicos, por meio de uma análise integrada de propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de resiliência, Lottman, Cântabro, *Flow Number*, resistência à fadiga), do índice de circularidade, da avaliação do ciclo de vida e da avaliação dos custos do ciclo de vida. Segundo os valores de DoA', a temperatura de 140°C foi a que promoveu uma maior ativação do ligante envelhecido. Ambos os aditivos trouxeram benefícios na interação com o RAP, comprovados pelos resultados de Vv, RT e MR. Todas as misturas recicladas, independentemente do tipo de aditivo, apresentaram desempenho mecânico satisfatório em todos os ensaios realizados. A análise integrada das dimensões mecânica, ambiental e econômica identificou que a alternativa de mistura asfáltica reciclada contendo 0,3% de zeólita e 25% de RAP é a mais vantajosa, pois atendeu aos critérios mecânicos, apresentou bom desempenho ambiental e é a segunda alternativa dentre as estudadas de menor investimento financeiro. No conjunto de misturas recicladas com óleo de algodão, a alternativa com 10% de óleo de algodão e 33% de RAP é a mais vantajosa, mesmo sendo a alternativa que apresentou um maior dano ambiental. A análise integrada apontou a necessidade da ponderação entre os ganhos e prejuízos ambientais e econômicos quando o projeto de misturas recicladas envolve algum aditivo residual ou não.

Palavras-chave: *Reclaimed Asphalt Pavement*; Zeólita; Óleo de Algodão; Economia Circular; Avaliação do Ciclo de Vida; Avaliação do Custo do Ciclo de Vida

ABSTRACT

The paving industry has been increasingly encouraged to act more circularly, associating economic development with a better use of natural resources, due to the significant impacts that its activities impose mainly on the environment and financial resources. One of the practices consistent with the circular economy trend is the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in hot mix asphalt. Some methods have been adopted in order to increase the amount of RAP, without compromising the mechanical performance of recycled hot-mix asphalt, with emphasis on warm mix asphalt additives and oils of animal and vegetable origin. In this work, it was decided to evaluate the incorporation of zeolite and cottonseed oil in these mixtures, at different levels. In the first phase, the degree of relative activation of the RAP binder (DoA') was determined using mechanical and volumetric parameters. In the second phase, the interference of the additives in the mechanical characteristics of the RAP was verified through the evaluation of the properties of indirect tensile test, resilient modulus and volumetry of samples made with 100% RAP with the direct addition of the additives, in different temperature conditions and conditioning times. In the third phase, by means of blending charts, the maximum recycling rates were established as a function of the critical temperatures of bioligands formulated with cotton oil. For this study, two sets of recycled hot-mixes asphalt were analyzed: with 15%, 25% and 33% of RAP, containing, respectively, 4%, 6% and 10% of cottonseed oil; and with 15%, 25% and 33% RAP, containing 0.3% zeolite. In the fourth phase, the recycled hot-mixes asphalt were evaluated both for mechanical performance aspects, as well as for environmental and economic aspects, through an integrated analysis of mechanical properties (tensile strength, resilient modulus, Lottman, Cantabro, Flow Number, resistance to fatigue), circularity index, life cycle assessment and life cycle cost assessment. According to the DoA'v values, the temperature of 140°C promoted greater activation of the aged binder. Both additives brought benefits in the interaction with RAP, confirmed by the results of Vv, RT and MR. All recycled hot-mixes asphalt, regardless of the type of additive, showed satisfactory mechanical performance in all tests carried out. The integrated analysis of the mechanical, environmental and economic dimensions identified that the recycled hot-mixes asphalt alternative containing 0.3% zeolite and 25% RAP is the most advantageous, as it met the mechanical criteria, presented good environmental performance and is the second alternative among those studied with less financial investment. In the set of recycled hot-mixes asphalt with cotton oil, the alternative with 10% cotton oil and 33% RAP is the most advantageous, even though it is the alternative that presented the greatest environmental damage. The integrated analysis pointed out the need to balance the environmental and economic gains and losses when the project for recycled hot-mixes asphalt involves a residual additive or not.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement; Zeolite; Cotton Oil; Circular Economy; Life Cycle Assessment; Life Cycle Cost Assessment

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição de custo de mistura asfáltica reciclada em função do teor de RAP adicionado	36
Figura 2 - RAP disponível no ano de 2016 em alguns países da Europa, segundo EAPA (2016).....	39
Figura 3 - Utilizações de RAP (em %) em alguns países da Europa no ano de 2016, segundo EAPA (2016).....	39
Figura 4 - Utilizações de RAP (em milhões de toneladas) nos Estados Unidos (2009-2018), segundo NAPA (2019).....	40
Figura 5 - Representação gráfica da porcentagem média de RAP usado em misturas HMA e WMA nos estados americanos, segundo NAPA (2019).....	41
Figura 6 - Estimativa de geração de RAP em rodovias brasileiras concessionadas, segundo CCR Engellog (2018).....	43
Figura 7 - Ilustração dos três cenários de mesclagem.....	49
Figura 8 - Esquema seguido na caracterização de ligante recuperado do RAP pela metodologia SUPERPAVE	56
Figura 9 - Gráfico de mistura pelo método A - SUPERPAVE	57
Figura 10 - Gráfico de mistura pelo método B - SUPERPAVE.....	58
Figura 11 - Metodologias usadas para a determinação do DoA, DoAv e DoB.....	60
Figura 12 - Metodologias para a produção de misturas asfálticas mornas	69
Figura 13 - Produtos e coprodutos do beneficiamento do algodão.	86
Figura 14 - Produção de caroço de algodão	87
Figura 15 - Variáveis que influenciam no ICM.....	94
Figura 16 - Metodologias para a determinação do <i>ICMMRA</i> proposta por Mantalovas e Di Mino (2019).....	97
Figura 17 - Fases de um ACV	101
Figura 18 - Diagrama de designações de informações modulares usadas para avaliações de ciclo de vida para pavimentos, segundo EAPA (2017).	103
Figura 19 - Diagrama dos três ACVs de pavimentos	104
Figura 20 - Estrutura conceitual da ACCV ambiental.....	109
Figura 21 - Composição primária dos custos do ciclo de vida de um pavimento	112
Figura 22 - Programa experimental da pesquisa	117

Figura 23 – Curvas granulométricas dos agregados virgens	119
Figura 24 - Curva de liberação de água da zeólita à 150°C	122
Figura 25 - Viscosidade x Temperatura do ligante asfáltico virgem, antes e pós RTFOT	125
Figura 26 - Curvas granulométricas dos agregados RAP	126
Figura 27 - (a) Extração do ligante RAP no Rotarex; (b) Recuperação do ligante RAP no rotoevaporador (c) eliminação do solvente residual na estufa a vácuo.....	128
Figura 28 - Resultados de FTIR para amostras do ligante RAP	129
Figura 29 - Fluxograma dos procedimentos para a determinação do DoA' (%).....	133
Figura 30 - Volume de Vazios x Temperatura	134
Figura 31 - Resistência à Tração x Temperatura	135
Figura 32 - Módulo de Resiliência x Temperatura	135
Figura 33 - DoA' e teor de ligante RAP ativado	137
Figura 34 - Resultados do ensaio de Penetração	139
Figura 35 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento	139
Figura 36 - Resultados do Índice de Susceptibilidade Térmica	140
Figura 37 - Resultados do ensaio de Viscosidade (antes do RTFOT)	141
Figura 38 - Resultados do ensaio de Viscosidade (pós RTFOT)	141
Figura 39 - Resultados do ensaio de Performance Grade	142
Figura 40 - Resultados da Compliância não recuperável.....	143
Figura 41 - Resultados da Recuperação elástica média	143
Figura 42 - Curvas granulométricas inferior, intermediária e superior da mistura asfáltica de referência.....	146
Figura 43 - Taxa de reciclagem para mistura asfáltica reciclada com (A) BL2%; (B) BL4%; (C) BL6%; (D) BL8%; (E) BL10%; (F) BL12%	148
Figura 44 - Curvas granulométricas da MAR-BL4% (15% de RAP)	150
Figura 45 - Curvas granulométricas da MAR-BL6% (25% de RAP)	150
Figura 46 - Curvas granulométricas da MAR-BL10% (33% de RAP)	150
Figura 47 - Esquema do ensaio de compressão diametral	155
Figura 48 - Forma do pulso de carregamento no ensaio de módulo de resiliência	156
Figura 49 - Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN.....	159
Figura 50 - Cálculo do Índice de circularidade das misturas asfálticas estudadas	161
Figura 51 - Diagrama da fronteira do sistema com seus processos unitários e tipos de dados.	167

Figura 52 - Modelo do Diagrama de Fluxo de Vida (DFV) utilizado	168
Figura 53 - Visão geral das categorias de impacto contempladas na metodologia ReCiPe2016 e sua relação com as áreas de proteção.	170
Figura 54 - Fluxograma da metodologia de ACCV.....	171
Figura 55 - Cenário 100% RAP + Óleo de Algodão – Volume de Vazios.....	178
Figura 56 - Cenário 100% RAP + zeólita – Volume de Vazios.....	178
Figura 57 - Cenário 100% RAP + Óleo de Algodão - Resistência à tração.....	180
Figura 58 - Cenário 100% RAP + Zeólita – Resistência à Tração	181
Figura 59 - Cenário 100% RAP + Óleo de Algodão – Módulo de Resiliência.....	183
Figura 60 - Cenário 100% RAP + Zeólita – Módulo de Resiliência	184
Figura 61 - Resultados de Resistência à Tração	187
Figura 62 - Resultados de Resistência à Tração Retida	189
Figura 63 - Resultados de Módulo de Resiliência	192
Figura 64 - Resultados de desgaste Cantabro.....	195
Figura 65 - Número de ciclos versus diferença de tensões	198
Figura 66 - Número de ciclos versus deformação resiliente inicial.....	199
Figura 67 - Resultados do ensaio de <i>Flow Number</i>	202
Figura 68 - Resultados do Fator de Utilidade (χ) das misturas asfálticas (N_{fadiga} em 30% da RT).....	205
Figura 69 - Resultados do Fator de Utilidade (χ) das misturas asfálticas (N_{fadiga} em 40% da RT).....	205
Figura 70 - Resultados do <i>ICMMAR</i> das misturas asfálticas (N_{fadiga} em 30% da RT).....	206
Figura 71 - Resultados do <i>ICMMAR</i> das misturas asfálticas (N_{fadiga} em 40% da RT).....	206
Figura 72- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (brita 19mm ou brita 12,5mm ou pó de pedra).....	211
Figura 73- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (areia).....	213
Figura 74 - DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (asfalto).....	214
Figura 75- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (óleo de algodão)....	215
Figura 76- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (cal)	216
Figura 77- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (zeólita)	216
Figura 78 - DFV do processo elementar de transporte	217
Figura 79 - DFV do processo elementar de produção de mistura asfáltica.....	218
Figura 80 - DFV do processo elementar de construção do pavimento (revestimento).....	220

Figura 81 - DFV do processo elementar de uso do pavimento	222
Figura 82 - DFV do processo elementar de fim da vida do pavimento (alternativas recicladas)	223
Figura 83 - DFV do processo elementar de fim da vida do pavimento (alternativa de referência).....	224
Figura 84 - Avaliação de impacto ambiental final - Dano à qualidade dos ecossistemas	225
Figura 85 - Indicadores <i>endpoints</i> do dano ambiental à QE (espécie.ano).....	226
Figura 86 - Aquecimento Global (espécie.ano) – Contribuição de cada processo	229
Figura 87 - Avaliação de impacto ambiental final - Dano à saúde humana.....	231
Figura 88 - Indicadores <i>endpoints</i> do dano ambiental à SH (DALY)	233
Figura 89 - Avaliação de impacto ambiental final - Dano aos recursos	234
Figura 90 - Indicadores <i>endpoints</i> do dano ambiental aos recursos (US\$).....	235
Figura 91 - Normalização dos resultados das três categorias de impacto <i>endpoint</i>	237
Figura 92 - Normalização dos resultados dos impactos <i>endpoint</i> para cada fase do ACV....	238
Figura 93 - Investimentos para a produção e construção de 1km de rodovia	239
Figura 94 - Contribuição (%) de cada item das composições de custo no somatório de investimentos de produção e construção	241
Figura 95 – Incrementos ou reduções nos custos de cada item do investimento de produção das alternativas com óleo de algodão.....	244
Figura 96 – Incrementos ou reduções nos custos de cada item do investimento de produção das alternativas com zeólita.....	245
Figura 97 – VPL das alternativas avaliadas (valores absolutos)	249
Figura 98 - Análise integrada - dimensões mecânica, ambiental e econômica	252

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Caracterização do RAP no Brasil, EUA e Japão	44
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens das técnicas de extração e recuperação de ligante RAP	48
Quadro 3 - Casos de misturas estudadas por McDaniel et al. (2000).....	50
Quadro 4 - Casos de misturas estudados por Al-Qadi et al. (2009).....	51
Quadro 5 - Diretrizes de seleção de ligante para misturas RAP	53
Quadro 6 - Comparativo da metodologia de MacArthur (2019) e Mantalovas e Di Mino (2019).....	95
Quadro 7 - Abrangência dos três tipos de ACCV	108
Quadro 8 - Nomenclaturas presentes no fluxograma.....	116
Quadro 9 - Composições para avaliação do DoA'	132
Quadro 10 - Bioligantes formulados.....	138
Quadro 11 - Composições para avaliação do cenário 100% RAP + óleo de algodão	145
Quadro 12 - Composições para avaliação do cenário 100% RAP + zeólita	145
Quadro 13 - Nomenclaturas das MAR com uso de bioligante.....	149
Quadro 14 - Nomenclaturas das MAR com uso de bioligante.....	153
Quadro 15 - Ensaio para a avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas.....	154
Quadro 16 - Visão geral das categorias de endpoint, indicadores e fatores de caracterização.	170
Quadro 17 - Ranking das contribuições dos itens nos investimentos.....	242

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físico-químicas do óleo de algodão	87
Tabela 2 - Informações do segmento entre os quilômetros 35,7 e 42 da BR 230	118
Tabela 3 - Resultados da caracterização dos agregados graúdos	119
Tabela 4 - Resultados de caracterização dos agregados miúdos	120
Tabela 5 - Características físicas da zeólita clinoptilolita	121
Tabela 6 - Composição Química da zeólita clinoptilolita	121
Tabela 7 - Resultados de caracterização do ligante asfáltico virgem	124
Tabela 8 - Resultados de caracterização do agregado RAP antes da extração do ligante	128
Tabela 9 - Resultados de caracterização do ligante RAP	130
Tabela 10 - DoA' em função do volume de vazios	136
Tabela 11 - DoA' em função da Resistência à Tração.....	136
Tabela 12 - DoA' em função do Módulo de Resiliência	136
Tabela 13 - Parâmetros volumétricos das misturas asfáltica com teor de ligante inicial.....	146
Tabela 14 - Parâmetros volumétricos das misturas asfáltica com teor de ligante inicial.....	147
Tabela 15 - Traço da mistura asfáltica de referência (REF)	147
Tabela 16 - Traço da mistura asfáltica de referência	149
Tabela 17 - Estimativa da Temperatura de Usinagem	151
Tabela 18 - Estimativa da Temperatura de Compactação.....	151
Tabela 19 - Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas com uso de bioligante	152
Tabela 20 - Traço das misturas asfálticas recicladas com uso de bioligante	152
Tabela 21 - Traço das misturas asfálticas recicladas com uso de zeólita.....	153
Tabela 22 - ANOVA para Vv – Fatores Teor de Óleo de algodão e Temperatura	179
Tabela 23 - ANOVA para Vv – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura.....	179
Tabela 24 - ANOVA para Vv – Fatores Tempo de Condicionamento e Temperatura.....	179
Tabela 25 - ANOVA para RT - Fatores Teor de Óleo de Algodão e Temperatura.....	181
Tabela 26 - ANOVA para RT – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura	182
Tabela 27 - ANOVA para RT – Fatores Tempo de Condicionamento e Temperatura	182
Tabela 28 - ANOVA para MR - Fatores Teor de Óleo de Algodão e Temperatura.....	184
Tabela 29 - ANOVA para MR – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura	185
Tabela 30 - ANOVA para MR – Fatores Tempo de Condicionamento e Temperatura	185

Tabela 31 - Comparativo da RT entre as MAR.....	187
Tabela 32 - Comparativo da RRT entre MAR	190
Tabela 33 - Comparativo do MR entre MAR.....	192
Tabela 34 - Comparativo do desgaste cântabro entre MAR	195
Tabela 35 - Resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas	200
Tabela 36 - Comparativo do <i>Flow Number</i> entre MAR com bioligante	203
Tabela 37 - Unidades funcionais consideradas no cálculo do fator de utilidade.....	203
Tabela 38 - Quantificação do <i>ICMMRA</i> das misturas asfálticas	204
Tabela 39 - ICV da obtenção de 1kg de brita 19mm ou 1kg de brita 12,5mm	211
Tabela 40 - ICV da obtenção de 1kg de pó de pedra	212
Tabela 41 - ICV da obtenção de 1kg de areia	213
Tabela 42 - ICV da obtenção de 1kg de asfalto.....	214
Tabela 43 - ICV da obtenção de 1kg de óleo bruto de algodão	215
Tabela 44 - ICV da obtenção de 1kg de cal hidratada	216
Tabela 45 - ICV da obtenção de 1kg de zeólita.....	216
Tabela 46 - ICV do serviço de transporte de 1tkm.....	217
Tabela 47 - ICV de 1 usina de asfalto contínua+batelada.....	218
Tabela 48 - ICV da produção de 1kg de mistura asfáltica	219
Tabela 49 - ICV do conjunto para maquinários de pavimentação de 1km	220
Tabela 50 - ICV das emissões atmosféricas para 1kg de pavimento construído.....	220
Tabela 51 - ICV dos lixiviados para 1kg de pavimento construído.....	221
Tabela 52 - ICV do uso do solo (m ² de pavimento/ano).....	222
Tabela 53 - ICVI da operação de um veículo.quilômetro	222
Tabela 54 - ICV do maquinário para a fresagem.....	224
Tabela 55 - Comparativo do dano à QE entre as MAR	225
Tabela 56 - Emissões de CO ₂ eq.....	230
Tabela 57 - Comparativo do dano à QE entre as MAR	231
Tabela 58 - Comparativo do dano aos R entre as MAR	234
Tabela 59 - Contribuição (R\$) de cada item das composições de custo no somatório investimentos de produção e construção.....	240
Tabela 60 - Fluxo de caixa da alternativa REF	246
Tabela 61 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-BL4%	246

Tabela 62 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-BL6%	247
Tabela 63 - Fluxo de caixa da alternativa MAR- BL10%.....	247
Tabela 64 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-Z15	247
Tabela 65 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-Z25	248
Tabela 66 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-Z25	248

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAPA	Associação Brasileira dos Produtores de Algodão
ACCV	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de impactos do ciclo de vida
ANOVA	Análise de Variância
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto betuminoso usinado à quente
CED	Demanda cumulativa de energia
DALYs	Anos de vida ajustados por incapacidade
DFV	Diagrama de Fluxo de Vida
DMT	Distância média de transporte
DNIT	Departamento de Infraestrutura e Transportes
DOTs	<i>Departamento dos Transportes dos Estados Unidos</i>
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i> (reômetro de cisalhamento dinâmico)
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EC	Economia circular
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
FIC	Fator de Influência de Chuvas
FT	<i>Foaming Time</i>
GEE	Gases do efeito estufa
GWP	Potencial de aquecimento global
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i> (mistura asfáltica à quente)
HWT	<i>Hamburg Whell Tracking</i>
ICM	Índice de Circularidade do Material
ICV	Inventário de ciclo de vida

IDOT	Departamento de Transportes de Illinois
IM	<i>Modification Index</i>
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IST	Índice de Susceptibilidade Térmica
LADEN	Laboratório de Ensino
LAMMEN	Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
NCAT	<i>National Center For Asphalt Technology</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PBU	<i>Primary Building Unit</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RAP	<i>Reclaimed asphalt pavement</i>
RTFO	<i>Rolling Thin Film Oven</i>
RWMA	Misturas mornas recicladas
SBU	<i>Secondary Building Unit</i>
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
TCE	Solvente tricloroetileno
TDC	Custos de Atraso de Viagem
TMA	Taxa de Mínima Atratividade
VOC	Custos Operacionais de Veículos
VPL	Valor presente líquido
VPL	Valor presente líquido
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i> (mistura asfáltica morna)

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
$(ICM_{MAR}^*)'$	Indicador de circularidade da mistura asfáltica, calculado conforme a proposta de adaptação desse estudo
σ_t	Resistência à tração
A'_{av}	Resistência ao desgaste Cântabro da mistura asfáltica de referência
$B_{x,t}$	Valor do benefício x na data t
C_C	Fração de massa de um produto sendo coletado para um processo de compostagem
C_E	Fração de massa de um produto sendo coletado para recuperação de energia
C_R	Fração de massa de um produto sendo coletado para entrar em um processo de reciclagem
C_R	Fração de massa de um produto sendo coletado para entrar em um processo de reciclagem
C_U	Fração de massa de um produto sendo coletado para a reutilização de componentes
$C_{x,t}$	Valor do custo x na data t
DP'	Deformação permanente da mistura asfáltica em um determinado número de ciclos de carregamento
DP_{av}	Deformação permanente da mistura asfáltica de referência em um determinado número de ciclos de carregamento
E_F	Eficiência do processo de reciclagem usado para produzir o produto reciclado
E_P	Eficiência do processo de reciclagem na fase 2 (produção de mistura asfáltica reciclada)
E_T	Eficiência do processo de reciclagem na fase 1 (tratamento do RAP)
E_c	Eficiência do processo de reciclagem usado para a parte de um produto coletado para a reciclagem
F_R	Fração de massa de matéria-prima derivada de fontes recicladas
F_{RAP}	Fração do produto coletado para a reciclagem no final da vida útil do pavimento

F_U	Fração de massa de matéria-prima derivada de fontes reutilizadas
F'_{av}	Número de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga da mistura asfáltica de referência
F_S	Fração de massa de matéria-prima biológica derivada de produção sustentada
G_{MAR}	Massa total de uma mistura asfáltica recicladas
G_{mm}^{RAP}	Densidade máxima teórica do RAP
G_{sb}	Massa específica do agregado combinado
G_{sb}^{RAP}	<i>Bulk specific gravity</i> (massa específica aparente do agregado RAP)
G_{sb}^{RAP}	Massa específica real do RAP
G_{se}^{RAP}	<i>Effective specific gravity</i> (massa específica efetiva do agregado RAP)
ICM_{MAR}^*	Indicador de circularidade da mistura asfáltica
L_{AV}	Vida útil média real de um produto médio da indústria
L_{MAR}	Vida útil média real da mistura recicladas
N_{AV}	Número médio de ciclos de carregamento antes da falha, em termos de fadiga ou deformação, alcançado pela mistura de referência
N_{MAR}	Número médio de ciclos de carregamento antes da falha, em termos de fadiga ou deformação, alcançado pela mistura recicladas
P_{RAP}	Fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas
P_{ab}	Absorção de asfalto
RRT'_{av}	Resistência ao dano por umidade induzida da mistura asfáltica de referência
RT'_{av}	Resistência à tração da mistura asfáltica de referência
$T_{c,RAP}$	Temperatura crítica do ligante RAP recuperado
$T_{c,alvo}$	Temperatura crítica alvo do ligante asfáltico final (ligante RAP+ligante novo)
$T_{c,virgem}$	Temperatura crítica do ligante asfáltico virgem
U_{av}	Número de unidades funcionais alcançadas durante o uso de um produto médio
W_E	Largura efetiva da pista
W_{EOL}	Resíduos irrecuperáveis
W_F	Resíduos gerados para produzir produto reciclado (Mantalovas e Di Mino,

	2019)
W_P	Resíduos gerados para produzir produto reciclado
W_T	Resíduos gerados durante o processo de reciclagem
W_c	Resíduos gerados durante o processo de reciclagem (Mantalovas e Di Mino, 2019)
W_o	Resíduos irre recuperáveis (Mantalovas e Di Mino, 2019)
k_1	Parâmetros determinados no ensaio de fadiga
k_2	Parâmetros determinados no ensaio de fadiga
k_3	Parâmetros determinados no ensaio de fadiga
k_4	Parâmetros determinados no ensaio de fadiga
ε_i	Deformação resiliente específica
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões no centro do corpo de prova
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões no centro do corpo de prova
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
Al	Alumínio
BL10%	90% de CAP 50/70 + 10% de óleo de algodão
BL12%	88% de CAP 50/70 + 12% de óleo de algodão
BL2%	92% de CAP 50/70 + 2% de óleo de algodão
BL4%	96% de CAP 50/70 + 4% de óleo de algodão
BL6%	94% de CAP 50/70 + 6% de óleo de algodão
BL8%	92% de CAP 50/70 + 8% de óleo de algodão
CF_k	Custo futuro da atividade k
CI	Custo inicial de construção
cm	Centímetro
CO_2	Dióxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
$\text{CO}_{2\text{eq}}$	Carbono equivalente
D	Diâmetro do corpo de prova
d	Diâmetro do corpo de prova (cm)
dm	Decímetro
DoA	Graus de ativação do ligante RAP
DoA'	Grau relativo de ativação do ligante RAP
DoAv	Graus de disponibilidade do ligante RAP

DoB	Graus de mistura entre o ligante RAP e o agente de reciclagem
F	Número de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga
F	Carga de ruptura
F	Carga aplicada (N)
FN	Flow number
FR	Fator de redução de potência
g	Gramas
$G^*/\sin\delta$	Parâmetro de resistência à deformação
$G^*\sin\delta$	Parâmetro de resistência à fadiga
G_b	Massa específica do asfalto assumida
H	Altura do corpo de prova
h	Altura do corpo de prova (cm)
ha	Hectare
Hz	Hertz
i	Taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade
Jnr	Compliances não recuperáveis
Kg	Quilo
Km	Quilômetro
kPa	Quilopascal
kWh	Quilowatt-hora
L	Vida útil média real do produto final
L	Comprimento do trecho (km)
M	Massa total de um produto
m	Metro
m^2	Metro quadrado
m^2a	Metro quadrado-área
m^3	Metro cúbico
MAR- Z25	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 25% de RAP + 0,3% de zeólita
MAR- Z33	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 33% de RAP + 0,3% de zeólita
MAR-BL10%	Mistura asfáltica reciclada com BL10% + 33% de RAP
MAR-BL4%	Mistura asfáltica reciclada com BL4% + 15% de RAP

MAR-BL6%	Mistura asfáltica reciclada com B64% + 25% de RAP
MAR-Z15	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 15% de RAP + 0,3% de zeólita
MJ	Megajoule
MR	Módulo de resiliência
N	Número de aplicações de carga na ruptura por fadiga
N	Número de passadas da fresadora
Na-P1	Zeólita sintética
NH ₃	Amônia
NMVOC	Compostos orgânicos voláteis não metano
P	Potência da máquina (kwh)
Pa.s	Pascal segundo
P _b	Teor de asfalto presente no RAP
PEN	Valor da penetração à 25°C, 100 g, 5 s
Q	Número total de atividades
QE	Qualidade dos ecossistemas
R	Disponibilidade de recursos
REF	Mistura asfáltica de referência, composta por agregados e ligante asfáltico virgem
RRT	Resistência à tração retida
RT	Resistência à tração
SH	Saúde humana
Si	Sílica
SO ₂	Dióxido de enxofre
T _b	Temperatura ótima relevante da mistura de ligantes (usinagem e compactação)
T _{c, interm}	Temperaturas críticas intermediária do ligante
T _{c, máx}	Temperaturas críticas máxima do ligante
T _{c, mín}	Temperaturas críticas mínima do ligante
T _f	Temperatura ótima relevante do ligante virgem (usinagem e compactação)
t _k	Ano no futuro do fluxo de caixa de atividade k
tkm	Tonelada-quilômetro

TR	Taxa de reciclagem ou percentagem de RAP na mistura asfáltica reciclada
Tr	Temperatura ótima relevante do ligante do RAP (usinagem e compactação)
US\$	Dólar americano
V	Matéria-prima virgem
v	Velocidade da máquina (km/h)
W	Largura da pista (m)
CE	Consumo de energia
IFL	Índice de fluxo linear
U	Número de unidades funcionais alcançadas durante o uso de um produto
W	Quantidade total de resíduos
χ	Fator de utilidade, calculado conforme Mantalovas e Di Mino (2019)
χ'	Fator de utilidade, calculado por meio da proposta de adaptação desse estudo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	28
1.1	JUSTIFICATIVA.....	30
1.2	Hipóteses.....	32
1.3	Objetivos.....	33
1.3.1	Objetivo Geral.....	33
1.3.2	Objetivos Específicos.....	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
2.1	Reclaimed Asphalt Pavement em misturas asfálticas.....	35
2.1.1	Panoramas nacionais e internacionais do uso de RAP em misturas asfálticas.....	38
2.2	Determinação das características do RAP.....	43
2.2.1	Processos de extração e recuperação do ligante RAP.....	46
2.2.2	Cenários de mistura de ligante RAP com ligante virgem.....	49
2.3	Metodologias de projeto de misturas asfálticas recicladas.....	53
2.3.1	Método do Asphalt Institute.....	54
2.3.2	Método SUPERPAVE.....	54
2.4	Fenômenos de mistura do ligante RAP.....	59
2.5	Principais métodos usados para elevar a taxa de reciclagem em misturas asfálticas ...	62
2.5.1	Uso de ligante asfáltico mais mole.....	64
2.5.2	Uso de agentes de reciclagem.....	65
2.5.3	Uso de tecnologia WMA.....	66
2.5.3.0.1	Tipos de tecnologia WMA.....	69
2.5.4	Uso de bioligantes.....	71
2.6	Zeólita.....	73
2.6.1	Natureza propriedades das Zeólitas.....	74
2.6.2	Zeólita na pavimentação.....	75
2.6.2.1	Pesquisas sobre o uso da zeólita em ligantes asfálticos.....	76
2.6.2.2	Pesquisas sobre o uso da zeólita em misturas asfálticas.....	80
2.7	Óleo de Algodão.....	86
2.7.1	Óleo de algodão na pavimentação.....	88
2.8	Sustentabilidade da indústria da pavimentação.....	90
2.8.1	Economia circular para misturas asfálticas com RAP.....	93
2.8.2	Avaliação do Ciclo de Vida.....	100
2.8.2.3	Avaliação do Ciclo de Vida para misturas asfálticas com RAP.....	102
2.8.3	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida.....	107
2.8.3.4	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida para misturas asfálticas com RAP.....	111
2.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	116
3.1	Materiais.....	118
3.1.1	RAP.....	118
3.1.2	Agregados virgens.....	118
3.1.3	Zeólita.....	120
3.1.4	Óleo de Algodão.....	122
3.1.5	Ligante asfáltico virgem.....	123
3.2	Métodos.....	125
3.2.1	Etapa 1: Caracterização do RAP.....	126
3.2.1.5	Caracterização dos agregados presentes no RAP.....	126
3.2.1.6	Caracterização do ligante presente no RAP.....	128

3.2.1.7	Determinação do DoA'	130
3.2.1.7.2	Valores do DoA'	133
3.2.2	Etapa 3: Formulação e caracterização dos bioligantes	138
3.2.3	Etapa 2: Avaliação do cenário 100%RAP + Aditivo	143
3.2.4	Etapa 4: Dosagem das misturas asfálticas estudadas.....	145
3.2.4.8	Dosagem das misturas asfálticas de referência	145
3.2.4.9	Dosagem das misturas asfálticas recicladas com uso de bioligantes.....	147
3.2.4.10	Dosagem das misturas asfálticas recicladas com uso de zeólita	152
3.2.5	Etapa 5: Avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas estudadas...	153
3.2.5.10.3	Resistência à tração por compressão diametral (RT)	154
3.2.5.10.4	Dano por umidade induzida	155
3.2.5.10.5	Módulo de resiliência (MR)	156
3.2.5.10.6	Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	157
3.2.5.10.7	Resistência à deformação permanente (Flow Number)	158
3.2.5.10.8	Cântabro	159
3.2.6	Etapa 6: Avaliação da sustentabilidade das misturas asfálticas estudadas	160
3.2.6.1	Economia circular para misturas asfálticas recicladas.....	160
3.2.6.1.1	Pressupostos para o cálculo dos <i>ICMMAR</i> das misturas asfálticas estudadas ...	163
3.2.6.2	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das misturas asfálticas recicladas	163
3.2.6.2.1	Definição de objetivo e escopo da ACV	164
3.2.6.2.2	Análise de inventário do ciclo de vida (ICV).....	168
3.2.6.2.3	Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	169
3.2.6.3	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida das misturas asfálticas recicladas	171
3.2.7	Etapa 7: Avaliação integrada do desempenho mecânico, ambiental e econômico ...	175
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	177
4.1	Avaliação do cenário 100% RAP + ADITIVOS.....	177
4.1	Avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas	185
4.1.1	Resistência à tração por compressão diametral (RT)	186
4.1.2	Dano por umidade induzida	188
4.1.3	Módulo de resiliência (MR)	190
4.1.4	Desgaste Cântabro	193
4.1.5	Fadiga	196
4.1.6	Flow Number	201
4.2	Avaliação da sustentabilidade das misturas asfálticas.....	203
4.2.1	Análise de Circularidade das Misturas Asfálticas	203
4.2.2	Avaliação do ciclo de vida das misturas asfálticas.....	210
4.2.2.4	Análise dos inventários do ciclo de vida (ICV)	210
4.2.2.5	Impactos na qualidade dos ecossistemas, na saúde humana e na disponibilidade de recursos	224
4.2.2.6	Comparativo geral dos impactos ambientais	235
4.2.3	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida das Misturas Asfálticas.....	238
4.2.3.7	Estimativa dos custos e investimentos iniciais	238
4.2.3.8	Avaliação econômica das alternativas	246
4.2.4	Avaliação integrada do desempenho mecânico, econômico e ambiental	249
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	253
5	CONCLUSÕES.....	256
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	258
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	259

1 INTRODUÇÃO

As preocupações sobre a disponibilidade e alocação de recursos naturais, a exploração desordenada de matéria-prima, os impactos das atividades humanas sobre os ecossistemas e o aumento da poluição continuam sendo o cerne das atenções dos diversos setores socioeconômicos.

Neste cenário, a indústria da pavimentação tem sido incentivada para uma atuação mais circular por meio da associação do desenvolvimento econômico a um melhor uso de recursos naturais, a partir do entendimento da importância dos impactos que esta atividade impõe ao meio ambiente por meio da produção, construção e gestão de seus produtos e ativos, juntamente com as regulamentações ambientais rigorosas (MANTALOVAS e DI MINO, 2020).

As evidências dos efeitos nocivos da economia linear, usada na maior parte das atividades de pavimentação, tem reforçado a emergência pela entrega de pavimentos que atendam ao viés da sustentabilidade ambiental, ao mesmo tempo que utilizem os recursos financeiros de uma forma mais responsável economicamente. Este fato tem motivado a comunidade da pavimentação a investigar estratégias que melhorem o desempenho ambiental e reduzam os custos das práticas de construção e manutenção de pavimentos rodoviários, utilizando soluções de engenharia sustentáveis (SANTOS e FERREIRA., 2017).

Dentre os esforços observados, destaca-se a busca por técnicas de produção de misturas asfálticas que se afastem do sistema linear de “extrair, produzir, descartar”, caracterizado por demandar elevados gastos de recursos naturais e energéticos e gerar consideráveis quantidades de gases nocivos, emissões voláteis e resíduos sólidos rejeitados.

Uma das alternativas que segue a tendência de reter e regenerar recursos ambientais, diminuir os gastos de energia e conservar recursos financeiros é a reciclagem do material fresado, denominado *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*, proveniente do desbastamento durante as operações de restauração e reabilitação de pavimentos asfálticos (AL-QADI et al., 2007; ARSHAD e AHMED, 2017; ZHU et al., 2020; WEETMAN, 2020).

O ligante asfáltico e os agregados que compõem o RAP possuem valor econômico e podem substituir uma parte dos agregados e ligante virgens de uma mistura asfáltica recém-projetada, reduzindo assim a quantidade de matéria-prima nova a ser adicionada. Isso proporciona uma economia de espaço, de energia e de recursos financeiros e a conservação de

recursos naturais (McDANIEL e ANDERSON, 2001; COPELAND, 2011; DAI LU e SALEH, 2016).

No entanto, a incorporação de quantidades elevadas de RAP ($\geq 30\%$), em misturas asfálticas à quente, ainda esbarra nas preocupações relacionados às peculiaridades do RAP, à interação do ligante RAP com os componentes virgens e/ou com agentes de reciclagem e ao desempenho do produto final.

Entraves à majoração da taxa de reciclagem são representados pela variabilidade do RAP, elevada rigidez do ligante envelhecido, falta de padronização da metodologia de projeto, incertezas sobre a determinação dos graus de ativação (DoA), de disponibilidade (DoAv) e de mistura (DoB) e carência de prognósticos acerca do desempenho das misturas asfálticas recicladas a longo prazo (AL-QUADI et al., 2012, ZAUMANIS e MALLICK, 2014, ARÁMBULA-MERCADO et al., 2018; LO PRESTI et al., 2019).

Alguns métodos têm sido estudados e desenvolvidos no intuito de elevar a quantidade de RAP na composição das misturas asfálticas. Nesse quesito, dentre as alternativas, a literatura aponta como eficazes o uso de tecnologias de formação de espuma aplicadas às misturas asfálticas mornas (WMA), mais especificamente a zeólita (MALLICK et al., 2008; TAO e MALLICK, 2009; VAIANA et al., 2013; HILL et al., 2013; SENGOZ et al., 2016; SANCHEZ-ALONZO et al., 2020) e o uso de bioligantes à base de material animal, vegetal ou de processamento industrial (MOGAWERE et al., 2012; HILL et al., 2013; DAVIS et al., 2014; SENGOZ et al., 2016; BARCO-CARRIÓN et al., 2017; ELKASHEF et al., 2017; ZHU et al., 2017).

Dessa maneira, num aspecto sustentável a adição de taxas de reciclagem cada vez maiores tende a reduzir os impactos ambientais e econômicos das misturas asfálticas, entretanto a inclusão de aditivos necessários para a garantia do bom desempenho dessas misturas pode acarretar num aumento dos impactos ambientais e de recursos financeiros, comprometendo a sustentabilidade do produto final.

Conforme afirma Petrillo et al. (2016) é preciso buscar a sustentabilidade por meio da medição de índices específicos e controlar as variáveis que influenciam o tripé econômico, social e ambiental. Mantalovas e Di Mino (2019) salientam que a sustentabilidade é sensível ao contexto, sendo então imperativo que as iniciativas e processos relacionados a ela sejam cuidadosamente analisados caso a caso.

Entende-se que para falar de sustentabilidade de misturas asfálticas é necessário englobar, além do desempenho mecânico, o desempenho econômico e ambiental. Nesse

cenário, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de uma mistura asfáltica pode projetar a relevância ambiental do processo de produção da própria mistura, o Índice de Circularidade do Material (ICM) pode fornecer um rótulo que engloba desempenho ambiental e mecânico dessas misturas e a Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) pode mostrar quanto o ativo demandará em despesas ao longo de sua vida útil. A combinação dessas avaliações é capaz de fornecer uma avaliação holística do produto, do processo de produção e dos fatores econômicos associados.

Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma avaliação de misturas asfálticas, com diferentes taxas de RAP e dois aditivos, que integre tanto os aspectos de desempenho mecânico e de graus de ativação de ligante como também os aspectos econômicos, ambientais e de circularidade desses materiais por meio de uma análise integrativa do Índice de Circularidade, ACV e ACCV.

1.1 JUSTIFICATIVA

O modo como as sociedades utilizam os recursos naturais para suprir suas necessidades tem obedecido o padrão econômico linear (extrair-fabricar-usar-descartar) e, portanto, tem se tornado cada vez menos sustentável. Segundo Korhonen et al. (2018) cerca de 75% da produção global de energia é baseada em recursos energéticos não renováveis.

Dentre as propostas para uma mudança nesses padrões de produção e consumo está o conceito de Economia Circular (EC), capaz de fornecer modelos alternativos e circulares de fluxo de energia e de materiais, minimizando a produção de resíduos e maximizando a vida útil de todo e qualquer material, serviço ou produto dentro de um sistema econômico (MACARTHUR, 2013; LINDER, 2017).

No setor da engenharia rodoviária a reciclagem de pavimentos, bem como a tentativa de aumentar a porcentagem de material fresado dentro de novas misturas asfálticas por meio do uso de diferentes aditivos, aparecem como iniciativas circulares e sustentáveis principalmente pelo fato dessas práticas auxiliarem na conservação e economia dos recursos naturais e energéticos.

Mantalovas e Di Mino (2019) salientam que a prática de reciclagem de pavimentos já está sendo implementada pelas autoridades rodoviárias ou pelas partes interessadas, não porque sirvam aos princípios de economia circular ou porque são benéficas em termos de sustentabilidade, mas apenas porque são economicamente rentáveis por causa da reutilização

de um resíduo que conduz a uma redução dos custos das misturas e assim, pela regra geral, são consideradas boas práticas numa perspectiva ambiental.

Outro contraponto é que o teor de RAP que pode ser utilizado com sucesso na reciclagem a quente é ditado principalmente por considerações práticas de desempenho final do pavimento. Ou seja, no consenso dominante no setor da engenharia rodoviária, para ser considerada sustentável e viável economicamente, as misturas asfálticas recicladas devem atender somente aos requisitos mínimos de desempenho especificados para uma mistura asfáltica totalmente virgem.

As misturas asfálticas contendo RAP, principalmente em taxas elevadas, comumente apresentam alta rigidez e, conseqüentemente, baixa ductilidade e problemas de trincamento, fadiga prematura e sensibilidade à água (ZAUMANIS e MALLICK, 2014; BOWERS et al., 2013; AL-QUADI et al., 2015; SENGOZ e OYLUMLUOGLU, 2013; SONG et al., 2018; BA'NKOWSKI 2018; DAI LU e SALEH, 2016). Este fato leva a indústria a recorrer à adição de, por exemplo, tecnologias WMA, bioligantes, ligantes asfálticos mais moles e agentes rejuvenescedores industrializados no intuito de atingir os requisitos mínimos de desempenho especificados para a mistura reciclada. Seja qual for a alternativa adotada, se configurará como mais um componente da mistura, que deverá entrar na análise da sustentabilidade do produto.

Percebe-se que o esforço da indústria de engenharia de pavimentos para produtos mais circulares, ainda não vem sendo avaliado de forma mais aprofundada em termos de seus impactos ambientais e financeiros. As iniciativas relacionadas à Economia Circular devem ser cuidadosamente examinadas caso a caso, e no contexto de misturas asfálticas é necessário adotar uma abordagem composta que possa identificar e avaliar os impactos do aumento da circularidade das misturas asfálticas tanto nos requisitos de desempenho do produto final como nos impactos ao meio ambiente e aos custos monetários diretos envolvidos.

Portanto, uma abordagem que envolva não somente o desempenho mecânico, mas também integre a avaliação da circularidade, a avaliação do ciclo de vida e as análises de custo do ciclo de vida devem ser seguidas e apoiadas visando uma maior aceitação das práticas de reciclagem de pavimentos e da adoção de determinados aditivos.

1.2 HIPÓTESES

A justificativa desse trabalho apresentou a problemática de que, comumente, no setor da engenharia rodoviária as misturas asfálticas recicladas estão sendo consideradas práticas sustentáveis devido somente ao fato de se configurarem como uma alternativa para a reintrodução de um resíduo na cadeia produtiva, conservando assim energia e recursos naturais virgens. Estas têm sido bem aceitas quando conseguem atender aos requisitos mínimos de desempenho especificados para uma mistura asfáltica virgem, o que sugere a afirmação de que são economicamente rentáveis.

Em seguida, este estudo mostrou a necessidade de estudos mais aprofundados, que avaliem também a sustentabilidade ambiental e econômica de diferentes misturas asfálticas recicladas.

Portanto, nesta tese pretendeu-se verificar a validação das seguintes hipóteses:

- Uma avaliação que integre os aspectos mecânicos, econômicos e ambientais pode revelar os efeitos potenciais do aumento da sustentabilidade das misturas asfálticas estudadas, podendo auxiliar na tomada de decisão das partes interessadas.
- Avaliar somente o desempenho de misturas asfálticas recicladas com diferentes teores de RAP e diferentes tipos de aditivos não é suficiente para afirmar qual mistura será mais sustentável.
- O uso individual de bioligantes (à base de óleo de algodão) e de uma tecnologia WMA (zeólita) em misturas asfálticas recicladas poderá interferir tanto no desempenho mecânico como na circularidade e na promoção de benefícios econômicos e ambientais para essas misturas.
- A integração das avaliações de desempenho mecânico, ambiental e econômico determinará de uma forma mais assertiva quais os cenários de reciclagem, em termos de teor de RAP e tipo e teor de aditivos estudados, serão os mais sustentáveis o que poderá motivar outros estudos direcionados ao entendimento real e substancial da sustentabilidade na pavimentação.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Apresentar uma análise integrada do desempenho mecânico, ambiental e econômico de misturas asfálticas à quente com diferentes taxas de reciclagem e com a adição de zeólita e bioligante a base de óleo de algodão.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar (DoA') por meio de parâmetros mecânicos e volumétricos, estabelecendo um comparativo entre eles;
- Verificar a interferência dos aditivos utilizados nas propriedades de resistência, rigidez e volumetria de amostras confeccionadas com 100% RAP;
- Determinar o percentual de RAP por meio de *blendig charts* para misturas asfálticas com o uso de bioligante à base de óleo de algodão;
- Mensurar o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com uso da zeólita e do bioligante e comparar com misturas asfálticas de referência;
- Quantificar e avaliar o potencial de circularidade das misturas asfálticas recicladas por meio do cálculo do Índice de Circularidade de Misturas Asfálticas para conjunto de resultados de desempenho mecânico;
- Realizar uma avaliação do ciclo de vida (do berço ao túmulo) para todas as misturas asfálticas estudadas, para estabelecer um comparativo entre as alternativas em termos de impactos ambientais em cada etapa do ciclo de vida da cadeia produtiva;
- Realizar uma avaliação econômica, segundo a perspectiva do ciclo de vida, para todas as misturas asfálticas estudadas;
- Apresentar uma avaliação integrada das dimensões mecânicas, ambientais e econômicas no processo de decisão sobre a alternativa de mistura asfáltica que melhor atende ao conceito de sustentabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo reúne informações coletadas em publicações correntes sobre a prática da incorporação do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) em misturas asfálticas e a exposição das principais preocupações que têm limitado o uso de elevadas taxas de reciclagem.

Este capítulo procurou-se apresentar um panorama sobre a geração de RAP e a prática do seu uso em misturas asfálticas no Brasil e em outros países do mundo por meio dos dados encontrados na literatura, a fim de realizar uma contextualização nacional e internacional sobre disponibilidade do RAP, para atender as demandas das misturas asfálticas recicladas.

Com base no enfoque de projeto, buscou-se mostrar como geralmente é feita a avaliação dos materiais, considerando a disponibilidade do ligante RAP, quais as diretrizes para a seleção do ligante asfáltico e quais as principais metodologias de projeto de misturas asfálticas recicladas utilizadas atualmente.

Em seguida, procurou-se abordar os três cenários de mistura de RAP com os materiais virgens: rocha negra (*black rock*); disponibilidade total (*full availability*) e disponibilidade parcial (*partial availability*); e apresentar as definições e metodologias de quantificação dos fenômenos de mistura do ligante RAP: Grau de ativação do ligante RAP (DoA) Grau de disponibilidade do ligante RAP (DoAv), Grau de mistura entre o ligante RAP e o agente de reciclagem (DoB) e o Grau relativo de ativação do ligante RAP (DoA’).

Na sequência foram apresentados os principais artifícios desenvolvidos para aumentar a taxa de reciclagem, que têm despertado o interesse da indústria da pavimentação no sentido de diminuir a susceptibilidade à fadiga e ao trincamento decorrentes da elevada rigidez das misturas asfálticas contendo altas quantidades de RAP. O capítulo também apresenta alguns aspectos relacionados aos aditivos usados nessa pesquisa: zeólita e óleo de algodão. O enfoque foi dado às questões de características desses materiais e influências nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas modificadas por eles.

Por fim, são apresentadas as definições de Economia Circular, Avaliação do Ciclo de Vida e Avaliação do Custo do Ciclo de Vida bem como um resumo de consultas bibliográficas sobre a aplicabilidade das metodologias dessas abordagens no âmbito das misturas asfálticas recicladas. Por meio dessas informações, buscou-se um embasamento para a avaliação holística que se pretende realizar nesse estudo, por meio da integração do desempenho mecânico, da circularidade, do ciclo de vida e das análises de custo do ciclo de

vida das misturas recicladas com adição de zeólita e bioligante a base de óleo de algodão, no intuito de promover uma compreensão mais ampla da sustentabilidade desses produtos.

2.1 RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo Karlsson e Isacsson (2006) embora o RAP tenha sua origem na demolição de pavimento danificado, este material não deve ser considerado como rejeito, pois as importantes propriedades residuais do ligante e agregados minerais contidos no RAP podem ser lucrativas, se exploradas por meio de técnicas de reciclagem adequadas.

De acordo com Brosseau (2011) o RAP pode ser incorporado em misturas asfálticas à quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), em misturas asfálticas à frio, como por exemplo no pré-misturado a frio (PMF), ou em misturas asfálticas mornas (WMA do inglês *Warm Mix Asphalt*), em usina ou *in loco*, com a adição de ligante hidráulico, emulsão ou espuma. A escolha da técnica dependerá da natureza do fresado, do seu modo de tratamento e das características da via onde o produto final será aplicado.

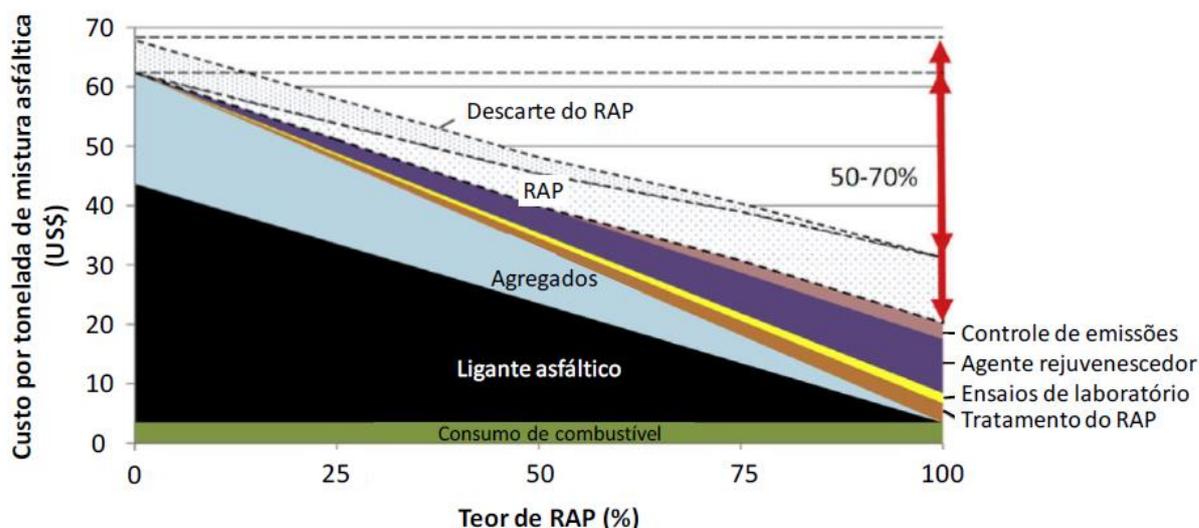
A reciclagem à frio permite a incorporação de uma maior quantidade de RAP. No entanto, nesta técnica o RAP atua como um "agregado negro", pois a baixa temperatura de produção não permite a reativação do ligante RAP, que dificilmente vai interagir de maneira eficiente com o ligante virgem (GRILLI et al., 2013).

Quanto à reciclagem à quente, o uso do RAP permite uma dupla vantagem, pois fornece tanto uma parcela do ligante asfáltico, uma vez que parte do ligante envelhecido poderá ser reativado por meio do aquecimento e utilização de aditivos, como também os componentes minerais poderão ser reaproveitados para a produção de HMA ou WMA novas.

As misturas asfálticas recicladas, sejam elas obtidas por meio de processo à frio, à quente ou morno, para serem consideradas uma solução viável tecnicamente, devem atender pelo menos aos mesmos requisitos válidos para misturas tradicionais (compostas, em sua totalidade, por materiais virgens ou então com baixa quantidade de RAP) (LO PRESTI et al., 2019).

Segundo cálculo realizado por Zaumanis et al. (2014), com o aumento do teor de RAP, os custos com materiais tendem a cair, e uma economia máxima de 50% a 70% em relação ao custo de uma mistura convencional sem material fresado pode ser atingida, como apresentado na Figura 1. Essa composição de custos varia conforme a tecnologia empregada e os fatores geográficos locais.

Figura 1 - Composição de custo de mistura asfáltica reciclada em função do teor de RAP adicionado



Fonte: Adaptado de Zaumanis et al. (2014)

Apesar da prática de utilizar o material fresado em misturas à quente ter se tornado comum nas últimas décadas, por seguir a linha da sustentabilidade econômica e ambiental, agências e departamentos de transportes de vários países ainda se mostram preocupados quanto ao uso desse material (AUSTROADS, 2015; EN 13108-1, 2016; COPELAND, 2011; MOLLENHAUER, 2010). A incorporação do RAP nas camadas superiores do pavimento asfáltico ainda é limitada a cerca de 10 a 30% (NOFERINI et al., 2017) no intuito de reduzir os riscos de problemas de desempenho.

Os órgãos de transporte entendem que o RAP é um material complexo que se diferencia, principalmente em termos de variabilidade, dos componentes tradicionais usados nas misturas asfálticas, e pode trazer desempenho adverso ao pavimento, causando custos mais elevados de manutenção e reabilitação. Esses fatos explicam as preocupações de utilizar RAP em misturas asfálticas, principalmente naquelas destinadas as camadas de rolamento de vias de tráfego mais intenso e pesado.

Dentre os aspectos que trazem preocupações na elaboração de projetos de misturas asfálticas contendo RAP estão:

- variabilidade das propriedades do RAP, devido à sua natureza frequentemente desconhecida e sua heterogeneidade (COPELAND, 2011; AL-QUADI et al., 2012; AL-QUADI et al., 2015; ARÁMBULA-MERCADO et al.2018);
- incerteza sobre o risco potencial à saúde dos trabalhadores que manuseiam esses materiais asfálticos reciclados (EAPA, 2017);

- dificuldade ou impossibilidade de reciclagem quando os revestimentos antigos que originaram o RAP possuíam alguns tipos de aditivos (pó de borracha, polímeros, fibras, entre outros) (BROWN et al., 2009);
- falta de especificações padronizadas para a caracterização e classificação de RAP (COPELAND, 2011; MIRHOSSEINI et al., 2018);
- mudanças na proporção de asfaltenos e maltenos do ligante RAP, o que leva ao aumento da rigidez e viscosidade e diminuição da ductilidade, conduzindo a falhas por trincamento (AL-QADI et al. 2007; ZAUMANIS e MALLICK, 2014)
- maior rigidez do ligante RAP do que o grau de desempenho prescrito, devido ao envelhecimento do revestimento que o originou (TRAN et al., 2012; BOWERS et al., 2013; AL-QUADI et al., 2015);
- falta de métodos para medir com precisão as propriedades do ligante envelhecido (CAVALLI et al., 2017);
- dificuldade no entendimento dos mecanismos de interação e dos graus de ativação, disponibilidade e mistura que ocorre entre o ligante envelhecido, ligante virgem e agentes de reciclagem (AL-QUADI et al., 2012; ZAUMANIS e MALLICK, 2014; HUANG e TURNER, 2014; MOHAJERI et al., 2015; LO PRESTI et al., 2019);
- incertezas na adaptação dos procedimentos de projeto para as misturas asfálticas recicladas (BROSSEAUD, 2011; WEST 2013; NOFERINI et al., 2017; ABED et al., 2018; ARÁMBULA-MERCADO et al.,2018);
- dificuldades em obter a volumetria da mistura desejada em laboratório e em campo (AL-QUADI et al., 2015);
- maior rigidez e fragilidade da mistura asfáltica projetada, o que pode implicar em trincamentos prematuros (LEE et al., 2009; SENGOZ e OYLUMLUOGLU, 2013; SONG et al., 2018);
- preocupações com a sensibilidade à água, fadiga e trincamento em baixa temperatura, devido à incorporação de maiores quantidades de ligante envelhecido (BROSSEAUD, 2011; MIRHOSSEINI et al., 2018; BAŃKOWSKI 2018; DAI LU e SALEH, 2016);
- incertezas na seleção da temperatura de mistura e compactação, que deve ser alta o suficiente para liberar a umidade dos agregados e promover a remobilização do ligante envelhecido e baixa o suficiente para evitar o enrijecimento ainda maior do ligante RAP (TAO e MALLICK, 2009).

2.1.1 Panoramas nacionais e internacionais do uso de RAP em misturas asfálticas

A utilização de RAP como componente de mistura asfáltica é considerada uma iniciativa do setor rodoviário relacionada a economia circular (MANTALOVAS e Di Mino 2019). Esta não é uma ideia recente e tem ganhado força por despontar como uma alternativa para os problemas de escassez de recursos não renováveis e de destinação adequada de resíduos.

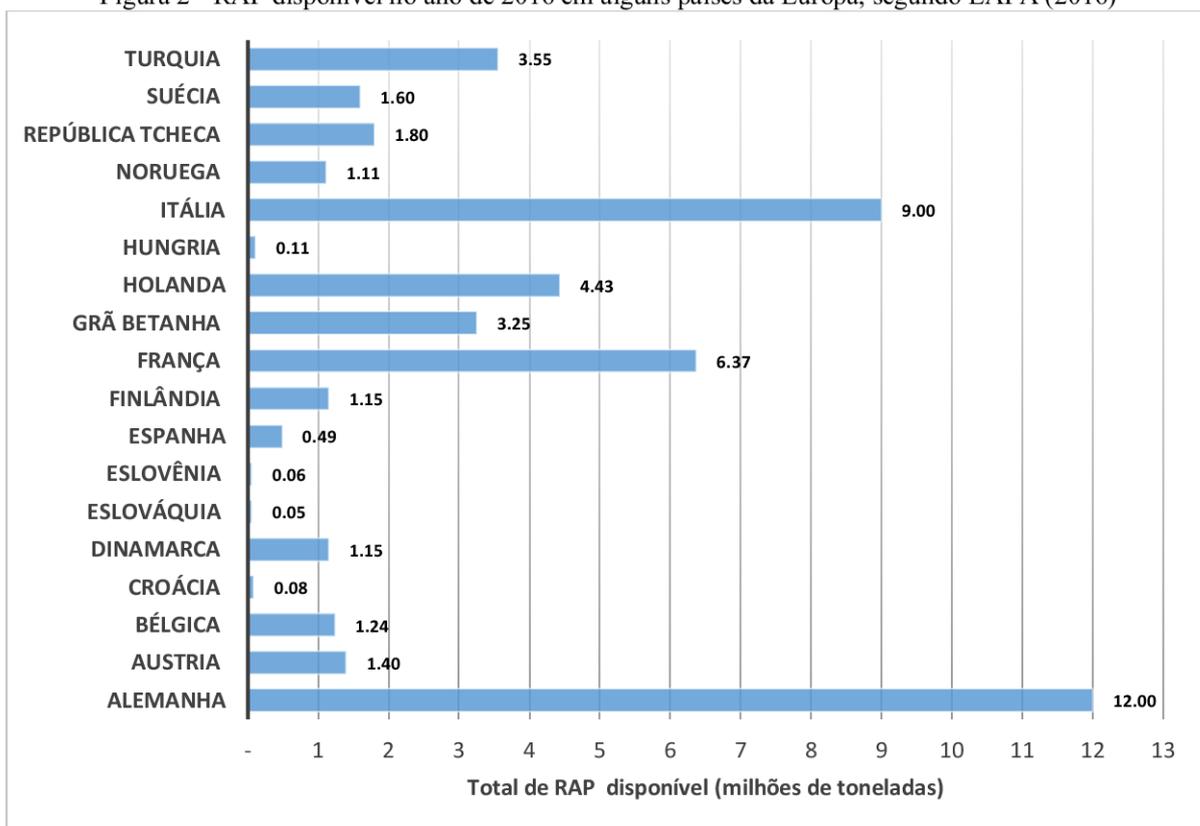
A indústria de asfalto da Europa tem se posicionado contra a destinação do fresado para aterros e tem apoiado a ideia de que esse material não deve ser visto como um resíduo. Portanto, em 2017, a *European Asphalt Pavement Association* (EAPA), numa declaração de posicionamento sobre o uso de materiais secundários, subprodutos e resíduos em misturas asfálticas, recomendou que a prioridade seja dada à reutilização de RAP em misturas asfálticas quente ou mornas, pois isso representa uma economia significativa de materiais e energia (EAPA, 2017).

O gráfico da Figura 2 apresenta a quantidade de RAP disponível em países europeus no ano de 2016, em milhões de toneladas, e a Figura 3 mostra dados sobre os percentuais de RAP utilizados na Europa em misturas asfálticas quente e morna, na reciclagem a frio e em camadas granulares.

Por meio da Figura 2 percebe-se que a Alemanha, a Itália e França lideram o *ranking* de disponibilidade de RAP e que o montante de RAP nesses três países, no ano de 2016, ultrapassou o resultado do somatório da quantidade de RAP gerada nos outros 15 países.

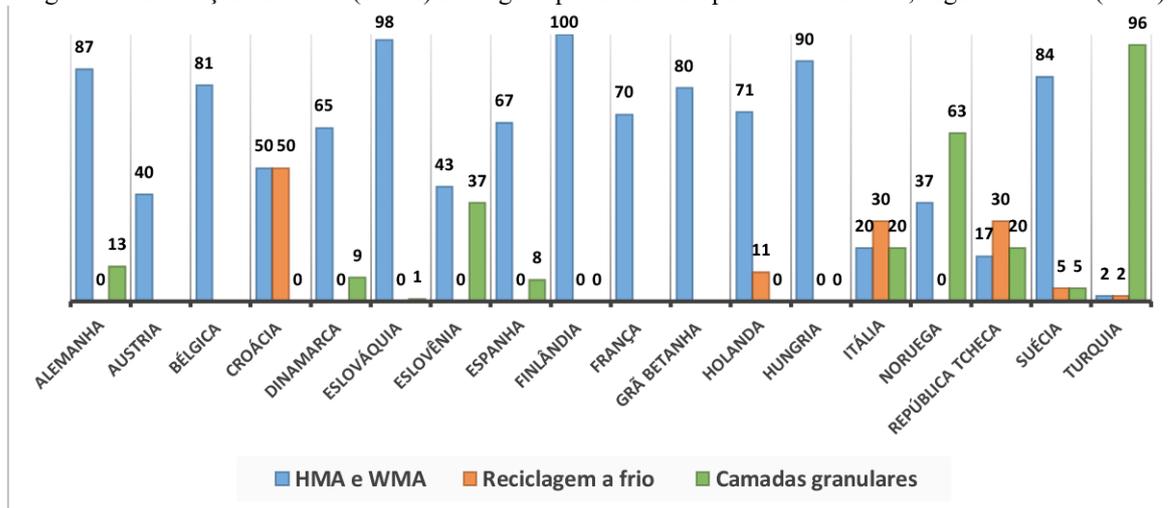
A Figura 3 revela que dos 18 países analisados, 14 deles destinaram a maior parte do RAP gerado nos seus domínios em 2016 para a produção de misturas asfálticas à quente e mornas, destacando-se a Finlândia com um reaproveitamento de 100% deste material em HMA e WMA. O país europeu com a maior disponibilidade de RAP, a Alemanha, também utilizou a maior parte do seu RAP (87%) em HMA e WMA e o restante em camadas granulares.

Figura 2 - RAP disponível no ano de 2016 em alguns países da Europa, segundo EAPA (2016)



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

Figura 3 - Utilizações de RAP (em %) em alguns países da Europa no ano de 2016, segundo EAPA (2016)



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

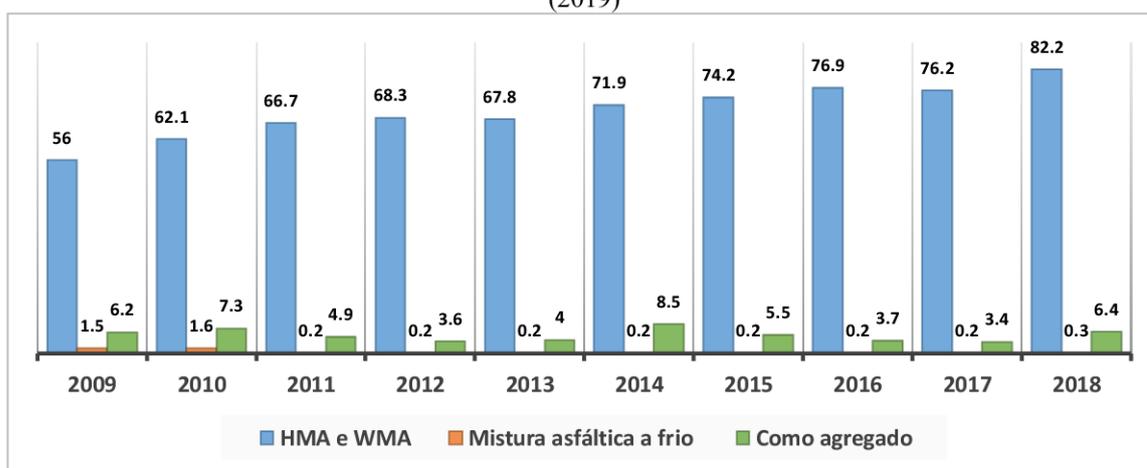
A Figura 4 apresenta uma representação de dados coletados nos Estados Unidos pela *National Asphalt Pavement Association* (NAPA), que mostra o total estimado, em milhões de toneladas de RAP, usado no país em misturas asfálticas à quente ou mornas, misturas asfálticas a frio e como agregado, segundo levantamentos da temporada de construção de

2009 a 2018. Observa-se que a quantidade de RAP usada em misturas asfálticas à quente ou mornas é predominante, em comparação com as outras utilizações. Segundo a NAPA, essas duas destinações para o material fresado são as ideais.

O total estimado de RAP usado nos Estados Unidos, no ano de 2018, em misturas asfálticas foi de 82,2 milhões de toneladas. Isso representa um aumento de quase 7,9% em relação ao ano de 2017 e de quase 46,8% do total estimado em 2009. Estima-se que o uso de RAP durante a temporada de construção de 2018 reduziu a necessidade de 4,1 milhões de toneladas (23 milhões de barris) de ligante asfáltico e mais de 78 milhões de toneladas de agregado, com um valor total estimado de mais de \$2,8 bilhões (WILLIAMS et al., 2019).

Ainda de acordo com a pesquisa da NAPA, a recuperação de 101,1 milhões de toneladas de RAP para uso futuro economizou cerca de 61,4 milhões de metros cúbicos de espaço em aterros e mais de \$ 4,5 bilhões em taxas de despejo em aterros.

Figura 4 - Utilizações de RAP (em milhões de toneladas) nos Estados Unidos (2009-2018), segundo NAPA (2019)



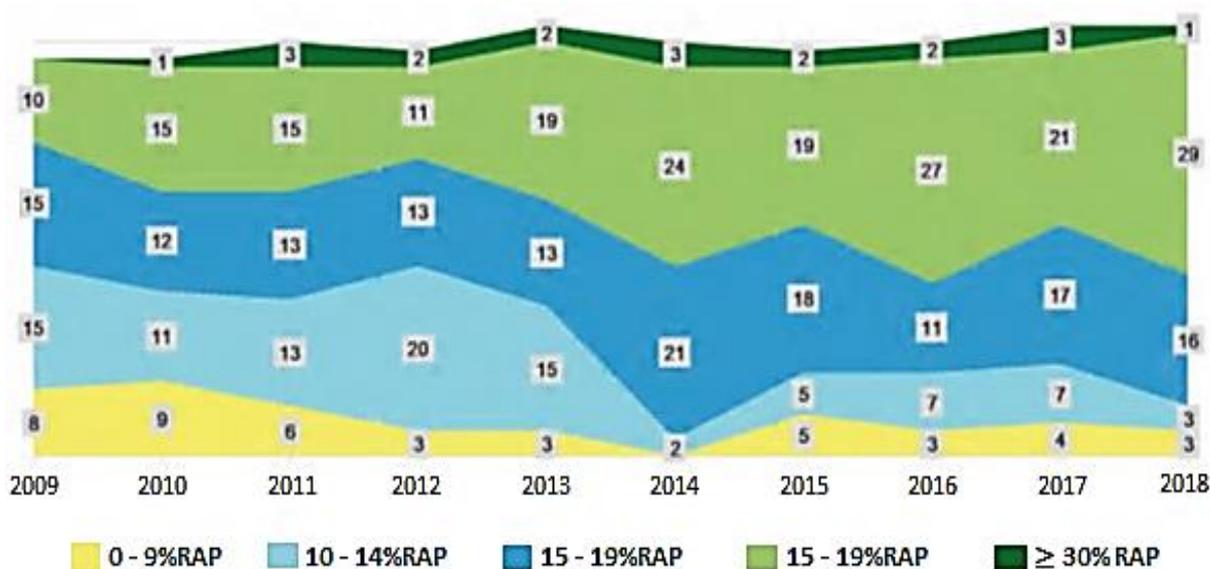
Fonte: Elaborada pela autora (2023)

A Figura 5 apresenta uma representação gráfica dos valores de porcentagem média de RAP usado em misturas HMA e WMA, por temporada de construção entre os anos de 2014 e 2018, em cada estado americano. Na leitura do gráfico da referida figura é possível identificar o número de estados americanos que incorporam determinado percentual de RAP em HMA e WMA, entre os anos de 2009 e 2018.

Percebe-se que os Estados Unidos têm tentado aumentar o teor de RAP em misturas asfálticas à quente e mornas. O número de estados com produtores relatando a incorporação de percentuais médios de RAP de 20% ou mais aumentou significativamente, passando de 10 estados em 2009 para 30 estados em 2018. O número de estados com produtores relatando

porcentagens de RAP inferiores a 15% diminuiu de 23 estados em 2009 para apenas dois estados em 2014 e permaneceu relativamente estável em 10 ou 11 estados em 2015 até 2017, antes de cair para seis estados em 2018.

Figura 5 - Representação gráfica da porcentagem média de RAP usado em misturas HMA e WMA nos estados americanos, segundo NAPA (2019)



Fonte: Adaptado de NAPA (2019)

Segundo Suzuki (2019), no Brasil, existem poucos casos relatados na literatura de aplicação de misturas asfálticas recicladas.

Uma das primeiras experiências brasileiras relacionadas a reciclagem asfáltica aconteceu em 1986, quando foi aplicada na rodovia Anhanguera, trecho entre São Paulo e Campinas, uma mistura asfáltica contendo 50% de RAP, produzida em usina do tipo *drum-mixer*. O trecho tem apresentado comportamento mecânico satisfatório ao longo dos anos (GASPAR, 2019).

Em 2018 a empresa de concessão de infraestrutura, CCR Engelog, realizou uma estimativa, até 2021, da geração de material fresado, expressa em milhões de toneladas, por algumas concessionárias federais e estaduais dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Paraná, conforme pode ser visto na Figura 6. No geral, verifica-se que entre os anos de 2017 a 2021 houve uma queda de 130,4% na geração de RAP oriundo da manutenção das rodovias estaduais e federais concessionadas por essas empresas.

Dentre todas as concessionárias a RodoNorte, que concessionaria o sistema rodoviário que abrange trechos no Paraná da BR 277, da BR 376, da PRC 373/PR 15 e da BR 373 e

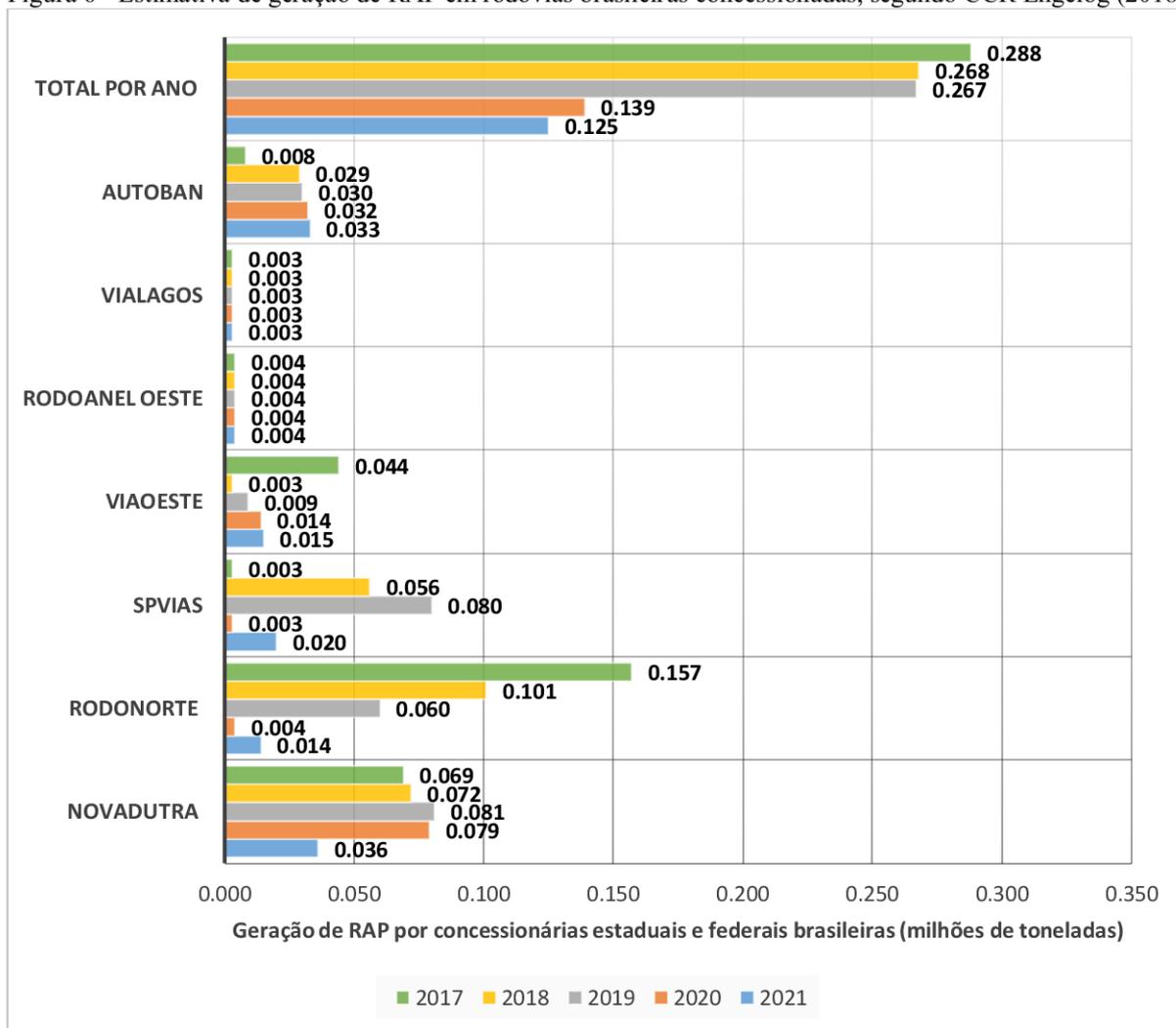
iniciou sua administração em 1997 com contrato de 24 anos, foi a que apresentou a maior redução na geração de RAP.

Segundo a RodoNorte de 1998 até 2019, muitos serviços foram realizados tendo em vista as péssimas condições iniciais de pavimento e de tráfego da malha rodoviária paranaense (tanto federal quanto estadual) concessionada. Durante esse período, houve obras de reconstrução das rodovias, com 732 quilômetros equivalentes por pista com duas faixas; reforço e alargamento de obras de arte especiais (pontes e viadutos); duplicação de mais de 130 quilômetros de rodovias; construção de novas pistas e implantação de vias marginais, terceiras faixas e faixas para paradas em pontos de ônibus. Todos esses serviços apresentam grande potencial de geração de RAP.

Algumas inferências podem ainda ser extraídas do comparativo da estimativa total de RAP gerado por ano pelas concessionárias analisadas, (Figura 6), com os dados, apresentados anteriormente, da quantidade de RAP disponível no ano de 2016 em países da Europa (Figura 2). Observa-se que essas concessionárias dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Paraná produziram 288 mil de toneladas de RAP no ano de 2017, que corresponde a mais do que o dobro do montante disponível em 2016 na Hungria (110 mil toneladas), país europeu que destina 90% desse material para a produção de HMA e WMA. A geração de RAP pelas concessionárias, em 2017, foi quase igual ao somatório das quantidades disponíveis na Hungria, Eslovênia, Eslováquia e Croácia.

As concessionárias analisadas atendem um conjunto de rodovias que correspondem somente a uma pequena fatia da malha rodoviária brasileira. Ainda assim os serviços de conservação, restauração e reabilitação prestados nessas rodovias têm resultado em montantes de RAP superiores à de muitos países europeus, que já detêm o hábito de reutilizar a maior parcela desse material em misturas asfálticas a quente e mornas. Por meio dessas constatações fica evidente a suficiente disponibilidade de RAP no Brasil para ser explorada na produção de misturas asfálticas recicladas.

Figura 6 - Estimativa de geração de RAP em rodovias brasileiras concessionadas, segundo CCR Engelog (2018)



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

2.2 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO RAP

As amostras de RAP devem ser testadas para obter as informações básicas necessárias para o projeto de mistura e para o gerenciamento das pilhas de RAP de uma ou mais fontes. O Quadro 1 apresenta os ensaios exigidos pelos departamentos do Brasil, dos Estados Unidos e do Japão.

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), em cada amostra deverão ser realizados os ensaios de extração de asfalto para a determinação do teor de asfalto presente no RAP utilizando os procedimentos preconizados na ASTM D-2172 (2017) ou DNIT-ME 053 (1994), ambas as especificações com o uso de solvente, e granulometria dos agregados RAP após a extração do ligante (DNIT-ME 083/98).

O DNIT recomenda ainda a realização de outros ensaios, dependendo do projeto da mistura asfáltica reciclada, tais como a recuperação de asfalto, utilizando o método Abson da ASTM D 1856 (2015), para a posterior caracterização do ligante asfáltico recuperado por meio dos ensaios convencionas (penetração, ponto de amolecimento, ductilidade e viscosidade) e o fracionamento químico do ligante recuperado.

Quadro 1 - Caracterização do RAP no Brasil, EUA e Japão

Ensaio para a obtenção das informações básicas		Departamento Brasileiro (DNIT, 2006)	DOTs dos EUA (Arambula-Mercado et al., 2015; Copeland et al., 2011)	Departamentos de várias regiões do Japão (West e Copeland, 2015)
Agregado RAP	Granulometria após a extração do ligante	X	X	X
	Massa específica máxima medida		X	X
	Massa específica e Absorção		X	X
Ligante RAP	Extração e determinação do teor de asfalto	X	X	X
	Recuperação	X*	X	X
	Caracterização física e reológica	X*	X	X
	Fracionamento químico	X*		

*Realizados de acordo com o projeto, caso haja necessidade.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Para a extração e determinação do teor de asfalto no RAP, nos Estados Unidos, são utilizados o método de refluxo com uso de solvente, preconizado pelas normas AASHTO T 164 (2018) ou ASTM 2172 (2017), ou o método do forno de ignição, especificado pela AASHTO T 308 (2018).

Os DOTs também exigem a determinação da massa específica aparente (*bulk specific gravity* - G_{sb}^{RAP}) e absorção, da parcela graúda e miúda do RAP, seguindo as especificações da AASHTO T 85 (2014) e AASHTO T 84 (2017), respectivamente, e a densidade máxima teórica do RAP (G_{mm}^{RAP}), medida por meio da AASHTO T 209 (2020).

De acordo com West (2013) a G_{sb}^{RAP} é uma das propriedades mais importantes a serem determinadas. As massas específicas do RAP e do agregado virgem são usadas para calcular o volume de vazios nos agregados minerais (VAM), parâmetro chave para estimar o teor de ligante asfáltico de projeto e garantir a qualidade do produto final.

No entanto, pode ser difícil medir com precisão a G_{sb}^{RAP} , pois teoricamente é necessário determinar essa propriedade para a fração graúda e miúda, individualmente. Na maioria das

vezes o processo de extração do ligante modifica as propriedades do agregado e também pode alterar a quantidade de material fino, afetando o valor final da G_{sb}^{RAP} . Outro contraponto é a possibilidade da técnica aplicada para a extração do ligante e recuperação do agregado não ser tão eficiente ao ponto de extrair por completo o ligante dos poros dos agregados, conduzindo à valores dubitáveis de volume aparente.

Para determinar as massas específicas do agregado RAP, West et al. (2013) afirmam que se o projeto da mistura asfáltica reciclada contemplar um alto teor de RAP, o método de recuperação do agregado mais adequado seria a extração por solvente. O método de ignição também pode ser usado, com exceção no caso de alguns tipos de agregados que sofrem mudanças significativas na massa específica quando submetido às temperaturas extremas utilizadas nesse método.

Copeland (2011) afirma que se a fonte do RAP for conhecida e os registros de construção originais estiverem disponíveis, o valor da massa específica aparente dos agregados virgens dos registros de construção podem ser usados como o valor da massa específica aparente do agregado RAP.

Daniel e Anderson (2001) explicam que existem duas abordagens para facilitar a determinação da G_{sb}^{RAP} , caso os registros históricos da caracterização dos agregados originais sejam desconhecidos, sendo a segunda a mais simples por não necessitar separar as frações grossas e finas.

A primeira abordagem é usar a massa específica efetiva (*effective specific gravity* - G_{se}^{RAP}) do agregado RAP ao invés de sua G_{sb}^{RAP} . De acordo com Bernucci et al. (2022) a massa específica efetiva (G_{se}) é determinada quando se trabalha com misturas asfálticas cujo teor de ligante asfáltico seja conhecido (caso do RAP). Esse parâmetro é calculado por meio da relação entre a massa seca da amostra e o volume efetivo do agregado, que corresponde ao volume do sólido acrescido do volume dos poros permeáveis à água não preenchidos pelo ligante asfáltico.

A segunda abordagem consiste em calcular a massa específica aparente do agregado RAP com base na densidade máxima teórica (G_{mm}^{RAP}) e um valor assumido para a absorção do agregado RAP. Segundo os autores, essa abordagem funciona bem se a absorção do agregado RAP puder ser prevista com alguma confiança.

2.2.1 Processos de extração e recuperação do ligante RAP

A incorporação de teores elevados de RAP em misturas asfálticas requer uma análise de gráficos de mistura para a seleção do ligante asfáltico virgem e/ou agente de reciclagem. Para isso, deve-se proceder com a extração e recuperação preliminar do ligante RAP para a determinação posterior de suas propriedades fundamentais.

A extração do ligante do RAP pode ser realizada utilizando solventes em técnicas de centrífuga, refluxo ou vácuo e a recuperação deste obtida empregando destilação por meio de aquecimento controlado (método Abson) ou por evaporador rotativo a vácuo. A seguir, será apresentado uma descrição sucinta das técnicas de extração e recuperação mais utilizadas e o Quadro 2 apresenta as vantagens e desvantagens de cada técnica discutida, montados com base em um levantamento bibliográfico realizado por Mikhailenko et al. (2019).

- Extração do ligante RAP: técnica da centrifugação

A aplicação dessa técnica envolve o aquecimento e destorroamento prévio do RAP. Posteriormente, uma determinada massa do material é colocada, juntamente com um solvente (ex: tetracloreto de carbono, cloreto de metileno, propil-brometo, carbonato de amônio e o tricloroetileno) num aparelho extrator de ligante (ex: Rotarex), manual ou elétrico. A separação ocorre com o emprego de ciclos de centrifugação do conjunto solvente + RAP, fazendo com que a matriz pétreia permaneça no interior do aparelho e o ligante envelhecido, juntamente com o solvente residual, seja recolhido por meio de uma saída existente no extrator após cada ciclo de centrifugação.

- Extração do ligante RAP: técnica de refluxo

O procedimento consiste em posicionar uma amostra de RAP em uma cesta de tela metálica cônica, contendo um papel filtro. O solvente (tricloroetileno) é aquecido por uma chapa, sobre a qual todo o aparato com a amostra está posicionado, evapora e atravessa a amostra, sendo condensado no topo do cesto. O solvente percola através da amostra, retornando ao fundo do frasco, levando consigo o ligante RAP dissolvido.

- Extração do ligante RAP: técnica à vácuo

Envolve a mistura do RAP com o solvente em um recipiente, e em seguida, extração da solução solvente-ligante com bomba de vácuo, com os finos e a solução solvente-ligante sendo coletados com uma série de peneiras.

- Recuperação do ligante RAP: método Abson

Este método consiste na destilação da solução solvente+ligante até que a maior parte do solvente desapareça, então dióxido de carbono gasoso é introduzido para remover vestígios do solvente na ausência de moléculas de oxigênio livres, tornando mais fácil a sua remoção em temperaturas de no máximo 163°C. O objetivo da última parte é evitar o acesso de oxigênio a hidrocarbonetos suscetíveis na estrutura do ligante asfáltico em temperaturas elevadas e, assim, reduzir as alterações químicas no ligante asfáltico recuperado.

Segundo Lima (2003b) o problema da utilização deste método para se recuperar o ligante reside na dificuldade da completa remoção do solvente e do controle para que o ligante não oxide ainda mais.

- Recuperação do ligante RAP: por evaporador rotativo a vácuo

Essa técnica faz uso do evaporador rotativo, ou rotoevaporador, para a recuperação do ligante envelhecido. A solução contendo o solvente e o ligante RAP é colocada num frasco de destilação, o qual é rotacionado dentro de um banho de óleo aquecido, enquanto é aplicado no sistema um alto vácuo (EN 12697-3) ou um vácuo parcial e fluxo de gás nitrogênio (ASTM D 5404/2017). O objetivo que se pretende alcançar com o uso do nitrogênio (e vácuo) neste método é o mesmo objetivo relacionado ao uso do dióxido de carbono no método Abson: visa minimizar o acesso de oxigênio a hidrocarbonetos suscetíveis no ligante asfáltico, limitando o envelhecimento durante o processo de recuperação.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens das técnicas de extração e recuperação de ligante RAP

Técnica		Normas	Temperatura	Vantagem	Desvantagem
Extração do ligante RAP	Centrifugação	DNIT-ME 053 (1994); ASTM D2172 (2017) (método A); AASHTO T 164 (2018) (método A).	Ambiente	- muito utilizado; - não aquece ligante;	- não é tão eficaz na remoção do ligante;
	Refluxo	ASTM D2172 (2017) (método B); AASHTO T 164 (2018) (método B).	Quente	-eficaz na remoção do ligante; -maior precisão na determinação do teor de ligante presente na mistura.	- aquece o RAP, o que pode causar um maior envelhecimento do material; - o calor aumenta o risco para o usuário.
	Vácuo	ASTM D2172 (2017) (método E)	Ambiente	-boa precisão na determinação do teor de ligante quando a mistura e composta por agregados altamente variáveis e absorventes	- aparelho difícil de limpar
Recuperação do ligante RAP	Método Abson	ASTM D 1856 (2015)	Quente	- largamente usado; - barato;	- endurecimento do ligante; - solvente residual, levando a uma redução da viscosidade do aglutinante recuperado de até 42%; - coeficientes de variação muito altos para RAP e ligantes envelhecidos em PAV
	Evaporador rotativo a vácuo (rotoevaporador)	ASTM D5404 (2017); ASTM D7906 (2014); EN 12697 (parte 3)	Quente	- menos problemas com solvente residual, especialmente para ligantes de alta viscosidade; - mais eficiente na recuperação de grandes tamanhos de amostras; - mais simples e menos trabalhoso;	- um pouco menos consistente e reproduzível do que o método Abson (contraditório, segundo alguns autores).

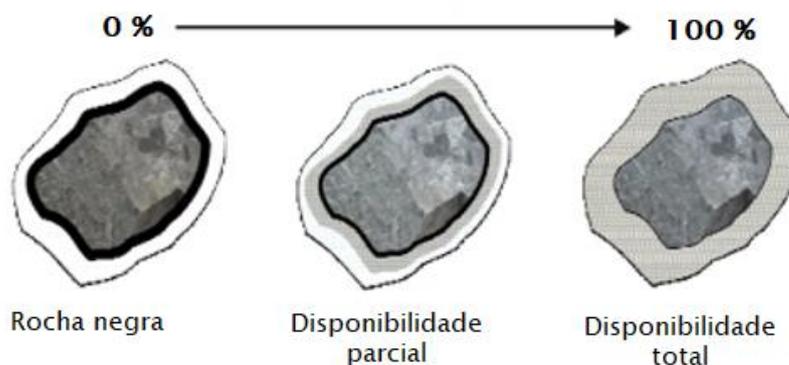
Fonte: Adaptado de Mikhailenko et al. (2019)

2.2.2 Cenários de mistura de ligante RAP com ligante virgem

Alguns estudos (MCDANIEL et al., 2000; AL-QADI et al. 2007; AL-QADI et al. 2009; KASEER et al., 2019; LO PRESTI et al., 2019) apontam a possibilidade de ocorrência de três cenários distintos de mistura, representados na Figura 7:

- rocha negra (*black rock*): quando 0% do ligante RAP está ativo, e o RAP se comporta como um agregado negro (estado inicial, rocha negra Figura 7). Se o RAP atuar como uma rocha negra, os ligantes envelhecidos e virgens não interagirão. Portanto, nesse cenário assume-se que o RAP não altera significativamente as propriedades do ligante virgem;
- disponibilidade total (*full availability*): quando 100% do ligante RAP pode ser considerado no novo projeto, ou seja, 100% do ligante RAP está disponível (estado final, Figura 7). Na prática muitos projetos presumem esse cenário, acatando que da porcentagem de ligante asfáltico virgem especificada seja subtraída a porcentagem total de ligante RAP determinada por meio do processo de extração. Segundo Shirodkar et al. (2011) considerar esse cenário pode acarretar uma produção de misturas sub-asfaltadas, resultando em prejuízos no desempenho do pavimento;
- disponibilidade parcial (*partial availability*): hipótese mais realista que se encontra entre os dois cenários extremos descritos anteriormente, pois a crença comum de que o ligante RAP está ou 0% ativo ou 100% ativo na mistura pode não acontecer (estado intermediário, na Figura 7).

Figura 7 - Ilustração dos três cenários de mesclagem



Fonte: Gaspar et al., 2019

Dois estudos importantes encontrados na literatura sobre a determinação dos conceitos de disponibilidade do ligante RAP são os de McDaniel et al. (2000) e Al-Qadi et al (2009).

McDaniel et al. (2000), no Projeto 9-12 conduzido pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), estudaram a adição de 10% e 40% de RAP em HMA para avaliar os cenários “rocha negra”, mistura total e prática real por meio de ensaios de fluência e resistência à tração em baixas temperaturas. As características de cada caso de mistura estudado por McDaniel et al. (2000) estão mostradas no Quadro 3.

Quadro 3 - Casos de misturas estudadas por McDaniel et al. (2000)

Misturas asfálticas estudadas por McDaniel et al. (2000)	Composição das misturas
Prática real	RAP adicionado com seu revestimento intacto ao agregado virgem e ao ligante virgem.
Rocha negra	Agregado RAP recuperado misturado nas proporções adequadas com o agregado virgem e o aglutinante virgem.
Mistura total	Ligante RAP extraído e recuperado, misturado posteriormente com o ligante virgem. A mistura final dos ligantes foi então combinada com o RAP e agregados virgens.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Os resultados indicaram que a diferença entre os três casos de mistura com baixos teores de RAP não foi significativa. Segundo os autores com 10% ou menos de RAP provavelmente algum grau de mistura ocorre, no entanto não há quantidade de ligante RAP suficiente para alterar significativamente as propriedades da mistura. Portanto, nenhuma consideração especial é necessária para misturas asfálticas com 10% ou menos de RAP.

Por outro lado, os efeitos nos resultados dos ensaios mencionado com adição de 40% de RAP tornaram-se expressivos, comprovando a necessidade de ajustes de projeto quando elevados teores de RAP são utilizados nas misturas asfálticas, pois nesse caso já existe uma quantidade de ligante RAP considerável para interagir com o ligante virgem.

O estudo ainda mostrou que, no geral, o caso “rocha negra” demonstrou menor rigidez e deformações mais altas do que os outros dois casos e que não houve diferenças significativas de comportamento entre a “prática real” e a “mistura total”.

McDaniel et al. (2000) afirmaram que tais resultados fornecem evidências convincentes de que o RAP não age como uma rocha negra e que não parece razoável sugerir que a mistura total do ligante RAP e do ligante virgem ocorra. A mistura parcial

aparentemente acontece em uma extensão significativa, indicando que em altos teores de RAP o ligante envelhecido deve ser contabilizado na seleção do ligante virgem. Isso apoia a necessidade de uma abordagem em camadas sobre o uso do RAP, de acordo com o teor desse material utilizado na mistura asfáltica.

Al-Qadi et al. (2009) realizaram um estudo em 2009 conduzindo testes (módulo dinâmico, suscetibilidade à umidade, análise por microscópio eletrônico de varredura e caracterização da energia de fratura) em HMA com 0%, 20% e 40% de RAP.

As HMAs foram preparadas de acordo com as especificações do IDOT e de acordo com combinações de materiais recuperados (ligante e agregados) e virgens, para avaliar o efeito da mistura ligante RAP/ligante virgem, conforme mostrado no Quadro 4. Os ligantes recuperados, virgens e misturados também foram testados usando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR, do inglês *Dynamic Shear Rheometer*).

Al-Qadi et al (2009) descobriram, por meio deste estudo, que a incorporação de até 20% de RAP na HMA não requer uma mudança no grau do ligante asfáltico virgem. No entanto, a introdução de 40% de RAP no HMA mostrou a necessidade de um aumento de grau de ligante em alta temperatura e, possivelmente, em baixa temperatura. Essa conclusão corrobora com os resultados obtidos no estudo anterior de McDaniel et al. (2000).

Quadro 4 - Casos de misturas estudados por Al-Qadi et al. (2009)

Misturas estudadas por Al-Qadi et al. (2009)	Composição das misturas
Suposição IDOT	RAP real usado com a suposição de 100% de mobilização do ligante RAP.
Suposição de "rocha negra"	Agregados recuperados e nenhum aglutinante recuperado
Suposição de 50% da mobilização do ligante RAP	Agregados recuperados e aglutinante recuperado
Suposição de "Disponibilidade total"	Agregados recuperados e aglutinante recuperado

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Com base nesse entendimento sobre a disponibilidade do ligante envelhecido e sobre a possibilidade de interação deste com o ligante virgem, dependendo do teor de RAP utilizado no projeto da mistura, McDaniel e Anderson (2001) apresentaram um manual intitulado “*Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual*”.

Nesse manual, as diretrizes recomendadas para o uso de RAP em misturas asfálticas recicladas pelo método SUPERPAVE apontam três níveis ou camadas a serem considerados pelo projetista, descritas no Quadro 5. Os limites dos níveis dependem do grau do ligante RAP, indicando quais as porcentagens de RAP que poderão ser utilizadas caso seja empregado um ligante virgem de grau mais macio.

O primeiro nível estabelece a quantidade máxima de RAP que pode ser usado sem alterar o grau de ligante virgem. Nesse caso, a adição do RAP causa um efeito desprezível e nenhuma adaptação do ligante virgem é necessária. No primeiro nível, o ligante adicionado geralmente tem o mesmo grau do ligante comumente recomendado para a área geográfica onde a mistura asfáltica será aplicada.

O segundo nível mostra a porcentagens de RAP que pode ser usada quando o grau do ligante virgem diminui em um grau (um incremento de 6 graus) em ambas as temperaturas (máxima e mínima). Por exemplo, se o ligante comumente recomendado para a área geográfica onde a mistura asfáltica será aplicada é o PG 64-22, o ligante virgem a ser adicionado deve ser da classe PG 58-28.

Segundo Davis et al. (2014) o uso de um ligante virgem com um grau mais suave do que o do ligante base são geralmente mais caros do que aqueles com graus mais duros;

O terceiro nível é para conteúdo de RAP mais altos, onde as propriedades físicas e reológicas do ligante final (envelhecido + virgem) dependerão das características de cada um dos seus componentes de forma individual e da proporção de RAP na mistura. É necessário, então, adaptar o teor de ligante adicionado de modo a compensar o endurecimento deste, resultante da combinação com o ligante envelhecido do RAP.

No terceiro nível, o grau do ligante asfáltico adicionado será determinado de modo que a mistura entre o ligante RAP e o ligante virgem resulte em um ligante final que atenda aos critérios de desempenho referentes a área geográfica de destino da mistura asfáltica. Assim, para teores elevados, é necessário extrair, recuperar e testar o ligante RAP para construir um gráfico de mistura, que será discutido posteriormente.

Quadro 5 - Diretrizes de seleção de ligante para misturas RAP

	Porcentagem de RAP		
	Grau do ligante RAP recuperado		
Grau do ligante asfáltico virgem recomendado	PG xx-22 ou mais baixo	PG xx-16	PG xx-10 ou mais alto
Nenhuma mudança na seleção do ligante	< 20%	< 15%	< 10%
Selecionar ligante virgem um grau mais macio que o normal	20 – 30%	15 – 25%	10 – 15%
Seguir as recomendações dos gráficos de mistura (blending charts)	> 30%	> 25%	> 15%

Fonte: Adaptado de McDaniel e Anderson (2001)

2.3 METODOLOGIAS DE PROJETO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Ao passar dos anos, as pesquisas têm se concentrado em aumentar a porcentagem de RAP incorporado em misturas asfálticas, apresentando resultados promissores (MCDANIEL et al. 2012; TRAN et al. 2012).

Conforme visto anteriormente, dentre as preocupações inerentes à incorporação de elevada quantidade de RAP (>30%) em misturas asfálticas, estão as incertezas na adaptação de procedimentos de projeto e a carência de uma compreensão mais aprofundada acerca dos mecanismos de interação, mistura e difusão entre o ligante RAP, ligante virgem e agentes de reciclagem, quando usados.

Uma mistura asfáltica reciclada difere da tradicional na medida em que, na sua composição, além dos agregados e do ligante asfáltico, existe um terceiro componente, o RAP de propriedades variáveis, e, em alguns casos, um agente de reciclagem.

A adequação do método de formulação de misturas asfálticas à quente exige a introdução de procedimentos adicionais que refletem a influência das propriedades do RAP e de seus componentes nas características e no desempenho do produto final.

Na maioria dos métodos de formulação de misturas asfálticas recicladas à quente, a seleção do tipo de ligante virgem e/ou agente de reciclagem depende da taxa de reciclagem, das características do ligante RAP e das propriedades desejadas para o ligante final ou ligante regenerado (ligante RAP + ligante virgem e/ou rejuvenescedores) como forma de garantir desempenho satisfatório da mistura asfáltica reciclada final.

Nessa vertente, alguns países desenvolveram seus próprios modelos de mistura, por meio de equações ou gráficos de misturas (*blending charts*) visando uma padronização para a

adequação do ligante final e/ou para a escolha da taxa de reciclagem. Os países europeus e o Japão utilizam propriedades empíricas, os primeiros penetração e ponto de amolecimento e o segundo penetração. Os Estados Unidos usam propriedades relacionadas à viscosidade (método do *Asphalt Institute*) e ao desempenho por meio da avaliação das temperaturas do PG (método SUPERPAVE) e a Austrália tem desenvolvido método baseado na viscosidade complexa. A seguir, será apresentado uma descrição dos modelos adotados nos Estados Unidos, sendo o segundo modelo usado na metodologia dessa pesquisa.

Nos Estados Unidos são utilizadas duas principais metodologias de formulação de misturas asfálticas recicladas. A primeira foi desenvolvida pelo *Asphalt Institute* (1986), sendo a obtenção da porcentagem ótima de ligante determinada pelos métodos Marshall ou Hveem. A segunda metodologia é uma adaptação do método SUPERPAVE ao estudo das misturas asfálticas recicladas

2.3.1 Método do Asphalt Institute

O método do Asphalt Institute sugere que abaixo de 15% de RAP (algumas agências rodoviárias consideram 20% ao invés de 15%) nenhuma mudança no grau do ligante seja realizada sendo, portanto, dispensável a avaliação da viscosidade do ligante RAP.

Para taxas de reciclagem elevadas, de posse da viscosidade do ligante RAP, pode-se estimar a viscosidade alvo exigida ao ligante novo que será incorporado à mistura asfáltica reciclada utilizando o gráfico de mistura que traduz o previsto na norma ASTM D 4887 (2016). Esse ábaco corresponde a representação gráfica da Equação 1, com os valores de viscosidade multiplicados por 100, de maneira a ser válida para valores baixos de viscosidade (Pa.s):

$$\log[\log(100Visc_R)] = TR_b \cdot \log[\log(100Visc_{RAP})] + (1 - TR_b) \cdot \log[\log(100Visc_N)] \text{ Eq. 1}$$

2.3.2 Método SUPERPAVE

O padrão atual para projetos de misturas asfálticas pelo método *Superior Performance Pavements* (SUPERPAVE) é AASHTO M323 (2017) e a especificação afiliada AASHTO R35 (2017).

O método SUPERPAVE permite a estimativa do desempenho de qualquer tipo de mistura asfáltica (virgem ou reciclada, graduação densa ou aberta, modificada ou não modificada por polímeros), controla a deformação permanente e as trincas por fadiga e quantifica os efeitos do envelhecimento, da susceptibilidade à umidade e da perda de adesão. As especificações são baseadas, principalmente, em propriedades fundamentais de engenharia, que se relacionam diretamente com o desempenho do pavimento quando submetido a condições adversas de tráfego e clima (BRINGEL, 2007).

A AASHTO M 323 inclui orientação sobre o uso de RAP nas misturas asfálticas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, onde a maior parte das instruções são baseadas no Projeto 9-12 da NCHRP e no seu respectivo relatório.

As diretrizes do método SUPERPAVE indicam que as misturas asfálticas contendo RAP sejam projetadas seguindo os mesmos requisitos adotados em projetos de misturas asfálticas convencionais, que contemplam, entre outras, especificações baseadas no desempenho do ligante asfáltico.

A seleção do ligante novo é dividido em três níveis, conforme mostrado anteriormente no Quadro 5 e a fase de caracterização dos materiais permanece com as mesmas exigências do método anterior, somadas a necessidade da avaliação das propriedades do ligante recuperado, quando se trabalha na terceira camada.

No caso do terceiro nível deve-se proceder com as recomendações SUPERPAVE de caracterização do ligante recuperado, conforme esquema-resumo mostrado na Figura 8.

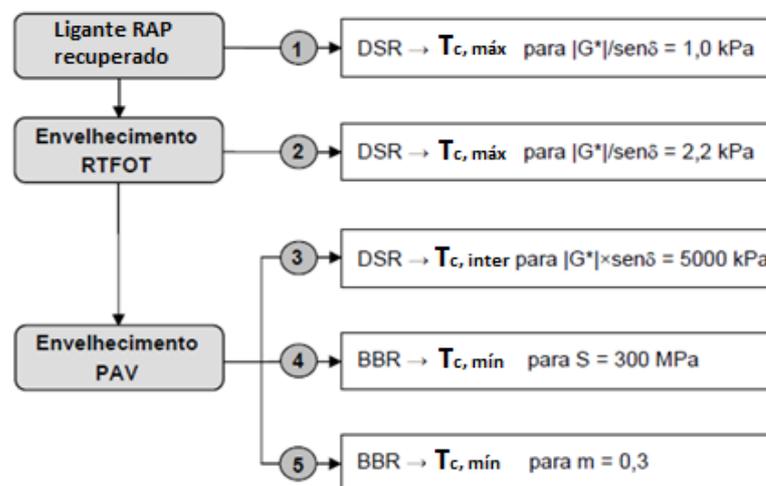
De acordo com o esquema, o ligante RAP deve ser testado no reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer - DSR*) em alta temperatura, como se fosse um ligante virgem não envelhecido. Em seguida, o ligante RAP é envelhecido no forno de filme fino rotativo (*Rolling Thin Film Oven - RTFO*) e é testado no DSR. O ligante RAP restante é, então, envelhecido no vaso de envelhecimento sob pressão (*Pressure Aging Vessel - PAV*) e testado no DSR e no reômetro de fluência em viga (*Bending Beam Rheometer - BBR*). Essa caracterização é necessária para a determinação das temperaturas críticas do ligante RAP, que são dados de entrada nos gráficos de mistura para a escolha do grau do ligante virgem ou porcentagem de RAP adequado para a mistura asfáltica reciclada.

A sequência usada para a determinação das temperaturas críticas máxima ($T_{c, \text{máx}}$), mínima ($T_{c, \text{mín}}$) e intermediária ($T_{c, \text{interm}}$) do ligante RAP será apresentado a seguir:

- 1- Determinar $T_{c, \text{máx}}$, com base nos valores DSR do ligante RAP onde $G^*/\sin \delta = 1,00$ kPa;

- 2- Envelhecer o ligante RAP no RTFO e determinar a $T_{c, \text{máx}}$ com base nos valores DSR desse ligante onde $G^*/\sin \delta = 2,20 \text{ kPa}$;
 - a. A menor das duas temperaturas obtidas em (1) e (2), é a designada temperatura de serviço alta do grau de desempenho do ligante RAP.
- 3- Determinar $T_{c, \text{inter}}$, com base nos valores DSR do ligante RAP envelhecido no RTFO e no PAV onde $G^*\sin \delta = 5000 \text{ kPa}$;
- 4- Determinar $T_{c, \text{mín}}$, com base nos valores BBR do ligante RAP envelhecido no RTFO e no PAV onde $S = 300 \text{ MPa}$;
- 5- Determinar $T_{c, \text{mín}}$, com base nos valores BBR do ligante RAP envelhecido no RTFO e no PAV onde a taxa de variação (m) é igual a 0,3;
 - a. A maior das duas temperaturas obtidas em (4) e (5), é a designada temperatura de serviço baixa do grau de desempenho do ligante RAP.

Figura 8 - Esquema seguido na caracterização de ligante recuperado do RAP pela metodologia SUPERPAVE



Fonte: Adaptado de Baptista, 2006

Obtidas as três temperaturas críticas (máxima, mínima e intermediária), existem duas metodologias para avaliar a escolha do grau do ligante virgem ou porcentagem de RAP a serem usados: Método A, quando é conhecida a taxa de reciclagem e pretende-se determinar o grau do ligante virgem (desconhecido); Método B, quando o tipo de ligante novo é conhecido e pretende-se determinar a taxa de reciclagem limite.

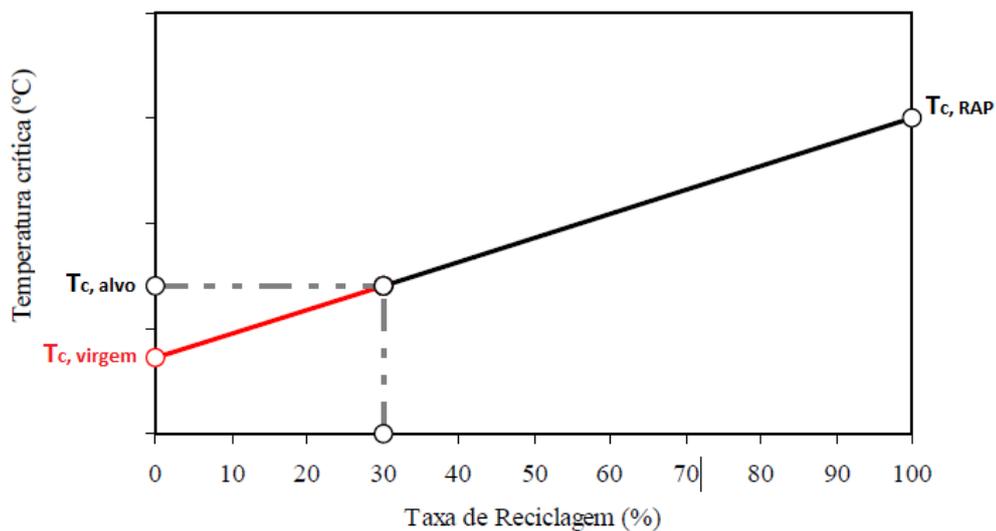
- Método A

O método A é aplicado no caso em que sabe-se aproximadamente a quantidade de RAP desejada para a mistura asfáltica reciclada. Segundo McDaniel e Anderson (2001) esse método pode ser usado nas ocasiões em que a graduação ou propriedades de mistura asfáltica reciclada final limita a quantidade de RAP ou em situações onde existem especificação que controlam quanto de RAP poderá ser utilizado.

Procede-se, então, escolhendo um teor de RAP e determinando qual o grau do ligante virgem necessário para misturar com o RAP, de forma a obter um determinado grau (grau de desempenho alvo) para o ligante asfáltico final (ligante RAP+ligante virgem). Se o grau de desempenho alvo, a porcentagem de RAP e as propriedades do ligante RAP recuperado são informações conhecidas, então o grau do ligante asfáltico virgem apropriado pode ser determinado usando a Equação 2, ou graficamente conforme mostrado na Figura 9 :

$$T_{c,virgem} = \frac{T_{c,alvo} - (TR \cdot T_{c,RAP})}{(1-TR)} \quad \text{Eq. 2}$$

Figura 9 - Gráfico de mistura pelo método A - SUPERPAVE



Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Onde:

$T_{c,virgem}$ - temperatura crítica do ligante asfáltico virgem;

$T_{c,alvo}$ - temperatura crítica alvo do ligante asfáltico final (ligante RAP+ligante novo);

TR – taxa de reciclagem ou porcentagem de RAP na mistura asfáltica reciclada;

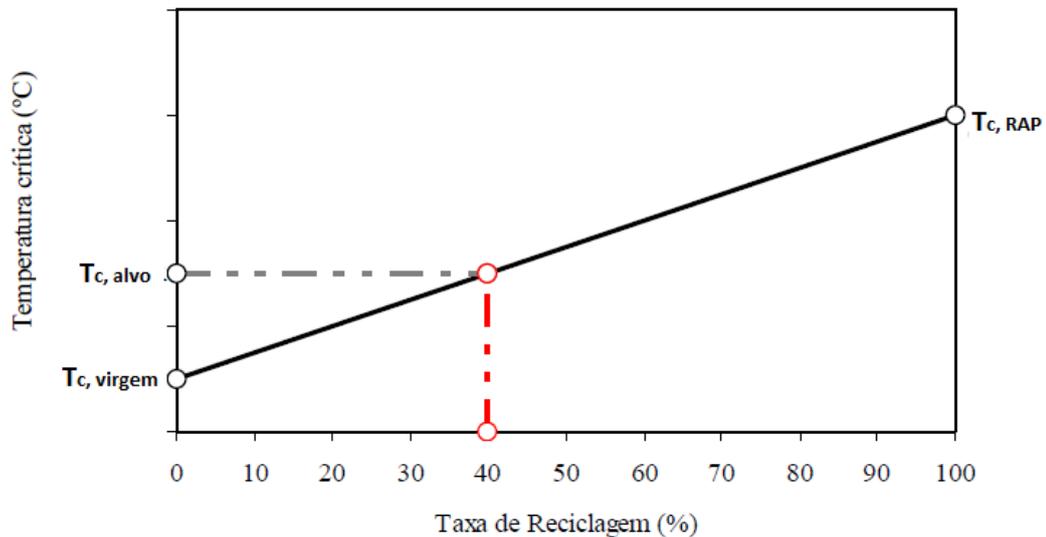
$T_{c,RAP}$ - temperatura crítica do ligante RAP recuperado.

- Método B

O método B é aplicado no caso em que o PG do ligante final, o PG do ligante virgem e as propriedades do RAP recuperadas são conhecidos e deseja-se determinar a taxa de reciclagem. Nesse método, aplica-se a Equação 3 ou o gráfico de misturas mostrado na Figura 10, inserindo como dados de entrada as temperaturas críticas máximas, intermediárias e mínimas, separadamente, para a obtenção da porcentagem de RAP necessária para satisfazer as premissas da mistura asfáltica reciclada.

$$TR = \frac{T_{c,alvo} - T_{c,virgem}}{T_{c,RAP} - T_{c,virgem}} \quad \text{Eq. 3}$$

Figura 10 - Gráfico de mistura pelo método B - SUPERPAVE



Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Ressalta-se que, em ambos os métodos, as temperaturas críticas para o ligante final devem obedecer ao preconizado na classificação segundo a graduação PG prevista na ASTM D6373 (2016), sendo feitas as considerações mostradas nas Equações 4, 5 e 6 para cada uma das temperaturas.

$$T_{c,máx} = T_x \quad \text{Eq. 4}$$

$$T_{c,inter} = \frac{T_x + T_y}{2} + 4 \quad Eq.5$$

$$T_{c,min} = T_y - 10 \quad Eq.6$$

Embora no Brasil não se utilize a classificação PG, o clima brasileiro possui características tropicais, porém com grandes variações, em virtude da extensão territorial do país. Assim, o critério utilizado para a escolha do ligante deve ser avaliado conforme a região em que irá empregar o material. Além disso, a frequência e a magnitude das cargas previstas de tráfego também devem ser consideradas (SUZUKI, 2019).

2.4 FENÔMENOS DE MISTURA DO LIGANTE RAP

Quando o RAP é incorporado na fabricação de misturas asfálticas, uma porção do ligante asfáltico envelhecido que envolve os agregados RAP pode ser considerada como parcela do teor de ligante de projeto.

Segundo Lo Presti et al. (2019), nas práticas de projeto de mistura asfáltica reciclada, essa quantidade é considerada como uma porcentagem do ligante RAP por peso, em relação ao total de ligante por peso na mistura asfáltica. No entanto, a precisão da estimativa da quantidade de ligante RAP, que contribuirá como aglutinante na mistura asfáltica final, ainda levanta questionamentos, devido ao seu efeito no desempenho da mistura. De fato, apesar das práticas atuais permitirem uma avaliação do teor de ligante RAP, por meio da extração e recuperação, ainda não está claro quanto desse ligante disponível realmente contribuirá para as propriedades das misturas asfálticas que incorporam o RAP.

A quantidade de ligante RAP ativado, o grau de disponibilidade do ligante RAP e o grau de mistura do ligante RAP com ligantes virgens e/ou agentes de reciclagem foram, por muito tempo, usados de forma intercambiável. Lo Presti et al. (2019) desenvolveram um estudo para fornecer à comunidade científica as definições desses parâmetros de mistura.

O grau de atividade (DoA) é a quantidade mínima de ligante RAP ativo que um projetista pode considerar em um processo de fabricação de mistura asfáltica reciclada.

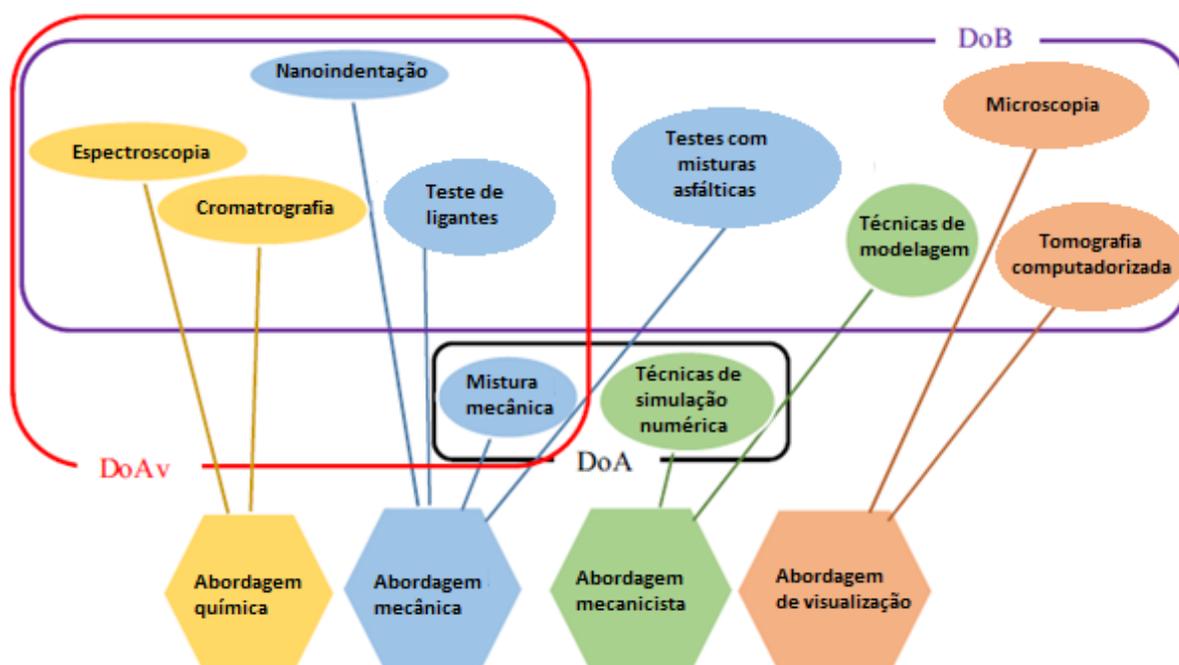
O grau de disponibilidade (DoAv) é a quantidade mínima de ligante RAP ativo numa mistura reciclada contendo algum agente de reciclagem, considerando que o ligante disponível será formado não apenas pelo ligante RAP ativo durante o processo de fabricação e pela quantidade residual do agente de reciclagem, mas também pelo ligante ativado sob a influência do agente de reciclagem.

O grau de mistura entre o ligante RAP e o agente de reciclagem (DoB) é um indicador que descreve em que medida o ligante RAP contribui nas propriedades finais do ligante final da mistura asfáltica reciclada.

Os métodos de investigação para determinação dos fenômenos de mistura (DoA, DoAv e DoB) de estudos anteriores são agrupados em quatro macro áreas relacionadas à sua abordagem, conforme mostrado na Figura 11 (OREŠKOVIC' et al.2019).

Segundo esse resumo ilustrativo, o DoA pode ser determinado por meio de abordagens mecânicas e mecanicistas, usando as técnicas de mistura mecânica e técnicas de simulação numérica, respectivamente. Já o DoAv pode ser determinado por abordagens químicas, usando as técnicas de espectroscopia e/ou cromatografia, e por abordagens mecânicas, usando técnica de nanoindentação, teste de ligantes e mistura mecânica.

Figura 11 - Metodologias usadas para a determinação do DoA, DoAv e DoB



Fonte: Adaptado de Oreškovic' et al. (2019)

O método de mistura mecânica tem sido utilizado por vários autores (HUANG et al., 2005; SHIRODKAR et al., 2011; RINALDINI et al., 2014; GOTTUMUKKALA et al. (2018); KASEER et al., 2019, PIRES, 2018) para a determinação do DoA e DoAv. Esse método consiste numa mistura de uma fração de RAP de granulometria intermediária ou fina com uma fração de agregados virgens de granulometria grossa, ou então o contrário, com ou sem adição de agentes de reciclagem e/ou ligante virgem, por um determinado período de

tempo sob certas condições. Em seguida, as frações são novamente separadas, usando a peneira que demarca o limite entre elas.

Quando o método de mistura mecânica envolve um procedimento onde as partículas finas de RAP são misturadas com partículas grossas de agregado virgem, ou então o contrário, é denominado estudo de revestimento. Quando esse mesmo procedimento envolve a utilização de agente de reciclagem, é chamado de estudo de mistura. No primeiro determina-se o DoA e no segundo o DoAv.

Rinaldini et al. (2014) conduziu um estudo de revestimento utilizando 50% de partículas finas do RAP (2/4mm), 50% de partículas grossas de agregados virgens (2/11mm). Após a mistura, o ligante de cada fração foi recuperado e verificou-se pouca mobilização do ligante RAP. Os resultados obtidos no reômetro de cisalhamento dinâmico apontaram para a ocorrência de mobilização do ligante RAP, mesmo que não homogênea, mas não indicaram necessariamente a mistura entre os dois ligantes.

Kaseer et al. (2019) realizaram um estudo de revestimento comparando duas misturas compostas de frações granulométricas grossa, fina e intermediária. A primeira mistura seria formada de agregados totalmente virgens e a segunda teria sua fração intermediária (passante na peneira 3/8" e retido na peneira nº 4) constituída de agregados RAP. O teor de ligante total das duas misturas eram iguais, sendo o teor de ligante adicionado na segunda mistura igual ao valor complementar do ligante presente na fração de RAP.

Segundo a metodologia de Kaseer et al. (2019), caso não houvesse diferença entre os teores de ligante de ambas as frações intermediárias, após peneiramento e extração consecutivos às misturas, o DoAv seria considerado igual a 100%. O DoAv variou de 39,1% a 91,9% em diferentes condições de envelhecimento das misturas, e foi menor para a condição de envelhecimento mais severa.

Outros fatores tais como temperatura da mistura, tempo de condicionamento e adição de agente de reciclagem foram avaliados. Kaseer et al. (2019) concluíram que temperaturas maiores, períodos de condicionamento mais prolongados e adição de agente de reciclagem conduzem a valores de DoAv maiores.

Pires (2018) propôs a determinação do grau relativo de ativação do ligante RAP (DoA'), já que não mediu o grau de atividade propriamente dito, mas estimou esse grau por meio de uma relação de resultados de ensaios mecânicos. Esse parâmetro está sendo tratado atualmente no Rilem TG 5 ("DoA" - *Degree of binder Activity*).

No seu estudo, o autor utilizou uma relação de resultados de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova Marshall, contendo somente o RAP, condicionados em temperaturas diferentes. Segundo o autor, o DoA' é sinônimo dos efeitos relacionados ao teor de ligante, uma vez que o processo de ativação do ligante RAP produz porções de ligantes ativos e inativos.

Pires (2018) aponta que há uma redução na resistência à tração das misturas asfálticas com 100% de RAP à medida que a quantidade de ligante ativo é menor e que esse comportamento é semelhante às misturas asfálticas convencionais com teor de ligante asfáltico abaixo do teor ótimo determinado na dosagem. Portanto, ambos os efeitos (menor grau de atividade do ligante e menor teor do ligante em relação ao teor ótimo) resultariam numa redução do parâmetro de resistência à tração.

A proposta metodológica de Pires (2018) para o cálculo do DoA', refinada pelas propostas do Rilem TG 5, tem sido bem aceita no meio acadêmico, devido principalmente a sua simplicidade e resultados satisfatórios.

2.5 PRINCIPAIS MÉTODOS USADOS PARA ELEVAR A TAXA DE RECICLAGEM EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A elevada rigidez e viscosidade do ligante RAP, devido alterações nas suas proporções de asfaltenos e maltenos por causa do envelhecimento a curto e longo prazo sofrido durante a usinagem, compactação e por toda a vida útil do pavimento, faz com que as misturas asfálticas com alto teor de RAP sejam mais suscetíveis a danos, como fadiga e trincas térmicas do que misturas com ligantes virgens.

Loise et al. (2019) explicam que a descrição de ordem zero do envelhecimento do ligante asfáltico é dada em termos de um mecanismo geral, onde parte do meio malteno (frações mais leves) é transformado na fase de asfalteno (moléculas pesadas), resultando em maiores teores de asfaltenos e menores teores de maltenos. Isso leva a uma maior viscosidade e menor ductilidade, devido às interações polar-polares mais fortes entre asfaltenos.

No entanto, Karlsson e Isacsson (2006), Zubaran (2014) e Loise et al. (2019) salientam que o envelhecimento é um processo mais complexo que envolve diversos sub-mecanismos, geralmente ocorrendo em diferentes escalas de tempo, a curto e longo prazo.

A curto prazo, o envelhecimento pode ocorrer durante a construção do pavimento asfáltico, por meio da volatilização de componentes leves do malteno. Durante a mistura, o

ligante asfáltico é exposto ao fluxo de ar quente num intervalo de 135 a 163°C, resultando em aumento de viscosidade que é associada a propriedades reológicas e físico-químicas, como módulo complexo e adesividade.

A longo prazo, o envelhecimento ocorre no campo como consequência de diferentes processos:

- oxidante: mudanças na composição, por meio de uma reação entre os constituintes do ligante e o oxigênio atmosférico, alterando a composição química dos ligantes;
- evaporativo: evaporação de componentes de baixo peso molecular do malteno, que têm maior pressão de vapor e são de alguma forma voláteis, podendo escapar da fase malteno causando não apenas uma mudança em sua composição, mas também uma redução geral de sua quantidade no ligante asfáltico. A sensibilidade à evaporação difere entre ligantes e pode ser reduzido minimizando a quantidade de componentes mais voláteis;
- sinerése: devido a exsudação de componentes finos do óleo. Esse mecanismo é influenciado pela química do ligante asfáltico, bem como pela porosidade do agregado;
- separação: por meio da remoção de componentes oleosos, resinas e asfaltenos pela absorção de agregados;
- envelhecimento estrutural: por meio de reações químicas entre componentes moleculares, causando polimerização com conseqüente formação de uma estrutura dentro do ligante asfáltico, (tixotropia, quando o colóide muda sua viscosidade).

Essas propriedades alteradas do ligante presente no RAP – pronunciado principalmente pelo aumento do ponto de amolecimento, da viscosidade e do parâmetro $G^* \sin \delta$ e diminuição da penetração – devido a todos esses fatores expostos têm limitado o aumento dos valores da taxa de reciclagem. Isso porque para quantidades elevadas não basta apenas reaquecer o RAP juntamente ou separadamente aos outros componentes sólidos na usinagem da mistura asfáltica reciclada, devido à natureza irreversível das reações químicas que causam o envelhecimento, principalmente a reticulação química induzida pela radiação ultravioleta e oxidativa (NAHAR et al., 2014; ZUBARAN, 2014).

Ao longo dos anos, diversos artifícios têm sido estudados e desenvolvidos no intuito de elevar a quantidade de RAP na composição das misturas asfálticas, sendo os principais deles:

- uso de ligante asfáltico mais macio;

- adição de agentes de reciclagem (agentes “amolecedores” ou rejuvenescedores”);
- uso de tecnologias WMA;
- utilização de bioligantes.

2.5.1 Uso de ligante asfáltico mais mole

O uso de ligante asfáltico mais mole é a técnica comumente obrigatória em alguns países quando se utiliza acima de 15% de RAP.

West et al. (2012) desenvolveram uma pesquisa pelo *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) com o monitoramento contínuo de trechos experimentais com alto teor de RAP e concluíram que o uso de um ligante virgem mais macio melhora a resistência ao trincamento e à desagregação superficial da mistura.

O estudo laboratorial de Willis et al. (2012), desenvolvido para avaliar se o uso de um ligante mais mole ajuda a melhorar a durabilidade das misturas asfálticas que continham altas porcentagens de RAP, corroborou com a pesquisa de campo de West et al. (2012).

No estudo de Willis et al. (2012) foram criadas misturas de ligantes virgens (PG 67-22 e um mais macio PG 58-28) e ligantes RAP extraído, onde as quantidades de cada ligante correspondiam as mesmas determinadas nos projetos das misturas asfálticas contendo 25% e 50% de RAP. Para a determinação do teor de ligante de projeto, considerou-se uma contribuição de todo o ligante presente no RAP.

Por meio do teste de varredura de amplitude linear (*Linear Amplitude Sweep – LAS*) os autores concluíram que a adição de um ligante asfáltico virgem mais mole ao ligante RAP, nos dois casos de mistura, proporcionou um aumento da vida de fadiga, bem como aumenta a energia de fratura, que é derivada da curva de deslocamento de carga para avaliar o potencial de fissuração geral da mistura de asfalto sob várias condições de carregamento.

Al-Qadi et al. (2012) investigaram os efeitos da redução simples (PG 58-22) e dupla (PG 58-28) do grau de desempenho do ligante asfáltico virgem sobre o desempenho de HMAs com alto teor de RAP (30 40 e 50%), em comparação com uma mistura de controle onde foi usado o ligante virgem PG 64-22. A redução simples corresponde a uma redução de grau da temperatura máxima, enquanto a redução dupla corresponde a uma redução de grau tanto no limite de temperatura superior quanto no inferior.

No geral, os autores concluíram que a redução simples e dupla do PG do ligante asfáltico virgem proporcionaram efeitos positivos significativos na HMA com 30% de RAP.

Para HMA com 40% e 50% de RAP, com o aumento da contribuição do ligante RAP, o efeito da redução de PG tornou-se menos pronunciado.

No entanto, Mogawer et al. (2012) alertam que os efeitos positivos da utilização de ligantes asfálticos mais moles nas misturas asfálticas recicladas podem ser anulados pelas condições de temperaturas de produção e pelos fatores de armazenamento, que influenciam fortemente na rigidez e nas propriedades de resistência ao trincamento.

2.5.2 Uso de agentes de reciclagem

Geralmente são usados os termos genéricos “rejuvenescedor” ou “agentes rejuvenescedor” para se referir a qualquer um dos agentes de reciclagem usados para adequar ou restaurar as propriedades do ligante asfáltico RAP a um nível comparável ao de um ligante asfáltico virgem. No entanto, nem todos os agentes de reciclagem são eficazes no rejuvenescimento do ligante asfáltico envelhecido (AKENTUNA et al. 2020).

Brown et al. (2009) e Lo Presti et al. (2019) definem agentes de reciclagem como a família de aditivos que são incorporados no processo de fabricação das misturas asfálticas recicladas com duas finalidades:

- agentes “amolecedores”, “lubrificantes” ou de fluxo (*softening or fluxing agents*): tornam o ligante asfáltico envelhecido mais dúctil e menos viscoso/ quebradiço, simplesmente fornecendo componentes oleosos ao malteno sem restaurar a estrutura complexa original (estruturas hierárquicas dos asfaltenos). Facilitam o processo de produção da mistura asfáltica reciclada, permitindo temperaturas de fabricação mais baixas e, portanto, maior conteúdo de RAP;
- agentes rejuvenescedores (*rejuvenating agents*): são usados para restaurar as propriedades físicas e químicas de ligantes asfálticos envelhecidos, repondo os componentes químicos voláteis que foram perdidos. Segundo Akentuna et al. (2020) o desempenho das misturas asfálticas contendo RAP e agente rejuvenescedor depende da extensão em que os rejuvenescedores podem se difundir na fina película envelhecida de ligante em torno dos agregados RAP e restaurar as suas propriedades.

De acordo com Karlsson e Isacsson (2006), os agentes amolecedores podem ser:

- *Asphalt flux oils*, geralmente misturados com o ligante para reduzir a viscosidade;

- *Lube stock*, uma fração do óleo cru que possui viscosidade semelhante aos óleos

lubrificantes;

- Óleo lubrificante ou de motor, geralmente altamente alifático;
- Oleo de lama, resíduo do processo de craqueamento catalítico.

Segundo Loise et al. (2019) os rejuvenescedores geralmente são baseados em óleos: extratos de óleos lubrificantes e óleos extensores. Eles contêm uma quantidade adequada de constituintes de malteno, frações naftênicas ou polares aromáticas, que reequilibram a composição do ligante envelhecido em favor de tais compostos ou daqueles geralmente perdidos durante a construção e vida útil.

O rejuvenescedor deve cumprir dois requisitos: devem ter alta proporção de aromáticos, necessários para manter os asfaltenos dispersos; devem conter baixo teor de saturados, altamente incompatíveis com os asfaltenos.

Quanto à dosagem do agente de reciclagem compatível, Carrión e Airey (2015) alerta para os cuidados de se evitar que um aumento na suscetibilidade à deformação da mistura asfáltica e para garantir a longevidade do pavimento.

Baptista (2006) explica que, em termos de deformabilidade, o excesso de agente de reciclagem poderá acarretará, em princípio, uma diminuição do módulo de deformabilidade e um pior comportamento frente à deformação permanente, agravado pela diminuição da rigidez da mistura. Por outro lado, em termos de fadiga acontecerá o inverso, porque a diminuição da rigidez provoca, normalmente, um efeito duplo em termos de melhoria do comportamento à fadiga.

Quanto aos materiais utilizados como agentes de reciclagem, por causa da demanda por preço baixo, disponibilidade e reaproveitamento, diversos resíduos têm se tornado fortes candidatos. Segundo Nahar et al. (2014) muitos tipos foram relatados na literatura, tais como: óleo usado de motor sebo refinado, óleo vegetal residual, óleo de fritura residual, óleos básicos (parafínicos), óleos de motor usados, aminas terciárias e assim por diante.

2.5.3 Uso de tecnologia WMA

Os ligantes asfálticos, independentemente de serem modificados ou não, são materiais viscoelásticos de comportamento influenciado pela temperatura, tensão, tempo de carregamento e envelhecimento. Em condições ambientais apresentam comportamento viscoelástico, sob baixa temperatura ou alta frequência de carregamento podem se comportar como sólido elástico e sob alta temperatura ou baixa frequência de carregamento se comportam como um líquido viscoso.

Diante dessas características intrínsecas, a mistura de agregados minerais com o ligante asfáltico é possível por meio da aplicação de técnicas de aquecimento controlado, que permitem o surgimento de forças adesivas e coesivas entre esses materiais, proporcionando um produto com alto desempenho mecânico.

No entanto, a produção de misturas asfálticas à quente envolve o consumo de energia e gera problemas ambientais e de saúde no trabalho relacionados a emissões de vapores poluentes e altamente tóxicos. Por esses motivos, tem-se buscado a utilização de técnicas inovadoras na produção de misturas asfálticas com vista à redução das temperaturas operacionais e, conseqüentemente, diminuição da emissão de gases nocivos, sem afetar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais.

Essas novas técnicas, geralmente denominadas tecnologias de misturas asfálticas mornas (*warm mix asphalt* – WMA), implementam metodologias e materiais para reduzir as temperaturas de usinagem e compactação (em torno de 30 a 50°C) das misturas asfálticas diversas, incluindo as densas, *stone matrix asphalt* (SMA), porosas, recicladas entre outras. Os benefícios ambientais e de construção associados ao uso de tecnologias WMA incluem (D'ANGELO et al., 2008; PROWELL et al., 2012; WILLIAMS et al., 2019):

- reduções do consumo de combustível, de energia e das emissões atmosféricas;
- exposição reduzida do trabalhador a fumos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos;
- capacidade de estender a temporada de pavimentação para os meses mais frios;
- possibilidade de transportar materiais por distâncias maiores;
- melhoria na compactação em temperaturas mais baixas;
- possibilidade do uso porcentagens mais altas de RAP;
- minimização dos custos de construção.

Segundo Wozzuk e Franus, (2017) o rápido desenvolvimento das técnicas WMA ocorreu após 1996, quando a União Europeia introduziu obrigações legais limitando a emissão de fumos e aerossóis criados nas etapas de produção e compactação. Por outro lado, as primeiras tentativas de diminuir as temperaturas das misturas asfálticas incluem a utilização de espuma de asfalto com água, o que foi feito pela primeira vez em 1956 nos EUA por Csanyi et al. (1957), que injetaram vapor no ligante asfáltico criando um efeito espumante.

Ainda em 1995, com a atenção voltada para a criação do Protocolo de Kyoto, acordo concebido entre países integrantes da Organização das Nações Unidas (ONU) objetivando a redução da emissão de gases do efeito estufa e o conseqüente aquecimento global, a

Alemanha realizou o primeiro teste com a adição de zeólita sintética, no caso registrado com a marca Aspha-Min® (PROWELL et al., 2012).

De acordo com Bohn et al. (2020) no intuito de tornar os pavimentos mais sustentáveis, uniu-se as tecnologias das misturas mornas à capacidade de inserção de maiores taxas de RAP, dando origem às misturas asfálticas recicladas mornas, sendo uma das grandes áreas de estudo do ramo rodoviário nos últimos anos.

Segundo Prowell et al. (2012) misturas asfálticas que incorporam altas porcentagens de RAP são conhecidos por serem rígidas e bastante difícil de compactar. Essa dificuldade de compactação pode levar a menores densidades no local e à possibilidade de penalidades para o empreiteiro, o que pode levá-los a aumentar as temperaturas para garantir a compactação adequada. No entanto, mesmo atingindo a densidade apropriada no local, esse esforço de aumento de temperatura poderá causar quebras nos agregados e tornar o pavimento mais rígido. De acordo com os autores, o uso de tecnologias WMA para proporcionar temperaturas de produção “típicas” ajudará na compactação dessas misturas mais rígidas.

Em segundo lugar, os autores ainda salientam que a diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico das misturas recicladas, resultante das temperaturas de produção mais baixas, pode ajudar a rejuvenescer o ligante RAP, particularmente no que diz respeito ao trincamento em baixa temperatura. Além disso, com a típica redução de temperatura de aproximadamente 28 ° C, a temperatura mínima do PG é melhorada em aproximadamente 0,6 ° C, permitindo que um adicional de 10% de RAP possa ser usado (do ponto de vista do grau do ligante) sem ter que mudar o PG do ligante virgem (BONAQUIST, 2011).

Pesquisas internacionais (MALLICK et al., 2008; TAO e MALLICK, 2009; HILL et al., 2013; VIDAL et al., 2013; SENGOZ et al., 2016; XIAO et al., 2016; SONG et al., 2018; SANCHEZ-ALONZO et al., 2020) e, especificamente, no Brasil (OLIVEIRA, 2013; ZUBARAN, 2014; GENNESSEAU, 2015) têm demonstrado que o uso de tecnologias WMA em misturas asfálticas recicladas com elevado teor de RAP possibilitou resultados satisfatórios, tais como:

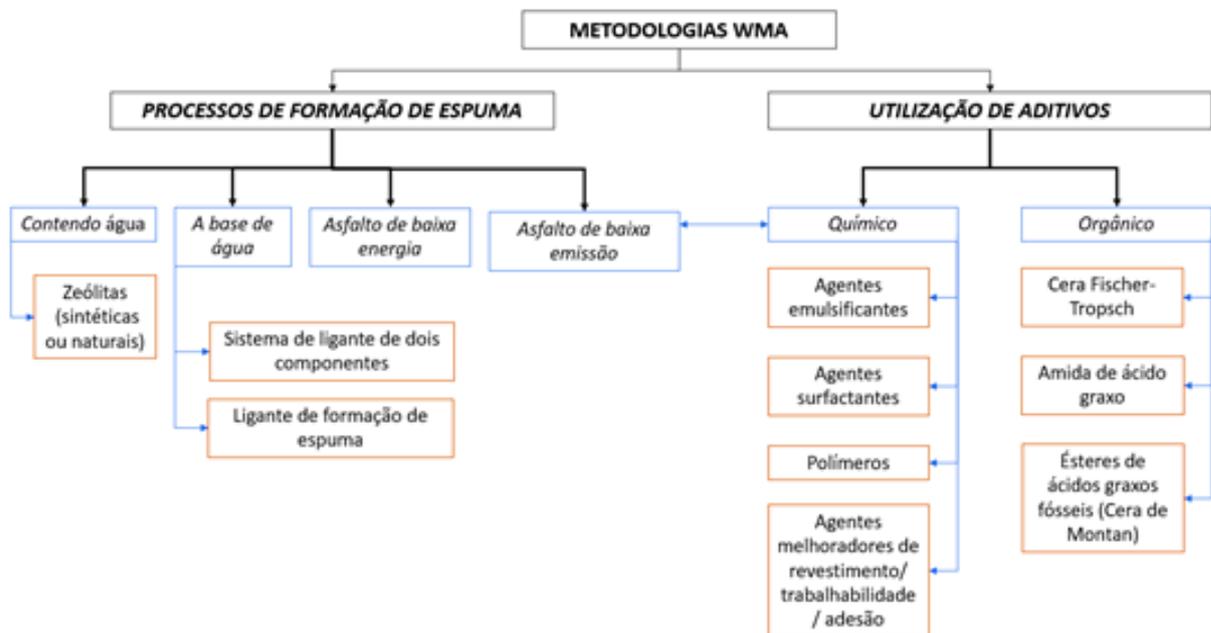
- vazios de ar semelhantes às misturas asfálticas virgens em temperaturas mais baixas;
- maior resistência ao trincamento;
- melhoria na trabalhabilidade, inclusive em situações em que foi utilizado 100% de RAP;
- aumento da estabilidade e da resistência à deformação permanente;
- atendimento das propriedades volumétricas;

- melhoria da resistência à umidade e ao trincamento;
- melhoria na trabalhabilidade e no revestimento dos agregados;
- economia de recursos naturais e energéticos;
- desempenho semelhante às misturas asfálticas convencionais.

2.5.3.0.1 Tipos de tecnologia WMA

As tecnologias WMA são frequentemente classificadas pela metodologia usada para a redução das temperaturas de produção e melhoria da trabalhabilidade da mistura asfáltica. Segundo D'Angelo et al. (2008), Prowell et al. (2012) e Vaiana et al. (2013) as metodologias para a produção de WMA são comumente aquelas que usam aditivos orgânicos ou químicos, sendo esse último geralmente líquido e processos de formação de espuma. Algumas tecnologias se enquadram em mais de uma categoria. A Figura 12 mostra um esquema com as principais tecnologias de misturas mornas, classificadas de acordo com o tipo de metodologia.

Figura 12 - Metodologias para a produção de misturas asfálticas mornas



Fonte: Elaborada pela autora (2022)

- Processos de formação de espuma

Esses processos introduzem pequenas quantidades de água no asfalto quente, seja por meio da injeção direta usando bico de espuma, ou por meio da utilização de agregados úmidos

ou enchimento mineral, a exemplo da zeólita sintética ou natural. Segundo Prowell et al. (2012) a funcionalidade dessa metodologia se baseia no fato de que quando um determinado volume de água se transforma em vapor à pressão atmosférica, ele se expande por um fator de aproximadamente 1,7.

No caso das zeólitas, um vapor de água muito fino é formado quando esse material é adicionado ao ligante aquecido. Com o aquecimento, a zeólita libera água que se dispersa no asfalto quente e se transforma em vapor, resultando numa expansão da fase ligante e na formação de uma espuma no asfalto, facilitando o revestimento dos agregados (TAO e MALLICK, 2009). As zeólitas criam um efeito controlado de expansão, reduzindo a viscosidade do ligante, garantindo a trabalhabilidade da mistura por um período de 6 a 7 horas.

Entretanto, Tao e Mallick (2009) salientam que em concentrações mais elevadas o vapor de água e a expansão do volume podem ser excessivos, dificultando a compactação, especialmente em misturas asfálticas com alto teor de RAP.

Prowell et al. (2012) explicam que nos processos de formação de espuma, a expansão da fase ligante corresponde a aproximadamente 5 a 10 vezes do seu volume inicial. No entanto, como a taxa de liberação de água dos materiais zeólitos é mais lenta, a expansão pode ser menor.

- Utilização de aditivos

Os aditivos podem ser classificados em duas subcategorias: aditivos orgânicos e aditivos químicos.

Os aditivos orgânicos incluem o uso de ceras Fischer-Tropsch, para a síntese de hidrocarbonetos e outros compostos alifáticos a partir do gás de síntese (CO/H₂); amidas sintéticas de ácidos graxos e a cera de Montan, extraída de lignina cerosa (VAIANA et al., 2013).

Os processos WMA que utilizam aditivos orgânicos apresentam diminuição da viscosidade acima do ponto de fusão da cera. O tipo de aditivo orgânico ou cera deve ser selecionado com cuidado, de modo que o ponto de fusão do aditivo seja mais alto do que as temperaturas de serviço esperadas para reduzir o risco de deformação permanente. O tipo de aditivo orgânico ou cera também pode afetar as propriedades na baixa temperatura de desempenho do ligante (PROWELL et al., 2012).

Os aditivos químicos incluem o uso de substâncias químicas como, por exemplo, agentes emulsificantes, surfactantes, polímeros, aditivos melhoradores de revestimento, trabalhabilidade ou adesão (VAIANA et al., 2013).

Os processos que envolvem o uso de aditivos químicos dependem de uma variedade de mecanismos diferentes para ajudar o ligante asfáltico a revestir o agregado em temperaturas mais baixas e um efeito de lubrificidade para melhorar a compactação (PROWELL et al., 2012).

2.5.4 Uso de bioligantes

A necessidade de reduzir a pegada ambiental na área de pavimentação rodoviária tem levado os pesquisadores à busca por ligantes produzidos a partir de fontes alternativas e renováveis, para mitigar o impacto ao meio ambiente e à saúde do operário. Assim, os chamados bioligantes, que são ligantes ou bio-óleos provenientes de biomassa de origem animal ou vegetal, têm sido foco de estudo nas últimas décadas (RUIZ, 2020).

Os bioligantes são produzidos usando várias matérias-primas (madeira e materiais vegetais; esterco de suíno; óleos vegetais; resíduos de processamento agrícola, resíduos de colheita) e são combinados com um ligante betuminoso em uma ampla faixa de proporções (CHEN et al., 2014; TAYH et al., 2014; YANG et al., 2015, RUIZ, 2020).

Segundo Raouf e Williams (2009) os bioligantes podem ser empregados como substitutos aos ligantes convencionais (100% de substituição), como extensores (substituindo o ligante asfáltico de 25% a 75%), ou como modificadores (substituição inferior a 10%), podendo atuar como agente de reciclagem em misturas com alto teor RAP, pois esses materiais apresentam potencial de alterar a rigidez do ligante envelhecido e da mistura asfáltica e de permitir uma ação rejuvenescedora.

De acordo com Barco-Carrión et al. (2017) o uso de misturas asfálticas com incorporação de elevado teor de RAP junto com bioligantes, é um dos desafios atuais nas pesquisas de engenharia de pavimentação. Se por um lado a prática do uso de RAP em misturas asfálticas recicladas não é tão recente, a aplicação de bioligantes nessas misturas representa uma inovação, pois esses ainda necessitam de caracterização e estudos mais aprofundados, isoladamente e na mistura, a fim de desenvolver boas práticas para seu uso.

Ao longo dos últimos anos, estudos têm investigado a utilização de asfaltos biomodificados ou bioligantes em substituição parcial ou total ao ligante virgem na mistura asfáltica reciclada.

Mogawere et al., (2012) avaliaram o efeito de um ligante asfáltico biomodificado sobre o desempenho mecânico e a trabalhabilidade de misturas asfálticas projetadas com e sem RAP. O bioligante era derivado de esterco de suíno e foi adicionado ao ligante asfáltico virgem PG52-28 numa dosagem de 5% em peso deste para criar o ligante biomodificado. Os dados indicaram que a adição de ligante biomodificado ajudou a reduzir a rigidez da mistura com 40% de RAP para um nível mais próximo da rigidez da mesma mistura sem RAP. Em temperaturas abaixo de 138°C a trabalhabilidade da mistura de controle e da mistura com 40% de RAP adicionada do ligante biomodificado foram idênticas. O uso do ligante biomodificado melhorou as características de trincamento das misturas recicladas, aumentando em mais de 500 ciclos até a falha, em comparação com a de controle. Os autores não observaram efeito negativo sobre a susceptibilidade à umidade e sobre a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas recicladas com o uso do bioligante.

Hill et al. (2013) examinaram as propriedades de baixa temperatura de misturas contendo RAP e o mesmo bioligante do estudo de Mogawere et al, (2012), misturado a um ligante virgem de PG 64-22 numa proporção de 5% em relação à massa deste. Os testes de *Disk-shaped compact tension [DC(T)]*, *Superpave® indirect tension (IDT)*, e *acoustic emission (AE)* foram empregados para caracterizar as propriedades de baixa temperatura das misturas asfálticas. O objetivo principal foi determinar a viabilidade de misturas recicladas e biomodificadas para uso em climas mais frios, onde as rachaduras térmicas eram uma das principais causas de desgaste do pavimento.

Os autores verificaram que o ligante asfáltico biomodificado melhorou a resistência à fratura da mistura em torno de 15%, enquanto o RAP reduziu a energia de fratura tanto das misturas biomodificadas (entre 5 e 15%), como das misturas com asfalto virgem (entre 10 e 20%). No entanto, a redução na energia de fratura causada pelo RAP foi menor quando o bioligante foi usado. Além disso, as misturas recicladas biomodificadas exibiram maior *creep compliance*, o que indicou que essas misturas poderiam aliviar tensões térmicas mais facilmente do que as HMA com RAP e ligante virgem.

Barco-Carrión et al. (2017) analisaram as propriedades viscoelásticas lineares de bioligantes e biomisturas fabricadas com alto teor de RAP (50%) e bioligantes, em uma ampla faixa de temperaturas e frequências de serviço por meio do DSR e de testes de flexão de dois

pontos, respectivamente. Foram avaliados dois bioligantes: um produzido a partir da mistura de resina de pinho (80% em massa) e óleo de linhaça (20% em massa) e o outro contendo polímero. Os resultados mostraram que ambos os bioligantes atuaram como agentes rejuvenescedores sobre o ligante RAP, pois houve cerca de 1% de redução do módulo de cisalhamento complexo e aumento do ângulo de fase (entre 38 e 68%), bem como permitiram a obtenção de misturas asfálticas de alto módulo com alto teor de RAP. No entanto, nenhuma ligação direta entre suas propriedades viscoelásticas lineares foi encontrada.

2.6 ZEÓLITA

As zeólitas são materiais cristalinos, microporosos, de arranjo estrutural básico composto por unidades de construção primária (*Primary Building Unit* – PBU) que tem a configuração de um tetraedro do tipo TO_4 , formado por quatro átomos de oxigênio ligados a um átomo central T (onde T é normalmente silício ou alumínio, mas pode ser também B, Ga, Ge, Fe, P, Co, ...) (LUZ, 1995; FERRET, 2004; BAERLOCHER et al., 2007; VIEIRA et al., 2014).

A partir das unidades de construção primária são formadas as unidades de construção secundárias (*Secondary Building Unit* – SBU), dispostas de modo a formar canais e cavidades que originam espaços vazios de várias formas e tamanhos. Esses espaços vazios são os responsáveis pela densidade mais baixa para os materiais zeolíticos quando comparados com outros silicatos.

McCusker et al. (2001), explicam que o arcabouço zeolítico é formado por moléculas hospedeiras (tetraedros de Si e Al), no qual se ligam entre si formando poros, que proporcionam a entrada de moléculas visitantes (cátions trocáveis e água). Este tipo de estrutura microporosa confere a zeólita uma superfície interna muito grande, quando comparada à superfície externa, permitindo a transferência de matéria entre os espaços intercrystalinos, no entanto esta transferência é limitada pelo diâmetro dos poros da zeólita. Desta forma, só podem ingressar ou sair do espaço intercrystalino aquelas moléculas cujas dimensões são inferiores a um certo valor crítico, que varia de zeólita a outra. (LUZ, 1995)

Os poros da estrutura cristalina da zeólita são em formato de câmaras ou canais. As dimensões dos canais são da ordem de 3Å a 30Å, o que as torna suficientemente grandes para que não apenas átomos únicos, mas também pequenas partículas de compostos químicos

possam se difundir e penetrar no seu interior. Uma propriedade particular desses materiais é a presença de água em sua composição (“água zeolítica”) (WOSZUK et al., 2017).

Segundo os autores, entre 25 e 400°C a água zeolítica é liberada da estrutura de maneira contínua., sem a alteração no volume cristalino. Conseqüentemente, durante o resfriamento do mineral num ambiente úmido, as partículas de água são absorvidas continuamente por sua estrutura.

2.6.1 Natureza propriedades das Zeólitas

De acordo com a origem, as zeólitas podem ser naturais ou sintéticas. As zeólitas naturais são minerais, pois atendem a definição clássica utilizada na mineralogia e geologia: “Minerais são elementos ou compostos químicos com composição definida dentro de certos limites, cristalizados e formados naturalmente por meio de processos geológicos inorgânicos, na Terra ou em corpos extraterrestres (TEXEIRA et al., 2003, p. 28)”

Como resultado de muitas explorações, foram identificados os seguintes meios geológicos que apresentam depósitos de minerais zeolíticos: depósitos de lago salino alcalino; depósito de solos salinos alcalinos; depósito de sedimentos marinhos; depósito de sistemas abertos; depósito hidrotermal. (LUZ, 1995; PABLO-GALAN e CHAVEZ-GARCIA, 1996; BENNING et al., 2000; TSCHERNICH, 1992; GALLEZOT, 2002).

No Brasil, a Bacia do Parnaíba, localizada no estado do Maranhão, representa o primeiro depósito de zeólita natural do país com potencial de aproveitamento econômico, seguida da Bacia do Paraná, no sul do país. As zeólitas ocorrem na natureza em quantidade suficiente para serem consideradas como um recurso mineral viável (DAL BOSCO ET AL., 2004).

Ferret (2004) e Vieira et al (2014) afirmam que as zeólitas de ocorrência natural apresentam limitações, pois quase sempre possuem fases impuras indesejáveis, sua composição química varia de um depósito para outro e também suas propriedades não são otimizadas para uma determinada aplicação.

As primeiras tentativas de obtenção de zeólitas sintéticas imitavam as condições geotérmicas naturais, sendo realizadas por meio de reações hidrotérmicas em altas temperaturas e pressões por longos períodos. Essa forma foi substituída pelo uso de compostos de partida mais reativos, que produziam fontes oligoméricas de silício e alumínio menores e, conseqüentemente, os materiais de interesse em pouco tempo e em condições mais

brandas, conduzidas à temperaturas de 25 a 300°C (MASCARENHAS, 2001; XU et al., 2007).

Segundo Izidoro (2013) é possível obter zeólitas sintéticas com diferentes estruturas mediante a utilização de qualquer matéria prima que contenha predominância de sílica e alumina e também com a variação da composição das soluções saturadas utilizadas e das condições experimentais como temperatura e pressão de síntese, agitação, tempo de síntese, etc

De uma forma geral, as propriedades físico-químicas das zeólitos dependem de sua estrutura e morfologia, sendo as principais (RESENDE, 2008; HILDEBRANDO, 2012)

- alto grau de hidratação;
- baixa densidade e grande volume de espaços vazios quando desidratada;
- alta estabilidade da estrutura cristalina, mesmo quando desidratada;
- peneiramento molecular;
- troca iônica e propriedades catalíticas;
- adsorção seletiva de gases e vapores;

2.6.2 Zeólita na pavimentação

O uso de zeólitas como uma tecnologia WMA na pavimentação é motivado pela sua propriedade de liberar água presente no arcabouço cristalino em temperaturas acima de 80-90°C, sem sofrer alterações estruturais. Quando a zeólita é aquecida durante a produção das misturas asfálticas, a água zeolítica é dispersa no ligante asfáltico produzindo um vapor fino, o que acarreta uma expansão da fase aglutinante de aproximadamente 5 a 10 vezes, resultando na formação de uma espuma de asfalto que melhora o revestimento dos agregados, reduz a viscosidade da mistura e aumenta a sua trabalhabilidade. (TAO e MALLICK, 2009; PROWELL ET AL., 2012; VAIANA et al, 2013).

O entendimento dessa propriedade da zeólita tem mostrado que a taxa de liberação da água presente na sua estrutura cristalina determina a intensidade e a duração do efeito espumante.

De Visscher et al. (2010) e Sanchez-Alonzo et al (2020), em estudos sobre a aplicação de zeólita em WMA, realizaram uma análise da taxa de liberação da água de zeólita naturais (denominadas pelos autores A, B e C) e sintéticas (D) por meio da perda de massa depois do aquecimento das amostras em estufa à uma temperatura de 120°C por 20, 40, 60, 80 e 100

minutos. Os autores verificaram que todas as amostras liberaram a maior parte da água nos vinte primeiros minutos de aquecimento, no entanto a zeólita D e C liberaram água mais rapidamente pelo fato de conterem uma graduação mais fina.

Sanchez-Alonzo et al (2020) realizaram um comparativo da liberação de água entre a clinoptilolita e uma zeólita sintética comercial, nas temperaturas de 155°C, 145°C e 135°C, por meio de medições de umidade de 5 em 5 minutos até atingir o tempo médio de fabricação e espalhamento da mistura, que segundo os autores é de 90 minutos. Pela curva de liberação de água, observaram que a zeólita natural liberou mais água que a zeólita sintética. Sanchez-Alonzo et al. (2020) explicam que esse resultado pode estar associado aos diferentes elementos químicos presentes na estrutura de cada tipo de zeólita.

Portanto, verifica-se que a liberação da água zeolítica é função da natureza e das características físicas do material, da presença ou não de outros compostos nos poros da estrutura cristalina e da faixa de temperatura de aquecimento.

Ainda é importante salientar que a saída dessa água ao longo do tempo pode ser alterada quando as zeólita estiverem sendo utilizadas como componentes de misturas asfálticas, pois estarão em interação com outros materiais (ligantes e agregados). Logo, não é possível afirmar como ocorrerá a liberação de água do arcabouço cristalino da zeólita, nem determinar quanto tempo essa água permanecerá na mistura asfáltica para cumprir seu papel de lubrificante, utilizando somente essa análise de perda de massa ao longo do tempo.

2.6.2.1 Pesquisas sobre o uso da zeólita em ligantes asfálticos

De acordo com Wozzuk et al. (2017) um dos primeiros estudos de propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados por zeólita foi o de Wasiuddin *et al.* (1998). Esses autores avaliaram as propriedades reológicas de dois ligantes asfálticos de grau de desempenho (PG) comumente usados (PG 64-22 e PG 70-28), com e sem os aditivos Sasobit® e a zeólita sintética Aspha-min®. Segundo os autores a Aspha-min® proporcionou uma redução de viscosidade de 30 a 90 mPa.s, no teor de 0.2%, entretanto não foi observada diminuição significativa na temperatura de mistura. A avaliação dos ligantes por meio do $G^*/\sin\delta$ não demonstrou efeito negativo na classificação a alta temperatura devido à diminuição da viscosidade a alta temperatura. Uma redução na profundidade de deformação de 0,8mm e 0,2mm adicionando esse tipo de zeólita foi observada nos teores de 0,2% e 0,4%, respectivamente.

Além das características físicas e reológicas dos ligantes asfálticos é importante o entendimento acerca dos processos de envelhecimento desses materiais, principalmente quando se trabalha com misturas asfálticas recicladas, onde geralmente acontecem interações entre o ligante do RAP, que já sofreu envelhecimento de curto e longo prazo, e o ligante virgem adicionado, que sofrerá o envelhecimento a curto prazo durante a produção das misturas asfálticas e o envelhecimento a longo prazo durante a vida útil do pavimento.

Gandhi et al. (2009) salientam que embora estudos tenham sido realizados para analisar o desempenho de misturas asfálticas mornas, as características de envelhecimento dos ligantes desse tipo de mistura asfáltica ainda não são conhecidas em detalhes. Essa preocupação pode também ser estendida para as misturas asfálticas recicladas, que por vezes envolvem a utilização de ligantes modificados com algum tipo de aditivo, alguns deles comuns nas WMA, como por exemplo a zeólita.

Portanto, esses autores avaliaram o envelhecimento de ligantes asfálticos modificados por Aspha-min® e Sasobit®. Segundo Gandhi et al. (2009), os cristais de Aspha-min® contêm cerca de 21% de água, o que induz a uma pulverização no aglutinante, causando uma expansão de volume, aumentando a trabalhabilidade e compatibilidade da mistura a temperaturas mais baixas.

Os ligantes modificados e não-modificados foram envelhecidos artificialmente na estufa de filme fino rotativo (*rolling thin film oven* – RTFOT), para simular o envelhecimento a curto prazo, e no vaso de envelhecimento sob pressão (*pressure aging vessel* – PAV), para simular o envelhecimento a longo prazo. O envelhecimento por RTFOT foi realizado a 163°C e a uma temperatura mais baixa (130°C) para simular o envelhecimento do asfalto em WMA. Foi feito um comparativo do ligante asfáltico extraído da WMA – misturado a uma temperatura mais baixa – e o ligante asfáltico envelhecido no RTFO a diferentes temperaturas.

Os autores explicaram que como a mistura asfáltica morna (WMA) e a mistura asfáltica a quente (HMA) são submetidas a condições semelhantes após a sua colocação, decidiu-se não alterar as condições de envelhecimento do PAV. Após o envelhecimento, os resíduos de RTFOT foram testados quanto à viscosidade, $G^*/\sin\delta$ e posteriormente envelhecidos no PAV. Os resíduos do PAV foram testados quanto à rigidez, m -valor e $G^*\sin\delta$.

Os resultados do estudo de Gandhi et al. (2009) indicaram que a diminuição da temperatura de envelhecimento no RTFOT reduziu o índice de envelhecimento de cerca de 20

a 30%, mas não teve efeitos significativos no parâmetro de deformação ($G^*/\sin\delta$), no parâmetro de fadiga ($G^*\sin\delta$) e na rigidez dos ligantes. A adição de Aspha-min® nos ligantes aumentou significativamente os valores de G^*/\sin em cerca de 20% e diminuiu os m-valores em cerca de 15%, o que indica uma melhoria da resistência à deformação permanente dos ligantes asfálticos. Em contrapartida, os valores de $G^*\sin\delta$ não apresentaram diferença significativa, o que mostra que o aditivo não proporcionou influência na resistência a fadiga do ligante asfáltico.

Os autores verificaram que os ligantes asfálticos contendo Aspha-min® apresentaram um aumento de 2% nos m-valores em comparação com os ligantes asfálticos não modificados, quando envelhecidos no RTFO a 130°C. Assim, observou-se que a redução da temperatura de envelhecimento melhora a resistência dos ligantes ao craqueamento térmico na presença de Aspha-min®.

Análises semelhantes podem ser válidas para a mistura de ligante asfálticos modificados por zeólita e ligante RAP, para avaliar o comportamento de fadiga, deformação permanente e craqueamento térmico do aglutinante formado quando o mesmo for submetido ao envelhecimento a curto prazo (em temperaturas convencionais e mais baixas) e a longo prazo.

Amoni et al. (2019) estudaram a diferença de comportamento físico e reológico entre um ligante asfáltico convencional e um asfalto modificado por fases zeolíticas NaP1 e Analcima. Para isso, foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e análises reológicas utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).

As amostras de ligante asfáltico modificado apresentaram um aumento de viscosidade de cerca de 50cP na temperatura de 135°C, se igualando ao do ligante virgem em temperaturas maiores (175°C). Não foi observado diferenças significativas nos valores de penetração e ponto de amolecimento em comparação com o ligante asfáltico convencional. Os ensaios reológicos mostraram que as fases zeolíticas ofereceram resistência a deformação permanente maior em cerca de 10% não foi verificada mudanças dos valores de grau de desempenho em relação ao ligante asfáltico puro.

Sengoz et al. (2013) investigaram a zeólita natural como aditivo para WMA e compararam com outros tipos de aditivos (orgânico, químico e zeólita sintética) por meio de avaliações de propriedades convencionais (penetração, ponto de amolecimento) e reológicas (viscosidade, módulo complexo a níveis de frequência de 0,01Hz e 10Hz, nas temperaturas de

30, 40, 50, 60, 70 e 80°C). Em um trabalho seguinte (SENGOZ et al., 2016) utilizaram asfaltos modificados com teores fixos desses aditivos estudados em misturas asfálticas recicladas, com diferentes porcentagens de RAP.

Os autores misturaram um ligante asfáltico 50/70 com os quatro aditivos WMA, individualmente, nas seguintes proporções: 0, 3, 4, 5, 6, 7% de zeólita natural; 0, 3, 4, 5, 6, 7% de zeólita sintética; 0, 2, 3, 4% de aditivo orgânico e 0, 1, 2, 3% de aditivo químico.

Os ensaios convencionais indicaram que a zeólita natural proporcionou ao ligante uma diminuição da penetração (de 55dm para 51dm e 52dm com o uso da natural e da sintética, respectivamente), aumento do ponto de amolecimento (de 49,1 para 55°C e 56°C com o uso da natural e da sintética, respectivamente) e aumento do índice de penetração (de -1,20 para 0,02 e 0,27 com o uso da natural e da sintética, respectivamente). Uma redução da viscosidade dos ligantes modificados com ambas as zeólitas até o teor de 5% foi verificado, o que indica um aumento da trabalhabilidade e redução da temperatura de mistura (redução de 6°C para zeólita natural e 9°C para zeólita sintética) e compactação (redução de 6°C para zeólita natural e 7°C para zeólita sintética). Os autores observaram uma redução da viscosidade com o uso de ambas as zeólitas em cerca de 20%, o que contradiz o resultado apresentado por Amoni (2019).

Por meio do índice de modificação (*modification index*: $IM = G^*_{WMA} / G^*_{PURO}$), os autores comprovaram que em baixa e alta frequência, em todas as temperaturas de ensaio, as amostras de ligante asfáltico com 6% de zeólita natural exibiram maiores valores de IM. Para uma mesma temperatura e teor de zeólita natural constante, houve uma redução do IM com o aumento da frequência.

O estudo de Sengoz et al. (2013) possibilitou concluir que, pelos resultados de G^* e IM, o teor ideal de zeólita natural foi de 5% e 6%, respectivamente, indicando que a zeólita natural pode ser uma alternativa ao uso de zeólita sintética como técnica WMA.

Woszuk et al. (2017) salientam que se a quantidade de água na zeólita for insuficiente, o efeito espuma acontece de forma ineficaz. Em contrapartida, se a quantidade de água zeolítica for excessiva, poderá ocorrer falha na adesão ligante agregado. Portanto, os autores alertam que o uso de zeólita no asfalto está atrelado a compreensão da topologia da estrutura do mineral, da quantidade de água presente no seu retículo cristalino, bem como das suas características de liberação em função do tempo e temperatura.

Para contribuir com o entendimento da relação entre as propriedades da zeólita no efeito espumante em asfaltos, Woszuk et al. (2017) investigaram a modificação de um ligante

asfáltico 35/50, classificado segundo especificações europeias, por meio da adição de dois tipos de zeólitas (sintética Na-P1 e natural clinoptilolita) na condição seca ao ar, bem como após mistura com água nas seguintes proporções (em relação à massa seca, água: zeólita):3:1 para Na-P1 e 1:3 para clinoptilolita.

Por meio da análise térmica das zeólitas foi verificado que até 250°C (região de particular interesse para a formação de espuma) há um efeito endotérmico mais intenso na Na-P1, com ponto máximo em 120°C e 190°C e redução de massa de 20,4% e 7,7% para a NaP-P1 e clinoptilolita, respectivamente.

Segundo Wozuk et al. (2017) o parâmetro Si/Al permite classificar a zeólita em alto teor de sílica (Si/Al = 10-100), médio teor de sílica (Si/Al = 2-5) e baixo teor de sílica (Si/Al = 1-1,5). Quanto maior o valor de Si/Al, maior a força de ligação da água zeolítica o que faz com que a liberação aconteça de uma forma mais lenta. Foi encontrado um valor de Si/Al igual a 2,30 e 7,07 para a Na-P1 clinoptilolita, respectivamente.

Os autores testaram a viscosidade dos ligantes asfálticos em duas temperaturas (135°C e 160°C) e quatro intervalos de tempo (15, 30, 45 e 60 min) após a adição no asfalto de 5% das zeólitas e suas variações com água. Os resultados mostraram uma redução da viscosidade após 45 minutos da introdução dos aditivos no asfalto, independentemente do tipo de adição e da temperatura, onde para a clinoptilolita com água a diminuição foi de cerca de 5%. Wozuk et al. (2017) ainda salientam que a modificação da zeólita com água promove uma redução de zeólita dosada, o que se traduz em eficiência econômica na produção de WMA.

2.6.2.2 Pesquisas sobre o uso da zeólita em misturas asfálticas

Os primeiros estudos de zeólita em misturas asfálticas foram realizados por Hurley e Prowell (2005) com o objetivo de determinar a aplicabilidade do Aspha-Min® em operações típicas de pavimentação sob condições ambientais dos Estados Unidos, incluindo o desempenho das misturas em situações de tráfego rápido e condições de elevadas temperaturas.

Para isso, os autores utilizaram dois tipos de agregados (granítico e calcário), dois tipos de ligantes (PG 64-22 e PG 58-28), diferentes temperaturas de compactação (149°C, 129°C, 110°C e 88°C) e temperaturas de misturas de aproximadamente 20°C acima da temperatura de compactação. Os resultados mostraram que a adição de zeólita melhorou a compactação inclusive em temperaturas mais baixas, reduzindo o volume de vazios em cerca

de 1%, e teve pouco efeito no módulo de resiliência e na G_{mm} e não aumentou o potencial de deformação permanente.

Dentre os estudos brasileiros sobre a aplicação de zeólita na pavimentação, Sousa Filho et al. (2006) analisaram o comportamento mecânico de misturas mornas produzidas com uma zeólita sintética, em comparação com misturas asfálticas convencionais. Os autores concluíram que a zeólita sintética garantiu uma diminuição de 20°C na temperatura de usinagem e compactação sem comprometer as propriedades mecânicas desejáveis para uma mistura asfáltica, tanto no que diz respeito a resistência à tração quanto com relação ao módulo de resiliência

Otto (2009) realizou uma pesquisa sobre misturas asfálticas mornas com adição de zeólita natural clinoptilolita., dosadas pela metodologia Marshall, por meio dos seguintes ensaios laboratoriais: cântabro, adesividade por ação deletéria da umidade induzida (Lottman), análise da fadiga do material (a 25Hz e 10°C) e determinação do módulo complexo (nas frequências 1, 3, 10 e 30Hz e variação de temperatura -10, 0, 10, 15, 20, 30 e 40°C). Os ensaios foram realizados para dois conjuntos de amostra: amostras de controle (agregado mineral mais ligante asfáltico 50/70) e amostras com adição de 0,3% de zeólita com 21% de umidade.

Segundo o autor, no ensaio de cântabro a mistura asfáltica com adição de zeólita apresentou desgaste médio superior ao da mistura asfáltica de controle, em cerca de 1 a 2% e resistência a ação deletéria da água menor em 11,8%. Na análise de fadiga, as misturas asfálticas mornas com adição de zeólita demonstraram menor suscetibilidade a variações do número de aplicação de solicitações e sua deformação específica para um milhão de ciclos ($114,46 \times 10^{-6}$) foi menor que a mistura controle ($141,46 \times 10^{-6}$). Os resultados de módulo complexo indicaram que a mistura morna apresentou maior suscetibilidade térmica, porém, maior valor de módulo em cerca de 15 a 20%.

De Visscher et al. (2010) avaliaram o desempenho de misturas asfálticas mornas produzidas com zeólita sintética, por meio de ensaios de compactação, deformação permanente, sensibilidade à água e trincamento em baixas temperaturas.

Os autores verificaram que a adição de 0,3% de zeólita D (sintética) permite diminuir a temperatura de compactação de 150°C para 120°C, sem prejuízos para o volume de vazios da mistura. Em 135 °C e 120 °C, um aumento da quantidade de zeólita D de 0,3% para 0,6% diminui ainda mais o teor de vazios. Com isso, os autores concluíram que dobrar a quantidade de zeólita não parece ter um efeito significativo na redução de temperatura.

Em temperaturas mais baixas (90°C e 105°C) a redução do volume de vazios não mais acontece. Segundo os autores uma explicação seria o fato destas temperaturas estarem muito próximas do ponto de ebulição da água, de modo que a liberação de vapor não é suficientemente acentuada.

No uso da zeólita C (natural) ocorreu uma melhoria menos expressiva no volume de vazios e com a zeólita B (natural) o volume de vazios aumentou em cerca de 1% devido sua graduação mais grosseira.

Os autores não analisaram o comportamento da mistura asfáltica com as zeólita naturais devido a sintética ter proporcionado resultados melhores de compactidade. A deformação permanente da mistura asfáltica não foi afetada com o uso da zeólita D. O resultado do ensaio de sensibilidade à umidade indicou que o uso de 0,3% dessa zeólita em WMA compactadas à 120°C proporcionou um aumento da resistência à tração (RT) sem condicionamento de 4MPa e um alcance da razão de resistência à tração retida (RRT) da mistura de referência (sem zeólita e compactada a 150°C).

Os autores não constataram diferenças significativas nas características de trincamento em baixas temperaturas entre as amostras com zeólita e a amostra de referência, compactadas a 120°C e 150°C respectivamente.

Vaiana et al. (2013) realizaram um estudo para avaliar a trabalhabilidade da WMA com a adição de zeólita sintética (Aspha-min®), analisar o desempenho volumétrico e mecânico dessas misturas WMA em comparação com HMAs de referência e levantar considerações sobre o efeito do tempo de formação de espuma (entre as fases de mistura e compactação) na trabalhabilidade das misturas. O objetivo principal do estudo foi realizar a identificação de um máximo grau de compactação das misturas asfálticas em função de um “tempo de formação de espuma” (*foaming time* - FT).

Segundo os autores, o FT é um tempo de reação (condicionamento em estufa) entre a mistura e compactação para a formação de espuma devido a adição a zeólita, que leva a um ligeiro aumento no volume do ligante com a consequente redução da viscosidade da mistura, aumento da trabalhabilidade e melhoria no revestimento dos agregados. O FT foi avaliado em termos de volume de vazios, ou seja, identificação do valor de FT que minimiza o volume de vazios da mistura devido à otimização do efeito espumante.

Os resultados dessa experiência mostraram que o efeito espumante da zeólita foi maior após FT=1h à temperatura de compactação, parecendo desaparecer após FT=2h, sendo o mesmo resultado encontrado por De Visscher et al. (2010). Tao e Mallick (2009) também

constaram que esse tempo de condicionamento proporcionou um resultado positivo na trabalhabilidade de WMA com agregados virgens e WMA com 100% de RAP.

Tao e Mallick (2009) investigaram a viabilidade do uso de 100%RAP em misturas asfálticas à quente a uma temperatura de 125°C com o uso de aditivos WMA: sasobit H8 (1,5%, 2%, 5%) e zeólita advera (0,3%, 0,5% e 0,7%). Para isso, avaliaram a trabalhabilidade, a G_{mb} , a resistência à tração à 0°C e os módulos a 0°C, 26,7°C e 50°C.

A trabalhabilidade da mistura asfáltica com 100% de RAP melhorou com a adição dos dois aditivos e a zeólita não alterou de forma bem definida a G_{mb} . O módulo foi considerado dependente da G_{mb} e, segundo os autores, o ligante envelhecido do RAP pode ter afetado a compactação, impedindo a total formação de espuma de asfalto, como aconteceria quando a zeólita fosse misturada a um ligante virgem.

A verificação da hipótese de interferência do ligante RAP na formação de espuma de asfalto foi feita por meio da compactação de 3 corpos de prova com 100% RAP e 0,7% de zeólita (teor mais alto) em um molde com orifícios que permitiam a saída de água durante a compactação. Todos os corpos de prova apresentaram G_{mm} maior em comparação com os corpos de prova compactados no molde normal. No entanto, os valores de G_{mm} ainda foram menores que os das amostras de controle. Com isso, constatou-se que possivelmente o ligante envelhecido RAP impede o processamento total da zeólita para a formação de espuma.

Sengoz et al (2016) estudaram a viabilidade de quatro aditivos WMA (zeólita sintética, zeólita natural, aditivo químico e aditivo orgânico) em misturas asfálticas recicladas, com diferentes porcentagens de RAP (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) por meio dos ensaios de estabilidade Marshall, fadiga, e deformação permanente utilizando o *Hamburg Whell Tracking*, comparando com uma mistura HMA de referência.

Os autores trabalharam com um ligante asfáltico 50/70 misturado com os quatro aditivos WMA, individualmente, baseado em resultados de estudo anterior (Sengoz et al., 2016) e seguindo as recomendações dos fabricantes (orgânico: 3%; químico: 2%; zeólita sintética e natural; 5%).

A dosagem Marshall foi realizada sem a adição de RAP e o teor ótimo de ligante foi determinado para cada mistura:

- HMA (agregado virgens + ligante virgem);
- WMA + aditivo orgânico (agregados virgens + ligante com 3% de aditivo orgânico);
- WMA + aditivo químico (agregados virgens + ligante com 2% de aditivo químico);
- WMA + zeólita sintética (agregados virgens + ligante com 5% de zeólita sintética);

- WMA + zeólita natural (agregados virgens + ligante com 5% de zeólita natural).

Com base em 10 lotes, determinou-se que teor de ligante presente no RAP era de 4,30%. Sengoz et al (2016) consideraram que todo o ligante RAP contribuía para a mistura final, portanto realizaram uma correção do teor de ligante asfáltico a ser adicionado à mistura em cada situação analisada.

Os autores verificaram, para todas as misturas asfálticas contendo zeólita (natural ou sintética), que o aumento da porcentagem de RAP acarretava diminuição da estabilidade em cerca de 10% e aumento do volume de vazios em cerca de 1 a 5%, diminuição da fluência e tendência de redução da resistência à tração em cerca de 17%. Com base no atendimento das especificações de fluência e volume de vazios das misturas, os autores determinaram o teor ótimos de RAP para cada um dos tipos de mistura avaliados, sendo 20% a quantidade ótima de RAP para as WMA's contendo zeólita (natural ou sintética).

A adição de zeólita as misturas WMA sem RAP acarretou um maior número de ciclos de carregamento em comparação com a HMA de referência. No entanto, o uso de RAP diminuiu a resistência à fadiga dessas misturas.

O ensaio de *Hamburg Whell Tracking* realizado pelos autores mostrou que a zeólita natural proporcionou à mistura uma maior resistência à deformação permanente, em comparação com a zeólita sintética. Mas ambas aumentaram o número de ciclos de carregamento das WMA's para uma deformação de referência, em comparação com a HMA.

Sanchez-Alonzo et al. (2020) analisaram a utilização de uma zeólita natural do tipo clinoptilolita, proveniente do Chile, como uma alternativa aos produtos sintéticos para fabricar WMA. Além disso, verificaram a possibilidade de fabricação da WMA com RAP (10%; 20% e 30%) usando a zeólita clinoptilolita. Para a determinação do teor ideal de zeólita na mistura asfáltica foi feita uma análise da quantidade de água presente na sua estrutura cristalina, seguido de uma avaliação, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e fluorescência, da distribuição da zeólita (1%, 5% e 10%) no ligante.

As imagens obtidas na MEV e na fluorescência revelam que a clinoptilolita apresentou boa dispersão no ligante nas três proporções, no entanto na concentração de 10% observou-se o aparecimento de aglomerados do material zeolítico. Segundo os autores, uma boa dispersão é um indicativo de maior otimização no efeito espumante. Sendo assim, aconselham evitar concentrações elevadas de zeólita no ligante para que não haja o aparecimento de grumos zeolíticos que, conseqüentemente, prejudicarão a formação da espuma.

De acordo com os resultados de estabilidade, fluência, VAM e volume de vazios encontrados em corpos de prova de misturas mornas recicladas (RWMA) com a adição de RAP com 0,6% de zeólita, compactados pelo método Marshall e SUPERPAVE, Sanchez-Alonzo et al. (2020) concluíram que três tipos diferentes de RWMA podem ser obtidas, buscando otimizar as diferentes variáveis analisadas:

- a 125°C e 10% de RAP: decréscimo da temperatura sendo preferível em detrimento da maior porcentagem de RAP;
- a 145°C e 30% de RAP: aumento da porcentagem de RAP sendo preferível em detrimento da diminuição da temperatura;
- a 135°C e 20% de RAP: ambas as variáveis (temperatura e porcentagem de RAP) sendo otimizadas.

Com base em seus resultados, Sanchez-Alonzo et al. (2020) afirmaram que a adição de zeólita em RWMA reduz a temperatura em até 30°C em comparação com uma mistura asfáltica à quente convencional, em conformidade com os parâmetros Marshall.

Woszuk e Franus (2016) estudaram a aplicação da zeólita sintética NaP1 e da zeólita clinoptilolita, ambas na condição seca ao ar e embebida em água, para a produção de misturas asfálticas com temperatura de compactação reduzida. Por meio da compactação giratória, foi escolhido o teor ótimo de zeólita com base no volume de vazios, para cada condição avaliada: 1% de clinoptilolita, 0,5% de NaP1 e 0,4% w/m para ambas as zeólita embebidas com água.

Posteriormente, foi confeccionado um primeiro conjunto de amostras com temperatura de mistura de 160°C e temperaturas de compactação diferentes (145°C, 130°C e 115°C) para a determinação do volume de vazios, módulo resiliente (a 23°C, 10°C e 2°C) e susceptibilidade a umidade e um segundo conjunto de amostras com temperatura de mistura de 160°C e temperatura de compactação 115°C para a avaliação da e resistência à deformação permanente em diferentes temperaturas.

Segundo os autores ambas as zeólita embebidas em água não afetaram significativamente o comportamento das misturas asfálticas testadas, no entanto causou diminuição significativa na resistência à umidade. A adição da clinoptilolita seca proporcionou um módulo de rigidez mais elevados, independentemente da temperatura de compactação e da temperatura de ensaio. Eles concluíram que as zeólitas estudadas, naturais e sintéticas, possibilitam uma redução da temperatura de compactação podendo constituir uma alternativa promissora aos aditivos convencionais usados em tecnologias de mistura asfáltica.

2.7 ÓLEO DE ALGODÃO

O algodão está entre as mais importantes culturas de fibras do mundo. Uma média de 35 milhões de hectares de algodão por ano é plantada em todo o planeta. Tem-se observado um aumento gradativo na demanda mundial desde a década de 1950, a um crescimento anual médio de 2%. Atualmente, o algodão é produzido por mais de 60 países, nos cinco continentes (ABRAPA, 2015).

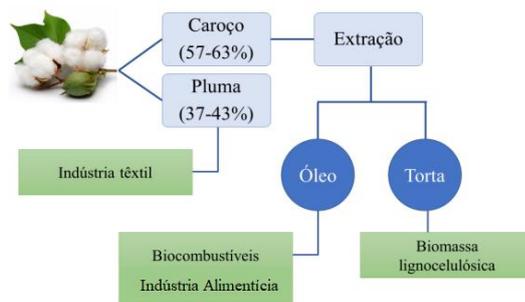
Segundo Varão et al. (2018) o algodão é uma das principais oleaginosas cultivadas no Brasil e a terceira matéria-prima mais utilizada na cadeia produtiva do biodiesel no país.

Nos últimos anos, o Brasil tem se mantido entre os cinco maiores produtores mundiais, ao lado de países como China, Índia, EUA e Paquistão e tem figurado também entre os maiores exportadores mundiais. De maneira geral, a cotonicultura brasileira abrange as cinco regiões, sendo o Centro-Oeste o líder no ranking de área plantada (2.462,40 ha x 1.000), seguido da região Nordeste (859,50 ha x 1.000) e Norte (33,20 ha x 1.000) (ABRAPA, 2015).

O produto colhido a partir do campo de algodão é separado em fibra e caroço de algodão, de onde são obtidos de 37 a 43% de fibra e 57 a 63% de caroço (Figura 13). A fibra é destinada, principalmente, para a indústria têxtil. Já caroço ou semente é rico em óleo, podendo variar de 30% a 35%, e os principais ácidos graxos presentes na sua constituição são: linoléico (47,8%); palmítico (23,4%); oléico (22,9%); palmitoléico (2,0%); mirístico (1,4%), araquídico (1,3%), esteárico (1,1%) e miristoléico (0,1%) (EMBRAPA, 2004; SOUZA, 2020).

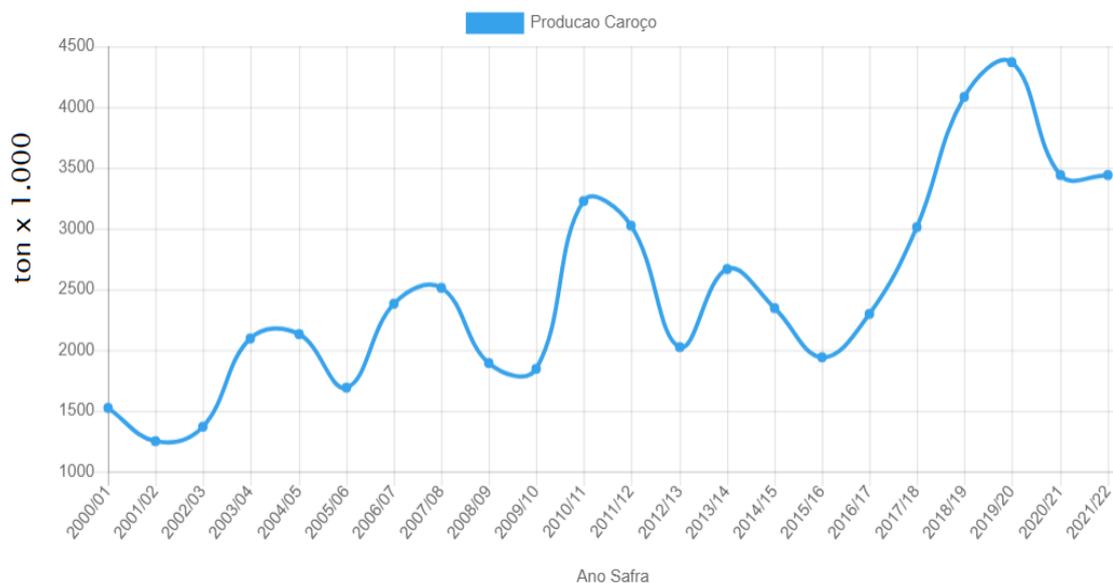
Por meio do gráfico mostrado na Figura 14 observa-se que a produção de caroço de algodão, considerando todas as regiões brasileira, vem crescendo nos últimos anos, o que indica uma garantia de disponibilidade desse produto no país.

Figura 13 - Produtos e coprodutos do beneficiamento do algodão.



Fonte: Adaptado de SOUZA (2020)

Figura 14 - Produção de caroço de algodão



Fonte: CONAB, 2022

O óleo extraído do caroço é líquido, de cor amarelada e tem aplicações para produção de biodiesel, lubrificantes ou alimentos e o subproduto da extração do óleo contido no caroço, possui teores significativos de proteína, de lipídeos e de carboidratos, podendo também ser aproveitado para a alimentação animal (EMBRAPA, 2004; GUIMARÃES JÚNIOR, 2008; SOUZA, 2020). As características físico-químicas comuns do óleo de algodão estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características físico-químicas do óleo de algodão

Densidade a 15°C	a 15°C	0,915 a 0,932
	a 25°C	0,907 a 0,924
Índice de refração	a 25°C	1,469 a 1,474
	a 40°C	1,464 a 1,468
Ponto de fusão		42°C a 52°C
Índice de acidez (sol.N/1%)		0,5ml a 2,0ml
Índice de iodo (Hubit)		103 a 113
Índice de saponificação		190 a 198
Índice sulfocianogênide		61 a 65
Insaponificáveis (%)		0,70 a 1,60

Fonte: EMBRAPA, 2004

2.7.1 Óleo de algodão na pavimentação

Os estudos sobre o uso do óleo de algodão na pavimentação têm se restringido à modificação de ligantes asfálticos, principalmente na tentativa de reduzir a viscosidade destes e, conseqüentemente, diminuir as temperaturas de produção das misturas asfálticas.

Chen et al. (2014) realizaram um estudo comparativo entre ligantes asfálticos recuperados de RAPs de três fontes (A, B e C), rejuvenescidos por óleo de cozinha residual e por óleo de semente de algodão em diferentes porcentagens (0%, 5% e 10%, em peso de ligante rejuvenescido) e por um ligante asfáltico virgem (PG 64-22). A relação massa de ligante envelhecido para virgem foi de 1:3.

Os autores justificaram que a escolha desses óleos se deu pelo fato de que ambos possuem uma grande quantidade de ácidos graxos insaturados, semelhantes ao componente leves do ligante asfáltico, que geralmente diminuem devido ao processo de envelhecimento a longo prazo.

Os resultados do estudo de Chen et al. (2014) indicaram que o fator de resistência à deformação ($G^*/\sin \delta$) diminuíram devido à adição de ambos os óleos

Na temperatura de 70°C o $G^*/\sin \delta$ de todos os ligantes recuperados rejuvenescidos com óleo de algodão foram aproximadamente a metade do valor exibido pelo ligante asfáltico virgem. Na temperatura de 64°C os ligantes asfálticos rejuvenescidos com 5% de óleo de algodão apresentaram valores de $G^*/\sin \delta$ próximos de 1,4 kPa, 2,0kPa e 1,5kPa para os ligantes recuperados A, B e C respectivamente. Tal comportamento foi semelhante ao do ligante asfáltico virgem, que apresentou $G^*/\sin \delta$ próximo de 1,5kPa.

Chen et al. (2014) também observaram que a temperatura de falha dos ligantes rejuvenescidos dependem fortemente dos teores de óleo. Os ligantes rejuvenescidos contendo óleo de cozinha residual ou óleo de algodão mostraram valores de temperatura de falha mais baixos do que aqueles com o mesmo teor de ligante virgem. Comparando os resultados de PG do ligante recuperado com o PG dos ligantes recuperados e rejuvenescidos com óleo de algodão, para 5% de óleo de algodão houve uma redução de temperatura de 25 a 31°C e para o teor de 10% a diminuição de temperatura foi de 31 a 39°C.

Sobre os resultados de viscosidade, os autores analisaram que os valores diminuíram com o aumento de temperatura para todos os ligantes rejuvenescidos. O teor de 5% de óleo de algodão proporcionou valores de viscosidade próximos aos do ligante virgem, para todas as temperaturas de teste, diferindo em 2 a 6%.

Melo Neto et al. (2022) estudaram as características físicas e reológicas de um ligante asfáltico CAP 50/70 modificado pela adição de óleo de algodão refinado, nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. As amostras foram avaliadas antes e após o RTFOT, por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, *performance grade* (PG) e *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR).

Os autores constataram um aumento dos valores de penetração e uma diminuição do ponto de amolecimento com o aumento do teor de óleo de algodão no ligante asfáltico. Comparando os teores de 1% e 6%, a penetração passou de 86x0,1mm para 211x0,1mm e o ponto de amolecimento de 46°C para 37°C.

Houve também uma redução das viscosidades em todas as temperaturas avaliadas. Comparando os teores de 1% e 6%, aconteceu uma redução em torno de 125cP na temperatura de 135°C e de 16cP na temperatura de 177°C.

Os autores também observaram uma redução nos valores de $G^*/\sin \delta$ com o aumento do teor de óleo e aumento de temperatura de teste, antes e após o RTFOT, corroborando com os resultados de Chen et al. (2014). Após o RTFOT as amostras ficaram mais rígidas, exibindo valores de $G^*/\sin \delta$ em torno de duas vezes mais elevados do que antes do procedimento. Quanto ao PG, os teores de 1% a 4% apresentaram PG de 58, igual ao PG do ligante virgem após o RTFOT. Os teores de 5% e 6% diminuíram a classe do ligante para 52°C.

Os resultados de MSCR obtidos pelos autores mostraram que a adição de óleo de algodão aumentou a susceptibilidade do ligante asfáltico à deformação permanente. Houve uma variação crescente nos valores de compliâncias não recuperáveis (Jnr), passando de 1,8 no teor de 1%, para ambas as tensões, para 4,1 e 4,5 no teor de 6%, para as tensões de 0,1kPa e 3,2kPa, respectivamente. Os resultados de Jnr indicaram que os ligantes modificados por óleo de algodão, para todos os teores, podem ser classificados para nível de tráfego padrão.

A adição do óleo de algodão refinado proporcionou a redução de recuperação elástica do ligante na tensão de 3,2kPa para todas as amostras, em torno de 7 a 10%.

Nogueira et al. (2019) avaliaram o uso do óleo de algodão e do ácido graxo do algodão em ligante asfáltico recuperado do RAP. Os autores concluíram que a adição desses bio-óleos tornou o ligante recuperado mais macio e, portanto, mais suscetível à deformação permanente e menos suscetíveis a rachaduras.

Ziegler et al. (2017) avaliaram teores de 1%, 2% e 3% de óleo bruto de algodão adicionados a um ligante asfáltico 50/70 por meio dos ensaios de penetração, ponto de

amolecimento, viscosidade e performance grade (PG), antes e após o RTFOT. Os autores observaram a mesma tendência do estudo de Melo Neto et al. (2022) nas características físicas avaliadas. A penetração foi de 75,1dm para o teor de 1% e de 96,6 dm para o teor de 3%. O ponto de amolecimento foi de 48°C e de 43°C para os teores de 1 e 3%, respectivamente.

Quanto ao PG, os autores verificaram que os ligantes modificados com 2% e 3% de óleo de algodão apresentaram PG de 58, antes e após o RTFOT, igual ao PG do ligante virgem após o RTFOT. Para 1% não foi constatada mudança nas temperaturas.

Os resultados de viscosidade indicaram que a introdução do óleo de algodão no ligante asfáltico alterou pouco os resultados de viscosidade para todas as temperaturas ensaiadas. Aconteceu uma redução em torno de 14cP e de 61cP na temperatura de 135°C e de 2cP e 7cP na temperatura de 177°C, para 1% e 3% de óleo respectivamente.

2.8 SUSTENTABILIDADE DA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO

As incertezas das mudanças climáticas e o esgotamento das fontes naturais e não renováveis são fatores básicos que ilustram a necessidade de mudanças inovadoras que levem a um futuro ambiental melhor. Esses fatos reforçam a importância da adoção de estratégias sustentáveis, principalmente por aqueles que são os principais responsáveis por criar essas situações (PLATI, 2019).

O sistema rodoviário é um setor importante para a vitalidade econômica e social de uma nação. Como parte integrante da rede viária, os pavimentos asfálticos estão fortemente associados aos fatores acima mencionados, uma vez que o aumento da construção de rodovias e a necessidade de manutenções e reconstruções impõe uma pressão considerável sobre matérias-primas de construção, especialmente agregados naturais e ligante asfáltico (GAO et al, 2017; CAMARGO, 2018).

Diante desse cenário, pesquisadores, engenheiros e profissionais em infraestrutura de transporte têm se empenhado em inovações denominadas sustentáveis para economizar recursos naturais e recursos financeiros globais (PODOLSKY et al, 2020; FANG et al., 2021; GEDIK, 2021; MELO NETO, 2022).

Entretanto, observa-se que o conceito de sustentabilidade utilizado na indústria da pavimentação é geralmente visto apenas como um problema de alocação de recursos entre consumo e investimento. Ou seja, a escassez crescente de determinado bem ou serviço ambiental tende a elevar o seu preço, o que induz a introdução de inovações poupadoras deste

bem ou serviço, seja pelo aumento na eficiência no seu uso, seja pela sua substituição por outro recurso mais abundante (MAY, 2010).

Observa-se que na indicação ou adoção dessas alternativas pouco se enfatiza sobre uma compreensão mais aprofundada dos danos aos ecossistemas, à saúde humana, à disponibilidade de recursos dentro dos limites da capacidade de suporte do planeta e aos impactos nos recursos sociais e monetários.

Sobre esse quesito, Romeiro (2010) destaca que a definição real de sustentabilidade indica a necessidade da criação de condições socioeconômicas, institucionais e culturais que estimulem não apenas um rápido progresso tecnológico poupador de recursos naturais, mas também uma mudança em direção a padrões de consumo que não impliquem num crescimento contínuo e ilimitado do uso de recursos *per capita*.

Outro ponto é que o sistema de pavimentos asfálticos compreende tanto os fluxos de entrada – a energia e os insumos oriundos diretamente da natureza ou de outros processos produtivos – como também os fluxos de saída – produtos finais (misturas asfálticas), resíduos e poluição.

A construção, uso e manutenção dessas estruturas demandam a utilização intensiva de energia e de recursos naturais e tem um impacto significativo nas emissões de gases do efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO₂), que está correlacionado com as mudanças do clima. Estima-se que, para produzir uma tonelada de mistura asfáltica à quente, seja necessário um consumo médio de energia de 99 KWh (356 MJ) e sejam gerados 23,8 kg de CO₂ (THIVES e GHISI, 2017; HU et al., 2019; PLATI, 2019)

Segundo dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) e da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2015) o setor de transporte é responsável por aproximadamente 15% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), enquanto a produção de material de pavimentação e os processos industriais relacionados estão envolvidos no setor industrial, que é responsável por 21% das emissões globais de GEE.

Destaca-se ainda a perda de oportunidades econômicas nos casos de não valorização das misturas asfálticas no fim da vida útil dos pavimentos (MASCARENHAS et al., 2023), uma vez que os materiais resultantes do desbastamento dessas estruturas ainda possuem valor agregado e podem ser reciclados e a própria reciclagem pode induzir à geração de oportunidade.

Nesse sentido, entende-se que além do uso exacerbado de recursos naturais, a produção de misturas asfálticas gera poluição e um montante de resíduos que causam impactos prejudiciais às diversas formas de vida e à saúde humana, além de deteriorar o meio ambiente de várias maneiras.

Segundo Romeiro (2010) os resíduos dos processos econômicos estão se revelando um problema que antecede a escassez de recursos, devido ao seu acúmulo e visibilidade na superfície.

Diante do exposto, percebe-se a urgência da necessidade de aplicação do desenvolvimento sustentável na infraestrutura rodoviária.

Ressalta-se que a abordagem do desenvolvimento sustentável engloba a definição de suas dimensões, que podem ser inúmeras, mas que normalmente se restringem a três – econômica, social e ambiental. Portanto, operar na sustentabilidade consiste em manter um equilíbrio desses três pilares: o econômico refere-se às consequências financeiras das ações da empresa entre as partes interessadas; o social, ao papel desempenhado na manutenção e melhoria do sistema em matéria de direitos e responsabilidades, geração de empregos e benefícios para a população; e o ambiental aborda a melhor forma de conservar e gerir os recursos naturais (LITTLE et al., 2016; MAGDALENO e NÓBREGA, 2016).

Na indústria da pavimentação, o resultado da interseção dessas três dimensões está nas mudanças dos padrões tecnológicos e processos adotados, principalmente por meio da transição do modelo de economia linear para um modelo circular.

Segundo Beuren (2013) e MacArthur (2015) as vantagens da economia circular para o atendimento ao conceito de sustentabilidade estão relacionadas, por exemplo, ao impacto no crescimento econômico, a preservação de recursos naturais, a economia de custos de materiais, mitigação da volatilidade dos preços e riscos de oferta, crescimento do emprego em determinados serviços que possam surgir com a mudança de práticas e resiliência do mercado de trabalho.

De acordo com Carvalho e Barcellos (2010) a sustentabilidade é imensurável porque não existe uma definição universalmente aceita que possa ser aplicada a todas as situações, e que não seja excessivamente genérica e pouco precisa. Mas existem métodos de avaliação ambiental e índices que auxiliam os tomadores de decisão a optarem por práticas que mais se aproximem do conceito sustentável.

Nessas perspectivas, no âmbito da análise dos impactos ambientais de um produto ao longo de toda a sua cadeia de valor tem se destacado a avaliação do ciclo de vida (ACV)

Índices, composto por um conjunto de indicadores que reflitam o uso de recursos naturais, geração de resíduos, eficiência das diferentes alternativas de processos produtivos e duração da funcionalidade de um produto, podem comunicar até que ponto o fluxo linear é minimizado e o fluxo restaurador é maximizado. Além disso, podem trazer reflexões sobre a geração de empregos e mudanças sociais, pois processos de produção adicionais em uma economia circular (por exemplo, reforma ou reciclagem) exigem mais trabalho humano e podem criar oportunidades de emprego.

Sobre os impactos nos recursos monetários, uma avaliação dos custos do ciclo de vida pode conduzir a decisões mais assertivas na direção da sustentabilidade econômica.

Portanto, a união de uma avaliação das fases do ciclo de vida de um produto e do seu custo, bem como a quantificação da sua circularidade podem auxiliar nos processos decisórios sobre quais alternativas de produtos estão mais próximas do conceito real de sustentabilidade.

2.8.1 Economia circular para misturas asfálticas com RAP

A economia circular (EC) é uma abordagem que surgiu devido à necessidade de fornecer uma resposta concreta para o conceito de desenvolvimento sustentável (MURRAY et al. 2017; CORONA et al. 2019; SAIDANI et al. 2019).

Ao contrário de uma economia linear, onde materiais virgens são retirados da natureza e usados para fazer produtos que são consumidos e eventualmente descartados, a EC é restauradora e visa manter produtos, componentes e materiais em sua maior utilidade e valor, em todos os momentos (MACARTHUR, 2019).

A indústria da engenharia rodoviária tem buscado abordagens mais circulares e a reciclagem de pavimentos aparece como uma prática que segue os princípios da economia circular, prolongando a vida útil de seus ativos (manutenção preventiva), reduzindo o consumo de recursos naturais, reutilizando matérias-primas e aproveitando o RAP em novos pavimentos (IGRASSIA et al., 2017; GEORGIU e LOIZOS 2021; PASANDÍN et al., 2022). No entanto, as discussões sobre a medição da eficácia da transição do modelo linear para o modelo circular ainda são escassas e poucos estudos na área da pavimentação têm se dedicado ao estabelecimento de indicadores de circularidade para avaliar o desempenho de misturas asfálticas no contexto de uma economia circular.

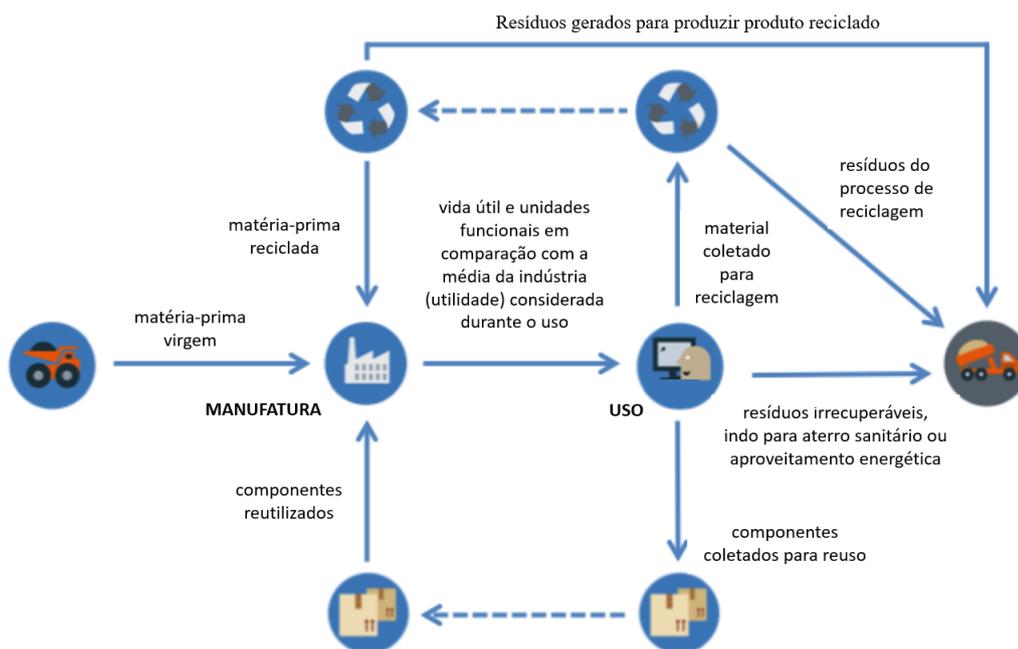
A pesquisa de Mantalovas e Di Mino (2019), um desses estudos, propôs um Índice de Circularidade do Material, baseado na metodologia proposta pela Ellen MacArthur Foundation (2019), adaptado para o contexto de misturas asfálticas contendo RAP.

A metodologia de MacArthur (2019) propõe um índice principal para um produto, o Índice de Circularidade do Material (ICM), que mede até que ponto o fluxo linear foi minimizado e o fluxo restaurador foi maximizado para seus materiais componentes, e por quanto tempo e intensidade o produto é usado em comparação com um outro similar médio da indústria. Esse ICM proposto engloba indicadores complementares (quantidade de resíduos, índice de fluxo linear e fator de utilidade) que permitem considerar impactos e riscos adicionais.

Segundo MacArthur (2019) o ICM proposto é essencialmente construído a partir de uma combinação de três características do produto: a massa de matéria-prima virgem utilizada na fabricação, a massa de resíduos irrecuperáveis que é atribuído ao produto, e um fator de utilidade que explica a duração e a intensidade de uso do produto.

A Figura 15 resume as diferentes variáveis que influenciam o Índice de Circularidade do Material proposto por MacArthur (2019). As linhas tracejadas indicam que a metodologia não requer um circuito fechado. Isso quer dizer, por exemplo, que a matéria-prima reciclada não precisa ser proveniente do mesmo produto, mas pode ser obtida no mercado.

Figura 15 - Variáveis que influenciam no ICM



Fonte: Adaptado de MacArthur (2019)

Qualquer produto fabricado utilizando apenas matéria-prima virgem e que acabe em aterro sanitário na fase final de sua vida pode ser considerado um produto totalmente linear (ICM = 0). Por outro lado, qualquer produto que não contém matéria-prima virgem, é totalmente coletado para reciclagem ou para reutilização de componentes, e onde a eficiência de reciclagem é de 100% pode ser considerado um produto totalmente circular (ICM = 1).

O ICM adaptado por Mantalovas e Di Mino (2019) para o contexto de misturas asfálticas recicladas também foi construído a partir da combinação das três características do produto, citadas anteriormente. Os autores propuseram ajustes nas equações apresentadas por MacArthur (2019) que refletissem a realidade da composição das misturas asfálticas recicladas.

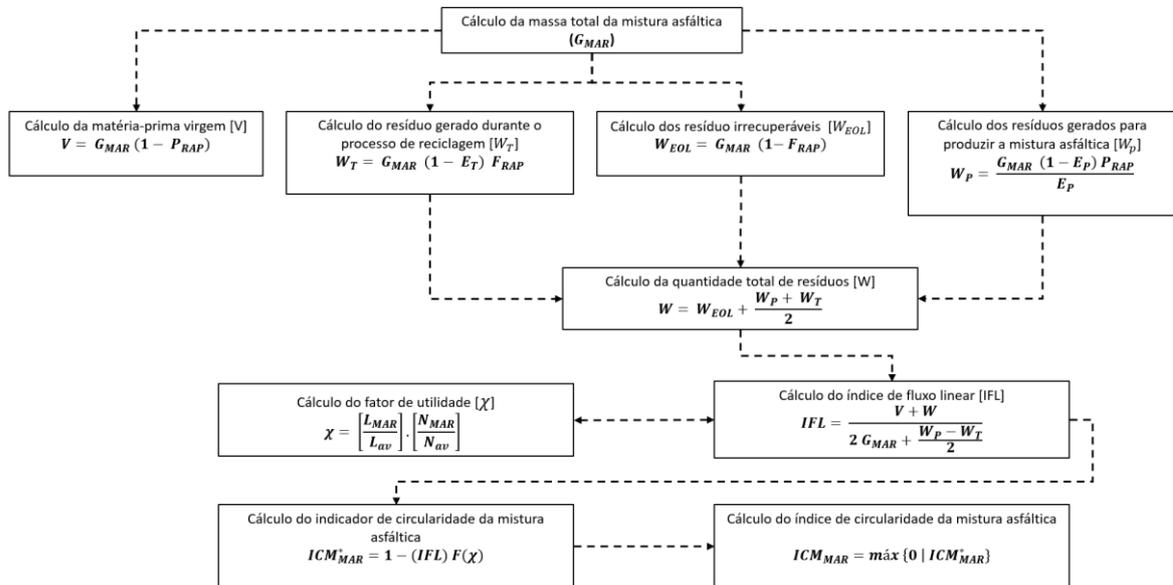
O Quadro 6 apresenta as principais adaptações feitas por Mantalovas e Di Mino (2019) em comparação com a metodologia de MacArthur (2019) e a Figura 16 mostra o fluxograma indicando os parâmetros/entradas necessárias para o cálculo do ICM_{MAR} proposto por Mantalovas e Di Mino (2019).

Quadro 6 - Comparativo da metodologia de MacArthur (2019) e Mantalovas e Di Mino (2019)

Parâmetros	MacArthur (2019)	Mantalovas e Di Mino (2019)
Matéria-prima virgem	$V = M(1 - F_R - F_U - F_S)$ Onde: M= massa total de um produto F_R = fração de massa de matéria-prima derivada de fontes recicladas F_U = fração de massa de matéria-prima derivada de fontes reutilizadas F_S = fração de massa de matéria-prima biológica derivada de produção sustentável	$V = G_{MAR}(1 - P_{RAP})$ Onde: G_{MAR} = massa total de uma mistura asfáltica recicladas, composta de uma fração de massa do pavimento desmontado (G) mais uma fração de massa de matéria prima virgem (V). P_{RAP} = fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas, expressa como uma razão entre a massa do produto final e a massa do RAP
Resíduos gerados durante o processo de reciclagem	$W_c = M(1 - E_c)C_R$ Onde: M= massa total de um produto E_c = eficiência do processo de reciclagem usado para a parte de um produto coletado para a reciclagem C_R = fração de massa de um produto sendo coletado para entrar em um processo de reciclagem	$W_T = G_{MAR}(1 - E_T)F_{RAP}$ Onde: G_{MAR} = massa total de uma mistura asfáltica recicladas E_T = eficiência do processo de reciclagem na fase 1(tratamento do RAP) F_{RAP} = fração do produto coletado para a reciclagem no final da vida útil do pavimento
Resíduos irre recuperáveis	$W_o = M(1 - C_R - C_U - C_C - C_E)$ Onde: M= massa total de um produto C_R = fração de massa de um produto sendo coletado para entrar	$W_{EOL} = G_{MAR}(1 - F_{RAP})$ Onde: G_{MAR} = massa total de uma mistura asfáltica recicladas F_{RAP} = fração do produto coletado

	<p>em um processo de reciclagem</p> <p>C_U= fração de massa de um produto sendo coletado para a reutilização de componentes</p> <p>C_C= fração de massa de um produto sendo coletado para um processo de compostagem</p> <p>C_E= fração de massa de um produto sendo coletado para recuperação de energia</p>	<p>para a reciclagem no final da vida útil do pavimento</p>
Resíduos gerados para produzir produto reciclado	$W_F = \frac{M(1 - E_F)F_R}{E_F}$ <p>Onde: M= massa de um produto E_F= eficiência do processo de reciclagem usado para produzir o produto reciclado F_R= fração de massa de matéria-prima derivada de fontes recicladas</p>	$W_P = \frac{G_{MAR}(1 - E_P)P_{RAP}}{E_P}$ <p>Onde: G_{MAR}= massa total de uma mistura asfáltica recicladas E_P = eficiência do processo de reciclagem na fase 2 (produção de mistura asfáltica reciclada) P_{RAP} = fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas</p>
Quantidade total de resíduos	$W = W_o + \frac{W_F + W_C}{2}$	$W = W_{EOL} + \frac{W_P + W_T}{2}$
Índice de fluxo linear	$IFL = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$	$IFL = \frac{V + W}{2G_{MAR} + \frac{W_P - W_T}{2}}$
Fator de utilidade	$\chi = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{av}}\right)$ <p>Onde: L= vida útil média real do produto final L_{AV}= vida útil média real de um produto médio da indústria U = número de unidades funcionais alcançadas durante o uso de um produto U_{av} = número de unidades funcionais alcançadas durante o uso de um produto médio</p>	$\chi = \left(\frac{L_{MAR}}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{N_{MAR}}{N_{av}}\right)$ <p>Onde: L_{MAR}= vida útil média real da mistura recicladas L_{AV}= vida útil média real da mistura de referência N_{MAR} = o número médio de ciclos de carregamento antes da falha, em termos de fadiga ou deformação, alcançado pela mistura recicladas N_{AV} = o número médio de ciclos de carregamento antes da falha, em termos de fadiga ou deformação, alcançado pela mistura de referência.</p>

Figura 16 - Metodologias para a determinação do ICM_{MRA} proposta por Mantalovas e Di Mino (2019)



Fonte: Adaptado de Mantalovas e Di Mino (2019)

Segundo Mantalovas e Di Mino (2019), para evitar um valor negativo do potencial de circularidade do produto final, que pode acontecer quando os produtos apresentarem fluxos principalmente lineares ($IFL \approx 1$) e uma utilidade pior do que a do produto médio ($\chi < 1$), o ICM_{MAR} é estabelecido comparando e escolhendo o maior valor entre zero e ICM_{MAR}^* .

No cálculo do ICM_{MAR}^* o parâmetro $F(\chi)$ é uma função hiperbólica equilátera ($X \cdot Y = K$) do fator de utilidade com constante K igual a 0,9. A configuração $K=0,9$ garante que o ICM_{MAR}^* assuma, por convenção, o valor 0,1 para um produto totalmente linear ($IFL = 1$) cuja utilidade é igual à média da indústria ($\chi = 1$).

De acordo Mantalovas e Di Mino (2019) um aspecto crítico do processo de aquisição e utilização dos dados necessários é a definição do fator de utilidade (χ). Pela metodologia de Ellen MacArthur Foundation, o fator de utilidade é uma função da vida útil média real do produto final (L), da vida útil média real de um produto médio da indústria (L_{av}), do número de unidades funcionais alcançado durante o uso do produto final (U) e do número de unidades funcionais alcançado durante o uso de um produto médio da indústria (U_{av}), sendo calculado pela Equação 7. Segundo MacArthur (2019) a unidade funcional é uma medida do uso do produto, por exemplo, pode ser um quilômetro percorrido para um carro, ou um ciclo de lavagem para uma máquina de lavar.

$$\chi = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{av}}\right) \quad Eq.7$$

A quantificação do fator de utilidade (χ) na metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019) para misturas asfálticas recicladas assume L e L_{av} igual a 1 e incorpora dois tipos de desempenhos mecânicos como unidades funcionais: a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente. O cálculo desse fator segue a Equação 8:

$$\chi = \left(\frac{L_{MAR}}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{N_{MAR}}{N_{av}}\right) \quad Eq.8$$

Onde:

L_{MAR} = vida útil média real do produto final (mistura recicladas)

L_{AV} = vida útil média real de um produto médio da indústria (mistura de referência)

N_{MAR} = o número médio de ciclos de carregamento antes da falha, em termos de fadiga ou deformação, alcançado pelo produto final (mistura recicladas)

N_{AV} = o número médio de ciclos de carregamento antes da falha, em termos de fadiga ou deformação, alcançado por um produto médio da indústria (mistura de referência)

Para esses autores, ao considerar ambos os desempenhos mecânicos, amplamente aceitos como direcionadores do projeto de misturas asfálticas, o fator de utilidade torna-se capaz de descrever o comportamento das misturas asfálticas durante sua vida útil.

Neste ponto, vale ressaltar que para maior utilidade da mistura asfáltica reciclada, é preferível que para o mesmo valor de microdeformação seja alcançada uma maior quantidade de ciclos de carregamento em relação à resistência à fadiga das misturas asfáltica de referência, enquanto que para a resistência à deformação permanente, a profundidade de deformação inferior para misturas asfálticas recicladas, em comparação com a de referência, é preferida para a mesma quantidade de ciclos de carregamento. Segundo Mantalovas e Di Mino (2019) as fórmulas que são utilizadas para o cálculo dos parâmetros de desempenho dos fatores de utilidade são as seguintes (Equação 9 e 10):

$$P_F = \frac{F}{F'_{av}} \quad Eq.9$$

$$P_{PD} = \frac{1}{\frac{DP'}{DP_{av}}} \quad Eq.10$$

Onde

F = número de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga da mistura asfáltica reciclada

F'_{av} = número de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga da mistura asfáltica de referência

DP' = deformação permanente da mistura asfáltica em um determinado número de ciclos de carregamento

DP_{av} = deformação permanente da mistura asfáltica de referência em um determinado número de ciclos de carregamento

Desta forma, o fator de utilidade pode ser resumido como o produtório desses desempenhos quantificados, conforme Equação 11:

$$\chi = \prod_{i=1}^n [Pi] \quad Eq.11$$

De acordo com os estudos de Rigamonti e Mancini (2021), apesar dos índices de circularidade serem mais fáceis de comunicar, podendo seus altos valores aumentar a confiança entre as partes interessadas e atrair financiamento, não é recomendado que sejam usados isoladamente para escolher a melhor opção em projetos de economia circular. Isso porque fornecem apenas uma visão parcial do desempenho ambiental de um sistema.

Conforme Helander et al. (2019) é importante explorar como a EC afeta a sustentabilidade ambiental por duas razões principais: o risco de troca de problemas e efeitos rebotes que estão diretamente ligados a questões ambientais. Segundo Peña et al. (2021) ainda não há um método harmonizado para avaliar se uma prática específica de EC contribui para tornar padrões de consumo e produção mais sustentáveis, mas a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma alternativa muito adequada para aferir os impactos de sustentabilidade das estratégias de EC.

2.8.2 Avaliação do Ciclo de Vida

A crescente conscientização sobre a importância da proteção ambiental e dos possíveis impactos associados a produtos manufaturados e consumidos tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender os resultados das intervenções ao meio ambiente.

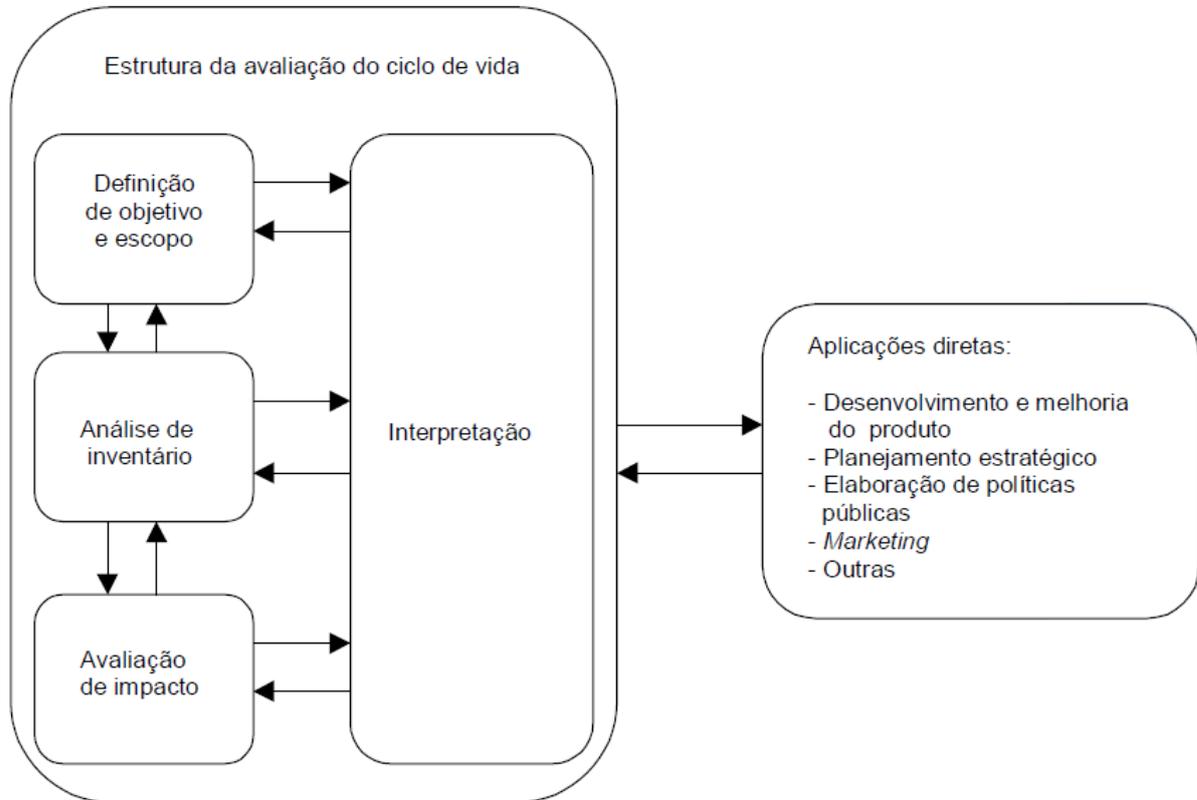
A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem se consolidado como uma ferramenta importante para o entendimento do desempenho ambiental de produtos e processos por meio da compilação de entradas (insumos energéticos e materiais relevantes), saídas (emissões ambientais) e seus potenciais impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida. Essa abordagem sistemática garante a atribuição precisa de um possível ônus ambiental à fase apropriada do ciclo de vida ou processo individual (PETRILLO et al, 2016; OSMANI et al., 2017).

A ACV é uma técnica padronizada internacionalmente e inserida nas normas da série *International Organization for Standardization (ISO) 14000*, mais especificadamente na ISO 14.040/2006 e na ISO 14.044/2006. No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), representante da ISO, adaptou às terminologias brasileiras na norma NBR ISO 14040/2009 que especifica a estrutura geral, princípios e requisitos para conduzir e relatar estudos da avaliação do ciclo de vida.

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) a ACV considera todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas, através da produção de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final. Com base em tal visão e perspectiva sistemáticas, a transferência de impactos ambientais potenciais entre estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser identificada e possivelmente evitada.

Segundo esta norma, a ACV deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados, conforme ilustrado na Figura 17 e resumido a seguir.

Figura 17 - Fases de um ACV



Fonte: NBR ISO 14040 (ABNT, 2009)

Conforme normatizado na NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), em síntese, na primeira fase da ACV são definidos o escopo e os objetivos do estudo, sendo também delimitados a unidade funcional, os processos envolvidos, a fronteira do sistema, as características dos dados necessários ao estudo, o tipo de coleta de dados, os tipos de impacto, a metodologia de avaliação de impacto e as limitações da análise.

A segunda fase, que compreende a análise de inventário de ciclo de vida (ICV), abrange a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto, incluindo recursos, energia, subprodutos e demais aspectos ambientais considerados importantes para o ciclo de vida.

A terceira fase é a avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) e consiste na classificação e caracterização das entradas e saídas do inventário. O nível de detalhe, a escolha das categorias de impactos avaliadas e as metodologias usadas dependem do objetivo e do escopo do estudo.

A etapa final é a de interpretação do ciclo de vida, em que serão realizadas recomendações de melhorias e tomadas de decisão a respeito da escolha do produto.

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), o limite ou fronteira do sistema para uma ACV deve destacar as principais fases do ciclo de vida do produto que se pretende analisar.

A fronteira normalmente inclui processo elementares para matérias-primas, entradas e saídas da sequência primária de produção/fabricação/processamento, distribuição, uso e manutenção do produto, descarte de resíduos de processo e produtos usados, recuperação de produtos usados (incluindo reutilização, reciclagem e recuperação de energia), produção e uso de combustíveis, eletricidade e calor, fabricação de materiais auxiliares, fabricação, manutenção e desativação de equipamentos de capital, iluminação e aquecimento (ABNT, 2009; OSMANI et al., 2017).

2.8.2.3 Avaliação do Ciclo de Vida para misturas asfálticas com RAP

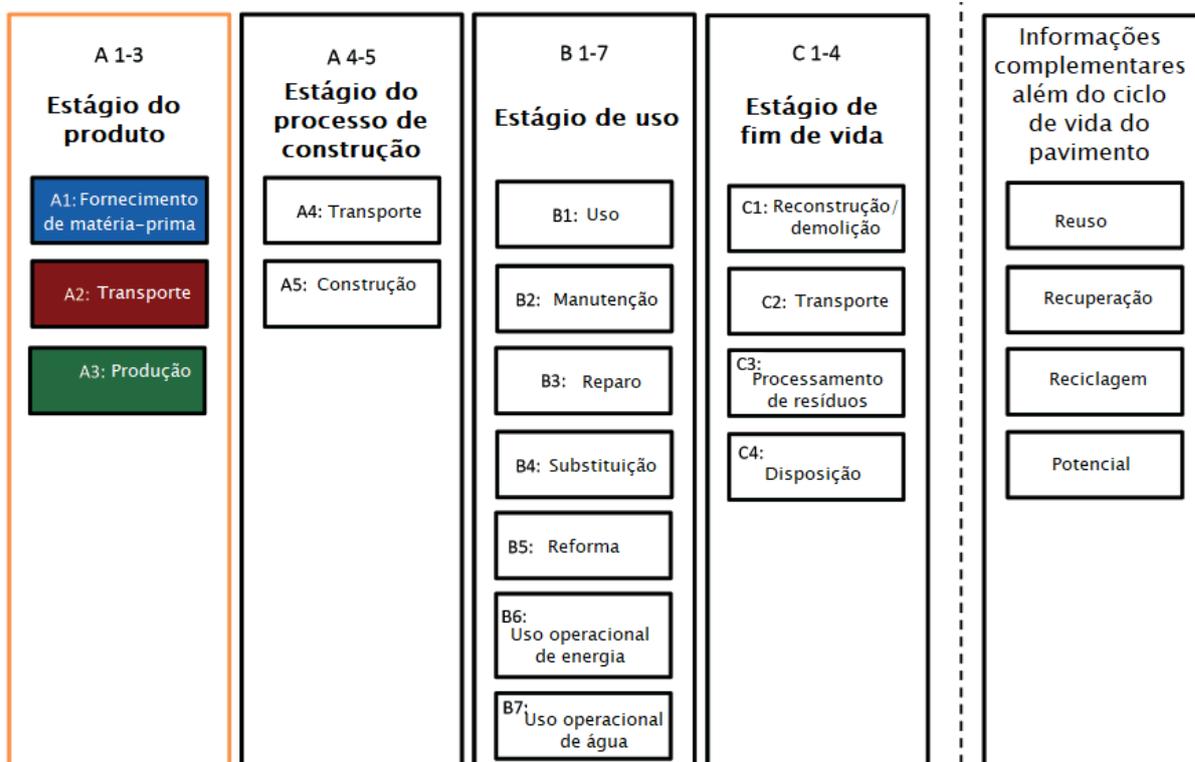
Devido aos diversos impactos ambientais causados pela indústria da infraestrutura de transportes, que afetam os ecossistemas, a saúde humana e a disponibilidade de recursos naturais, a *Environmental Protection Agency* (EPA, 2017) sugere a ACV como técnica para avaliação de projetos e produtos relacionados a essa área.

Na ACV a quantificação dos impactos ambientais acontece mediante a definição do sistema do produto, composto por um encadeamento de processos elementares, com fluxos de entradas e saídas. Portanto, a ACV de produtos da construção civil, onde estão incluídos os da infraestrutura rodoviária, considera um esquema modular dos conjuntos de informações dos sistemas a partir dos dados da cadeia produtiva.

As informações modulares comumente usadas para avaliações de ciclo de vida de produtos da construção civil, incluindo os pavimentos, estão mostradas na Figura 18 (ISO, 2017; EAPA, 2017).

O estágio do produto (módulos A1 a A3) compreende as informações de fornecimento e obtenção de matéria-prima, transporte desses materiais e fabricação. O estágio do processo de construção (módulos A4 a A5) inclui as informações desde o transporte até o canteiro de obras e da instalação/construção. O estágio de uso/operação (módulos B1 a B7) contém os dados do impacto do produto de construção durante seu uso, operação e manutenção, incluindo as situações de transporte necessárias. O estágio de fim de vida (módulos C1 a C4) reúne as informações das alternativas adotadas para o produto no final da sua vida útil, incluindo os transportes.

Figura 18 - Diagrama de designações de informações modulares usadas para avaliações de ciclo de vida para pavimentos, segundo EAPA (2017).



Fonte: Adaptado de EAPA (2017)

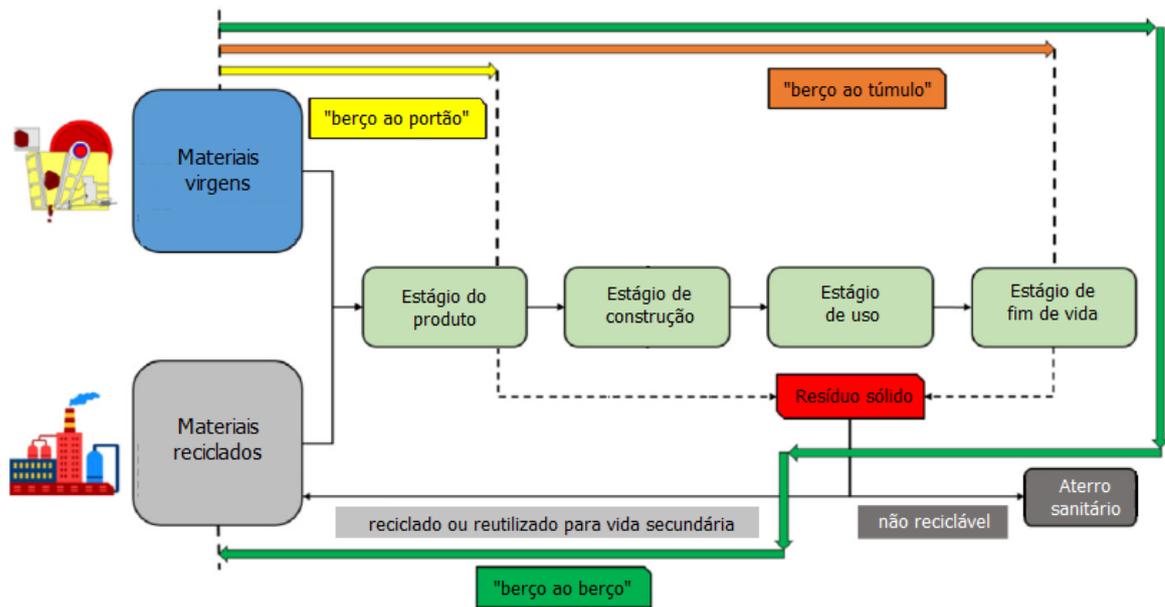
Diversos estudos têm destacado, por meio da ACV, que a adoção da prática de reciclagem do RAP gerado pelo desbastamento do pavimento no final da sua vida útil certamente contribui para a redução dos impactos ambientais (YANG et al., 2015; PRATIC et al., 2020; VANDEWALLE et al., 2020; ABDALLA et al., 2022; HASAN et al., 2022), tendo o potencial de substituir recursos não renováveis e de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o excessivo consumo de matéria-prima e energia (FARINA et al. 2017, WANG et al. 2018).

Segundo Xiao et al. (2019) e NAPA (2022) existem três tipos de abordagens de ACVs aplicáveis aos pavimentos rodoviários, detalhados a seguir e ilustradas na Figura 19:

- a) ACV “do berço ao portão” (“*cradle-to-gate*”), que só considera os impactos desde a extração da matéria-prima (berço), produção até o portão de fábrica. O portão é definido como o ponto no qual a mistura asfáltica é transferida da usina para um caminhão que realizará o transporte até o cliente.
- b) ACV “do berço ao túmulo” (“*cradle-to-grave*”), inclui os impactos da extração de matéria-prima, produção do material, produto final saindo da fábrica, utilização, manutenções e demolição

- c) ACV “do berço ao berço” (“*cradle-to-cradle*”), que é um ACV de circuito fechado em que os resíduos sólidos (subprodutos de pavimentação) gerados na fase de construção e no fim da vida útil são reciclados ou reutilizados na produção de um novo material (berço) e tem um ciclo de vida secundário ao invés de serem levados para aterros.

Figura 19 - Diagrama dos três ACVs de pavimentos



Fonte: Adaptado de Xiao et al. (2019)

No âmbito da pavimentação a ACV tem sido utilizada com distintos objetivos, dependendo da fronteira adotada, das hipóteses feitas, dos indicadores e das categorias de impacto analisadas e dos métodos de avaliação adotados.

Yang et al. (2015) realizaram um estudo para a avaliação dos benefícios ambientais e econômicos e das compensações da inclusão de RAP e RAS (*recycled asphalt shingle*) em misturas asfálticas, usando uma abordagem de ciclo de vida. Onze projetos de mistura asfálticas com 0% a 50% de conteúdo reciclado foram analisadas. Os autores examinaram o potencial de aquecimento global (GWP) e demanda cumulativa de energia (CED) e identificaram que os principais contribuintes para esses impactos são as operações da usina, a produção de ligante asfáltico e a produção e transporte de agregados. Ao comparar as dez misturas asfálticas recicladas com a mistura de controle produzida apenas com materiais virgens, os autores observaram diminuições na CED e no GWP. Yang et al. (2015)

constatarem que as maiores reduções de impactos ambientais ocorreram com as misturas com 42% RAP e 6% RAS, que incorreu em 80% da CED e 78% do GWP da mistura de referência.

Pratico et al. (2020) realizaram um comparativo dos impactos ambientais, utilizando o método ILCD midpoint 2011, de uma camada de rolamento de pavimento rodoviário composta por uma mistura asfáltica a quente, uma mistura asfáltica produzida a uma temperatura de 140–150 °C, com 45% de RAP usado em substituição aos agregados graúdos, e uma mistura asfáltica quente tradicional produzida em temperaturas mais altas.

Para todos os cenários considerados, os autores avaliaram a influência de cada fase do ciclo de vida nos impactos globais com o objetivo de identificar as fases e processos que produziam os maiores impactos. Os resultados mostraram que a produção de materiais envolve a maior contribuição (cerca de 60-70%) em todas as categorias de impacto examinadas. Os resultados também mostraram que a combinação de WMA e RAP permite reduzir o consumo de energia, ligante virgem e agregados, causando uma diminuição de 19, 14 e 8% dos indicadores de exigência de energia global, mudanças climáticas e potencial de acidificação, respectivamente, em comparação com a mistura asfáltica tradicional.

Vandewalle et al. (2020) realizaram uma análise comparativa em um trecho de um pavimento rodoviário por meio de diferentes cenários, que derivaram da combinação das atividades de produção, construção e reabilitação incorporando diferentes taxas de RAP em novas misturas asfálticas: 0% (como referência), 25%, 50%, 75% e 100%, respectivamente.

Os resultados da ACV foram expressos em termos de quatro categorias de danos: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos e mostraram que tanto as misturas asfálticas recicladas apresentaram vantagens em comparação com mistura asfáltica de referência. Os benefícios crescem com o aumento da taxa de RAP com redução média de 19%, 23%, 31% e 33% em todas as categorias de impacto para uma quantidade de 25%, 50%, 75% e 100% de RAP, respectivamente.

Abdalla et al. (2022) estudaram a utilização de seis porcentagens de RAP (0%, 15%, 30%, 50%, 80% e 100%) em misturas asfálticas e verificaram uma redução dos impactos ambientais com a incorporação do material fresado às misturas.

Devido aos problemas comuns nas misturas asfálticas contendo altas taxas de RAP, a exemplo da elevada rigidez, trincamento precoce, fadiga prematura e sensibilidade a água (ZAUMANIS e MALLICK, 2014; BOWERS et al., 2013; AL-QUADI et al., 2015; SENGOZ e OYLUMLUOGLU, 2013; SONG et al., 2018; BAŃKOWSKI 2018; DAI LU e SALEH, 2016), aditivos geralmente são utilizados no intuito de garantir que essas misturas atendam

aos requisitos mínimos de desempenho mecânico. O aditivo adotado se configurará como mais um componente da mistura, que poderá contribuir para as cargas ambientais do ciclo de vida do produto final.

Sendo assim, é importante que a avaliação do ciclo de vida das misturas asfálticas recicladas contemple as entradas relacionadas aos aditivos utilizados e as emissões associadas a estes, permitindo uma análise mais aprofundada de cenários e favorecendo a implementação de medidas mais adequadas para promover a minimização dos impactos ambientais nos sistemas dos produtos de interesse.

Hasan et al. (2022) realizaram um ACV analisando os fluxos de entradas e saídas ambientais da construção de um trecho de rodovia de mão dupla com 3,5 km de comprimento localizada em Abu Dhabi, em Emirados Árabes Unidos.

Os autores compararam um padrão construtivo convencional com diferentes alternativas de construção com a inclusão de taxas diferentes de RAP: %RAP na camada de desgaste (alternativa A1), %RAP na camada de base e na camada de ligação (alternativa A2), %RAP na camada de base, na camada de ligação e na camada de desgaste (alternativa A3). Os teores de RAP avaliados foram de 10, 15 e 25% e o período de projeto utilizado foi de 30 anos (2015–2045). As obras rodoviárias foram modeladas no SimaPro v8.5.2, método ReCiPe midpoint, sendo avaliadas as seguintes categorias de impacto: aquecimento global, destruição do ozônio, radiação ionizante, saúde humana, formação de material particulado, ecossistemas terrestres, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, toxicidade cancerígena, toxicidade não cancerígena, uso da terra, escassez de recursos minerais, escassez de recursos fósseis e consumo de água

Na alternativa A1 com 10% de RAP, os impactos ambientais globais foram ligeiramente reduzidos. A redução mais significativa (~3,24%) foi observada no consumo de energia. Os impactos da categoria de uso da terra também diminuíram de 169.722,38 m²a eq. para 164.396,39 m²a eq. de cultivo, correspondendo a uma redução de 3,14%. Por outro lado, na alternativa A2 com 10% de RAP foi observada uma redução de energia de 3,6%.

A alternativa A3 com 10% de RAP demonstrou redução mais acentuada no uso da terra (6%), consumo de energia (4,5%), radiação ionizante (4%), destruição de ozônio (4%) e potencial de aquecimento global (3%).

A alternativa A1 com 15% de RAP o potencial de aquecimento global diminuiu em 2,69%, a destruição do ozônio em 4,36%, o uso do solo em 4,71% e consumo de energia em

4,86%. A alternativa A2 com 15% de RAP apresentou um desempenho ligeiramente melhor em termos de redução do impacto ambiental.

A alternativa A3 com 15% de RAP demonstrou que uma redução de aproximadamente 10% na categoria uso da terra, e de 7% no consumo de energia. A menor redução foi para toxicidade não cancerígena, com 0,6% de diferença em relação ao padrão construtivo convencional.

2.8.3 Avaliação do Custo do Ciclo de Vida

Segundo Petrillo et al. (2016) a dimensão econômica, baseada na abordagem da Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV), é um balanço de todos os custos associados ao ciclo de vida de um sistema de produto, durante um período de análise, que são diretamente cobertos por um ou mais atores envolvidos. Tem como objetivo estimar, avaliar e gerenciar os custos de cada fase do ciclo de vida, desde a concepção até a destinação final.

Ao contrário da ACV, não há um único padrão ISO para a ACCV. Miah e Stone (2017) salientam que existem vários padrões e guias sobre como conduzir uma ACCV para diferentes contextos (ISO 15626-5/2017; PKN, 2006; IEC 60300-3-3/2004). Eles, normalmente, cobrem estágios de custo, estimativa de custos e análise de risco/sensibilidade.

Hunkeler et al. (2007) explicam que a ACCV pode ser de três tipos, dependendo da sua abordagem: ACCV convencional, ACCV ambiental e ACCV social. As principais diferenças entre eles estão apresentadas no Quadro 7.

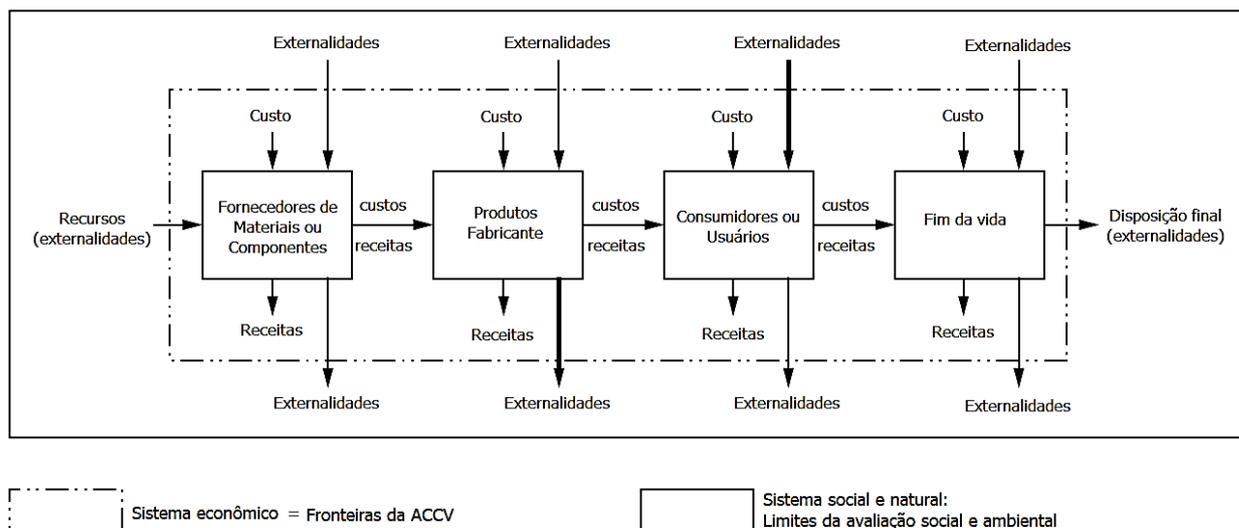
A ACCV convencional é menos abrangente em escopo, pois exclui a fase do fim de vida. A ACCV ambiental usa fronteiras e unidades funcionais equivalentes aos da ACV, podendo ser vistas como análises complementares, onde indicadores de pontuação única não são empregados e os resultados finais são apresentações de portfólio dos custos do ciclo de vida combinados com os principais impactos ambientais do ciclo de vida. A ACCV social visa incluir todos os efeitos ambientais (e sociais) e, portanto, é um método autônomo não acompanhado por uma ACV ou uma avaliação social adicional (HUNKELER et al., 2007).

A Figura 20 ilustra a estrutura conceitual da ACCV ambiental, em termos de custos considerados na análise. Na sequência, serão explicados os custos internos e externos que podem estar incluídos numa ACCV, de acordo com Hunkeler et al. (2007).

Quadro 7 - Abrangência dos três tipos de ACCV

Aspecto	ACCV convencional	ACCV ambiental	ACCV social
Valor agregado em comparação com ACCV convencional	-	Avaliação ambiental consistente (LCA) ao mesmo tempo e abordagem consistente para avaliações de sustentabilidade de produtos	Custos de oportunidade ou créditos considerados
Sistema de produto (modelo)	Ciclo de vida, sem a fase do fim da vida útil (e às vezes sem a fase de uso) se não suportado pelo ator principal	Ciclo de vida completo	Ciclo de vida completo
Limites do sistema	Apenas custos internos	Custos internos, mais custos externos que se espera que sejam internalizados	Interno mais todos os custos de externalidades
Perspectivas: atores	Principalmente um ator, seja o fabricante ou o usuário ou consumidor	Um ou mais atores ligados ao ciclo de vida do produto, principalmente fabricantes, cadeia de suprimentos e usuário final ou consumidor	Sociedade em geral, incluindo governos
Unidade de referência	Item ou produto	Unidade Funcional	Sistema
Categorias de custo	Principalmente custos de aquisição (custos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e custos de investimento) e custos de propriedade (custos operacionais, talvez custos de descarte)	Principalmente custos de desenvolvimento, materiais, energia, máquinas, mão de obra, gerenciamento de resíduos, controles de emissão, transporte, manutenção e reparo, responsabilidade, impostos e subsídios	Principalmente custos de construção, manutenção e danos ambientais; impostos e subsídios não têm efeito de custo líquido
Modelo de curso	Modelo geralmente quase dinâmico	Modelo de estado estacionário	Modelo geralmente quase dinâmico
Use no gerenciamento do ciclo de vida (LCM)	Principalmente tomada de decisão interna para organização privada e considerações da cadeia de suprimentos	Principalmente tomada de decisão interna do produtor ou usuário do produto, mas também para comunicação externa (semelhante ao LCA)	Principalmente interno para organizações públicas

Figura 20 - Estrutura conceitual da ACCV ambiental



Fonte: Adaptado de Rebitzer e Hunkeler (2003)

Os custos internos ao longo do ciclo de vida de um produto (dentro das linhas tracejadas) são aqueles pagos pelo produtor, transportador, consumidor ou outra parte interessada diretamente envolvida.

Os custos externos (externalidades) incluem os impactos ambientais e sociais não suportados diretamente por qualquer um dos participantes diretos do ciclo de vida do produto. Estão, portanto, fora das considerações econômicas dos envolvidos no sistema. As externalidades podem ser monetizadas hipoteticamente, embora em combinação com as externalidades da ACV geralmente não sejam monetizadas porque são cobertas pela estrutura da ACV.

Jackson et al. (2014) salientam que numa ACCV as comparações são sempre feitas entre alternativas concorrentes que são mutuamente excludentes, refletindo custos diferenciais entre alternativas. Em outras palavras, os custos que são comuns a todas as alternativas simplesmente se cancelam na ACCV. Portanto, os custos que são iguais para todas as alternativas são frequentemente excluídos da análise.

Segundo a norma ISO 15686-5 (ISO, 2017) na ACCV os custos de uma unidade funcional de um produto podem ser derivados de estimativa diretas por meio de custos unitários conhecidos, dados históricos, modelos baseados no desempenho médio esperado, tendências futuras de mercado.

Os custos em uma análise ACCV devem ser claramente indicados num passado recente ou num futuro próximo, porque as pessoas estão familiarizadas com os custos atuais e o ambiente de custos em que vivem, trabalham ou pensam.

A norma ISO 15686-5 (ISO, 2017) apresenta o critério do Valor Presente Líquido (VPL) como uma opção para ser utilizada na avaliação dos méritos econômicos das alternativas de edificações, podendo ser extrapolada para a infraestrutura de transportes conforme feito e indicado por alguns estudos da área de pavimentação (SANTOS et al., 2017; LEE et al., 2018; MOINS et al., 2020)

O VPL é baseado na análise custo-benefício, que tem como premissa básica que as alternativas devem ser selecionadas de acordo com comparações sistemáticas de suas vantagens (benefícios) e desvantagens (custos).

No entanto, Moins et al. (2020) salientam que esse critério só deve ser utilizado quando todas as alternativas tiverem o mesmo período de análise.

- Critério do Valor Presente Líquido (VPL)

O cálculo do VPL é usado para calcular a soma monetária presente que deve ser alocada para gastos futuros em um ativo.

O VPL é calculado por meio da transferência para o instante presente (data-base) de todas as variações de caixa esperadas por cada alternativa, descontadas a uma Taxa de Mínima (TMA). Pode, então, ser descrito como a soma dos benefícios descontados de uma alternativa menos a soma dos custos descontados.

Para qualquer alternativa x , o VPL dos fluxos para um período de anos n , considerando-se a taxa de desconto i , é dado pela Equação 12:

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_{x,t} - C_{x,t}}{(1+i)^t} \quad Eq. 12$$

Onde:

$B_{x,t}$: valor do benefício x na data t ;

$C_{x,t}$: valor do custo x na data t ;

2.8.3.4 Avaliação do Custo do Ciclo de Vida para misturas asfálticas com RAP

Como um dos três pilares na avaliação de sustentabilidade, o ACCV oferece uma estrutura empírica para avaliar os custos ao longo de toda a vida útil dos projetos rodoviários (MOINS et al., 2020) e tem recebido atenção e aplicação notáveis no setor rodoviário (RAFIQ et al.; 2015; JAHANBAKHSI et al., 2019; QIAO et al.; 2019).

O uso da metodologia ACCV em pavimentação inicia-se com o desenvolvimento de alternativas e análise do seu desempenho. Dentro deste contexto, são definidos os cronogramas de atividades iniciais e futuras envolvidas na implementação de cada uma das alternativas de concepção do projeto, bem como são estimados os custos dessas atividades, além dos custos gerados aos usuários (SOUZA, 2017). De acordo com a AASHTO (2013), os cálculos de custo devem refletir os investimentos originais, expectativa de vida útil, manutenção e valores de resgate.

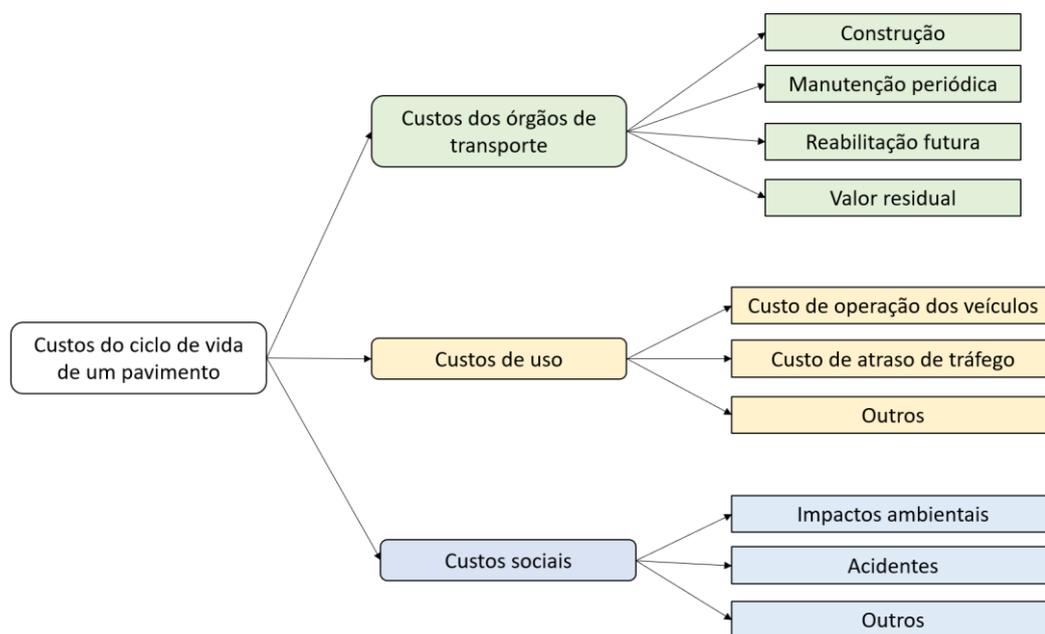
De acordo com Xiao et al (2019) dois parâmetros econômicos gerais em uma ACCV é o período de análise e a taxa de desconto e devem ser iguais para todas as alternativas avaliadas.

Os autores explicam que o período de análise significa o intervalo de tempo durante o qual todos os custos são estimados e deve ser longo o suficiente para indicar as diferenças de custo de longo prazo entre as alternativas estabelecidas e geralmente deve considerar a vida útil do pavimento de projeto e incorporar pelo menos uma ação de reabilitação.

Como o valor do dinheiro muda durante o período de análise, uma taxa de desconto apropriada deve ser selecionada de acordo com o status da economia. Este parâmetro representa a taxa de juros utilizada para determinar o valor presente dos fluxos de caixa futuros (OZBAY e JAWAD, 2006). Desta forma, a ACCV de cada alternativa pode ser comparada em bases iguais.

Em geral, os custos do ciclo de vida de um pavimento podem ser atuais ou futuros, tangível ou intangível e podem ser induzidos pelos órgãos de transporte, usuários das rodovias ou pela sociedade como um todo, conforme mostrados na Figura 21 e explicados na sequência (XIAO et al., 2019).

Figura 21 - Composição primária dos custos do ciclo de vida de um pavimento



Fonte: Adaptado de Xiao et al. (2019)

a) Custos dos órgãos de transporte - referem-se às despesas pagas diretamente pelos órgãos de transporte durante todo o período do projeto, incluindo os custos iniciais associados à construção do pavimento e os custos futuros associados às atividades periódicas de manutenção e reabilitação. Esses custos cobrem a aquisição de matérias-primas, mão de obra, operação de máquinas, controle de tráfego e outras contingências. Em geral, os custos de agência podem ser estimados a partir de registros históricos e licitações recentes.

b) Custos de uso – são aqueles suportados pelos usuários da rodovia, incluindo Custos Operacionais de Veículos (VOC), Custos de Atraso de Viagem (TDC), etc. A maioria desses custos são intangíveis, sendo frequentemente excluído em ACCV para projetos rodoviários. Segundo Lee et al. (2018) uma possível explicação é a complexidade e/ou desafios associados à quantificação dos componentes desse custo, com base em dados não confiáveis.

c) Custos sociais – referem-se aqueles enfrentados pela sociedade como um todo, como os custos dos impactos ambientais e dos acidentes. Esses custos variam muito e são difíceis de converter em valor monetário. Portanto, raramente são incluídos em uma ACCV.

Alguns estudos têm sido desenvolvidos no intuito de avaliar economicamente, por meio da ACCV, alternativas de misturas asfálticas com a inserção de RAP nas suas composições.

Rafiq et al. (2015) realizaram um estudo de caso sobre a viabilidade econômica da utilização de 20% de RAP em misturas asfálticas. Os resultados da análise mostraram que, a partir da medição do custo total do ciclo de vida, foi relatado um total de 14% de redução de custo usando o RAP em comparação com materiais convencionais. Os autores salientaram que a diferença de custo entre os dois layouts de usinas para a produção dos dois tipos de mistura asfáltica (convencional e contendo RAP) resultou numa redução total de custo de 57% para uma usina utilizando RAP.

Jahanbakhsh et al. (2019) utilizaram critérios de desempenho mecânico, impactos ambientais e benefícios econômicos para a avaliação de misturas asfálticas com alto teor de RAP (30%, 60% e 100%) utilizando óleo de motor residual como agente rejuvenescedor e borracha moída como aditivo redutor de deformações permanentes. O estudo utilizou a abordagem de análise de custos relacionados aos materiais. Para comparar o custo de fabricação das diferentes misturas asfálticas, o preço unitário dos materiais e das operações foram extraídos de artigos internacionais. Os resultados indicaram que o preço de fabricação das misturas asfálticas recicladas é inferior ao da mistura convencional, sendo o menor custo atribuído à mistura confeccionada com o uso simultâneo de 100% RAP, óleo de motor usado e borracha moída, onde verificou-se uma redução do preço unitário de 66,4\$ para 17\$, representando redução de aproximadamente 74% no custo da mistura asfáltica.

Qiao et al. (2019) realizaram uma análise dos custos do ciclo de vida de pavimentos reciclados sob condições climáticas futuras. Segundo os autores, misturas asfálticas com alto teor de RAP (por exemplo, 40%) podem sofrer os efeitos adversos das condições climáticas locais, o que afetará o desempenho do ciclo de vida e, conseqüentemente, o custo associado. Por meio de projeções climáticas, os dados sugeriram um aumento de aproximadamente 2°C na temperatura média no período de 21 anos (2020-2040).

Os autores realizaram um estudo de caso para várias estruturas rodoviárias de New Hampshire (NH), EUA. O estudo de caso utilizou os resultados do teste de módulo dinâmico para HMA virgem local e HMA com 40% RAP (como principais alternativas de material) para prever o desempenho do ciclo de vida das estruturas de pavimento selecionadas, considerando climas futuros. Em seguida, uma ACCV foi realizada para estimar e comparar o fluxo de caixa do ciclo de vida das estruturas rodoviárias investigadas. A manutenção

preventiva e a eficácia também foram consideradas. Verificou-se que o uso de 40% de RAP no HMA pode reduzir os custos em até 18% sob o clima previsto para 2020-2040.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os subsídios apresentados neste capítulo contextualizaram e embasaram o tema proposto nessa pesquisa. Numa abordagem geral, foi possível conhecer as características do RAP e os aspectos de projeto relativos à prática da utilização desse material em misturas asfálticas, vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de extração do ligante envelhecido e as principais diretrizes para a seleção do ligante asfáltico virgem, agente de reciclagem ou taxa de reciclagem.

Com base no panorama apresentado sobre a geração e reciclagem do RAP, observou-se que diversos países analisados, inclusive o Brasil, apresentam potencial de reciclar o RAP inserindo-o novamente na cadeia produtiva, mais especificamente em novas misturas asfálticas. Constatou-se que em países europeus e nos Estados Unidos, nos últimos anos o reaproveitamento médio desse material em novas misturas asfálticas à quente e mornas tem sido em torno de 70%.

Entretanto, alguns entraves têm tolhido a disseminação dessa prática, tais como a heterogeneidade do RAP, a falta de especificações e as dificuldades na compreensão da ativação do ligante RAP e dos mecanismos de interação deste com os agentes de reciclagem.

Na tentativa de aumentar a taxa de reciclagem, mesmo diante da necessidade de investigações mais refinadas, a literatura aponta artifícios eficientes tais como o uso de ligante asfáltico mais mole, a adição de agentes de reciclagem, o uso de tecnologias WMA e a o uso de bioligantes.

Dentre as tecnologias WMA, àquelas que permitem a formação de espuma, a exemplo da zeólita, têm sido eficazes na redução das temperaturas de produção, diminuição da viscosidade da mistura asfáltica e melhorias na trabalhabilidade. No desempenho mecânico, mesmo havendo controvérsias, alguns estudos mostram que as misturas asfálticas com zeólita apresentam comportamento adequado frente à fadiga, deformação permanente e trincamento. Quanto à resistência à ação deletéria da água, o bom desempenho geralmente é influenciado pela composição química desse aditivo.

No campo dos bioligantes, a técnica de utilizá-los em misturas asfálticas recicladas ainda é considerada inovadora e merece estudos mais aprofundados. Entretanto, a prática da

utilização de óleos vegetais tem se mostrado promissora na aplicação em misturas asfálticas recicladas.

Por meio do exposto também foi possível notar a emergência da adoção de estratégias sustentáveis na indústria da pavimentação, que é um dos setores com elevados gastos financeiros, elevado consumo de recursos naturais e energia e que também apresenta um impacto significativo nas emissões de GEE.

A coexistência e interação dos entendimentos a respeito dos danos econômicos e ambientais das atividades e alternativas de projetos da área da infraestrutura rodoviária, desde a obtenção de recursos até o fim da vida, desempenha um papel importante no processo de aproximação do setor ao conceito real de desenvolvimento sustentável.

A sustentabilidade é imensurável, no entanto alguns métodos de avaliação e índices auxiliam os tomadores de decisão a convergirem para a alternativa de projeto que melhor atenda ao equilíbrio entre a disponibilidade dos recursos e a sua exploração. Dentre eles, destaca-se a ACV no âmbito da avaliação ambiental e a ACCV no âmbito da avaliação econômica.

A inclusão desses métodos no processo de decisão por produtos e processos na área da pavimentação tem sido motivada por órgãos e pesquisadores. Índices envolvendo diversos indicadores que apontem a circularidade de misturas asfálticas, também têm sido desenvolvidos para uma melhor ponderação das alternativas de projeto durante a avaliação ambiental destas.

A ACV que é um método popular para analisar os impactos ambientais de um produto ao longo de toda a cadeia de valor, orientando práticas e tecnologias sob a ótica ambiental. No Brasil, a pesquisa de ACV de pavimentos modificados por RAP ainda é pouco realizada (MASCARENHAS, 2023).

O ICM proposto por MacArthur (2019) e adaptado por Mantalovas e Di Mino (2019), são capazes de medir até que ponto o fluxo linear é minimizado e o fluxo restaurador é maximizado, e por quanto tempo e intensidade uma mistura asfáltica reciclada é usada em comparação com uma mistura asfáltica convencional. Podem, então, complementar a avaliação ambiental da ACCV de misturas asfálticas.

Sobre a avaliação dos custos, uma ACCV pode conduzir a decisões mais assertivas na direção da sustentabilidade econômica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais da pesquisa, a descrição dos ensaios laboratoriais adotados para a avaliação das misturas asfálticas estudadas e o detalhamento dos procedimentos usados para a análise da circularidade e para a avaliação do ciclo de vida e do custo do ciclo de vida.

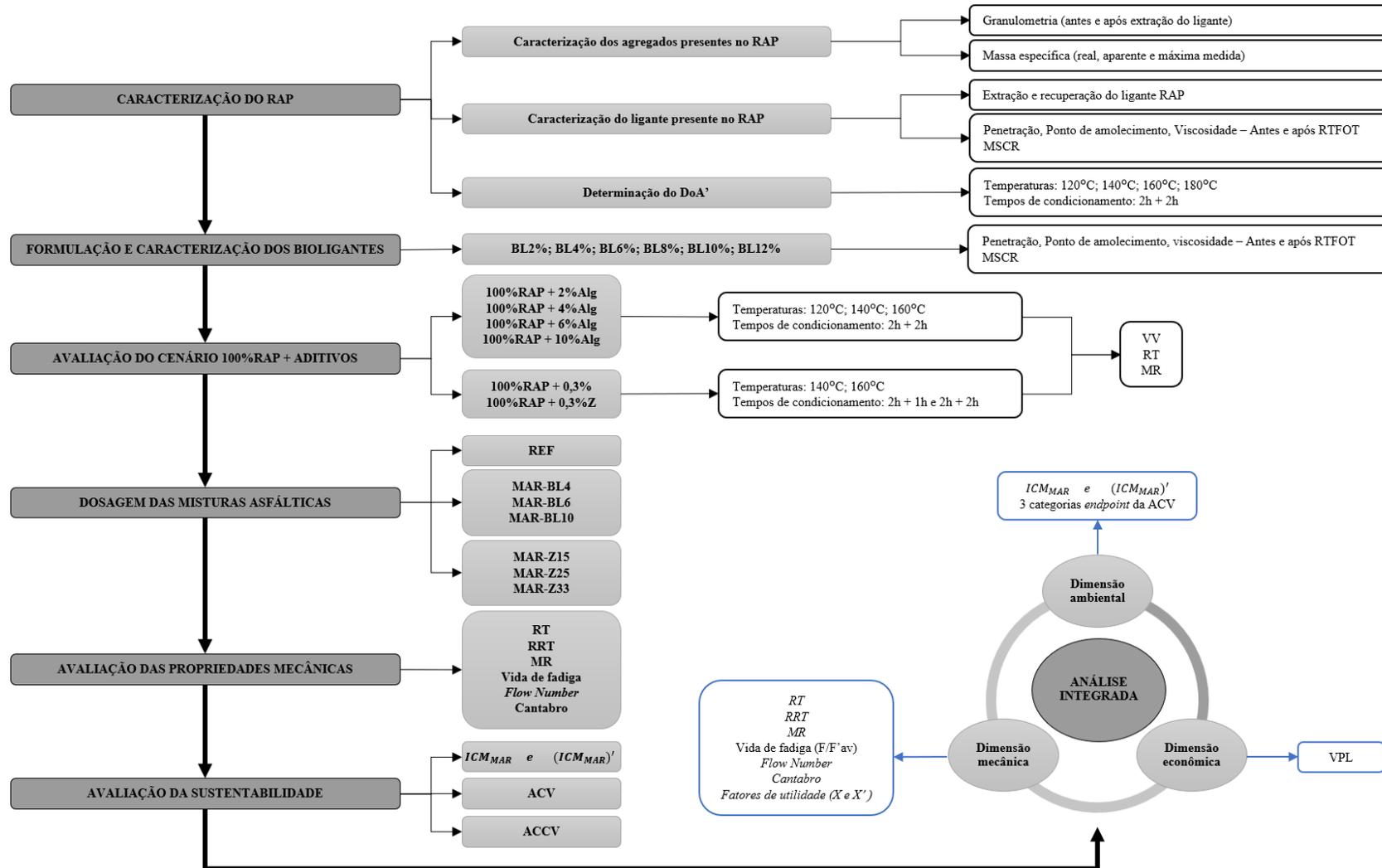
O programa experimental da pesquisa será realizado em seis etapas. O fluxograma mostrado na Figura 22 mostra a sequência de atividades que serão desenvolvidas.

O Quadro 8 apresenta, de forma antecipada, o significado das nomenclaturas presentes no fluxograma. O detalhamento de cada uma será feito durante a descrição das correspondentes etapas da pesquisa.

Quadro 8 - Nomenclaturas presentes no fluxograma

Nomenclatura	Definição
BL2%	92% de CAP 50/70 + 2% de óleo de algodão
BL4%	96% de CAP 50/70 + 4% de óleo de algodão
BL6%	94% de CAP 50/70 + 6% de óleo de algodão
BL8%	92% de CAP 50/70 + 8% de óleo de algodão
BL10%	90% de CAP 50/70 + 10% de óleo de algodão
BL12%	88% de CAP 50/70 + 12% de óleo de algodão
REF	Mistura asfáltica de referência, composta por agregados e ligante asfáltico virgem
MAR-BL4%	Mistura asfáltica reciclada com BL4% + 15% de RAP
MAR-BL6%	Mistura asfáltica reciclada com B6% + 25% de RAP
MAR-BL10%	Mistura asfáltica reciclada com BL10% + 33% de RAP
MAR-Z15	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 15% de RAP + 0,3% de zeólita
MAR- Z25	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 25% de RAP + 0,3% de zeólita
MAR- Z33	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 33% de RAP + 0,3% de zeólita

Figura 22 - Programa experimental da pesquisa



3.1 MATERIAIS

Neste item são descritos os materiais constituintes das misturas asfálticas de referência e reciclada estudadas.

3.1.1 RAP

O RAP utilizado nessa pesquisa foi oriundo dos serviços de fresagem contemplados no Programa Integrado de Revitalização da rodovia federal BR 230, do trecho compreendido entre os quilômetros 35,7 e 42.

Os dados gerais sobre o trecho fresado estão mostrados na Tabela 2. Não foi possível ter o acesso ao registro das características dos materiais e do teor de ligante asfáltico utilizados na composição do revestimento deteriorado.

Tabela 2 - Informações do segmento entre os quilômetros 35,7 e 42 da BR 230

Tipo do revestimento do pavimento deteriorado	CBUQ
Volume médio diário (VMD)	19685 veículos/dia
Número de operações do eixo padrão (N)	$9,37 \times 10^7$
Período de projeto	10 anos
Espessura de fresagem	5cm

O material foi coletado em quantidades suficientes, para o desenvolvimento da pesquisa, a fim de garantir a mesma procedência. Foi levado ao LEP, onde ficou condicionado em tonéis e na sequência procedeu-se com a devida homogeneização, quarteamento e amostragem.

3.1.2 Agregados virgens

Para a confecção da mistura de referência e para o enquadramento da mistura reciclada na faixa C do DNIT foram utilizados agregados virgens graúdos, miúdos e filer.

Os agregados graúdos foram a brita 19mm e a brita 12,5mm provenientes da pedreira Rocha Cavalcante, localizada no município de Campina Grande.

Os agregados miúdos foram o pó de pedra e a areia e como filer foi utilizado a cal. Esses materiais foram adquiridos no comércio local de Campina Grande.

A distribuição granulométrica dos grãos dos agregados virgens (Figura 23) mostra uma graduação do tipo uniforme. Os demais resultados da caracterização dos agregados virgens graúdos e miúdos podem ser vistos na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente. Os valores de absorção, abrasão Los Angeles, índice de forma, partículas planas e alongadas e partículas fraturadas obedeceram aos limites estabelecidos por norma.

Figura 23 – Curvas granulométricas dos agregados virgens

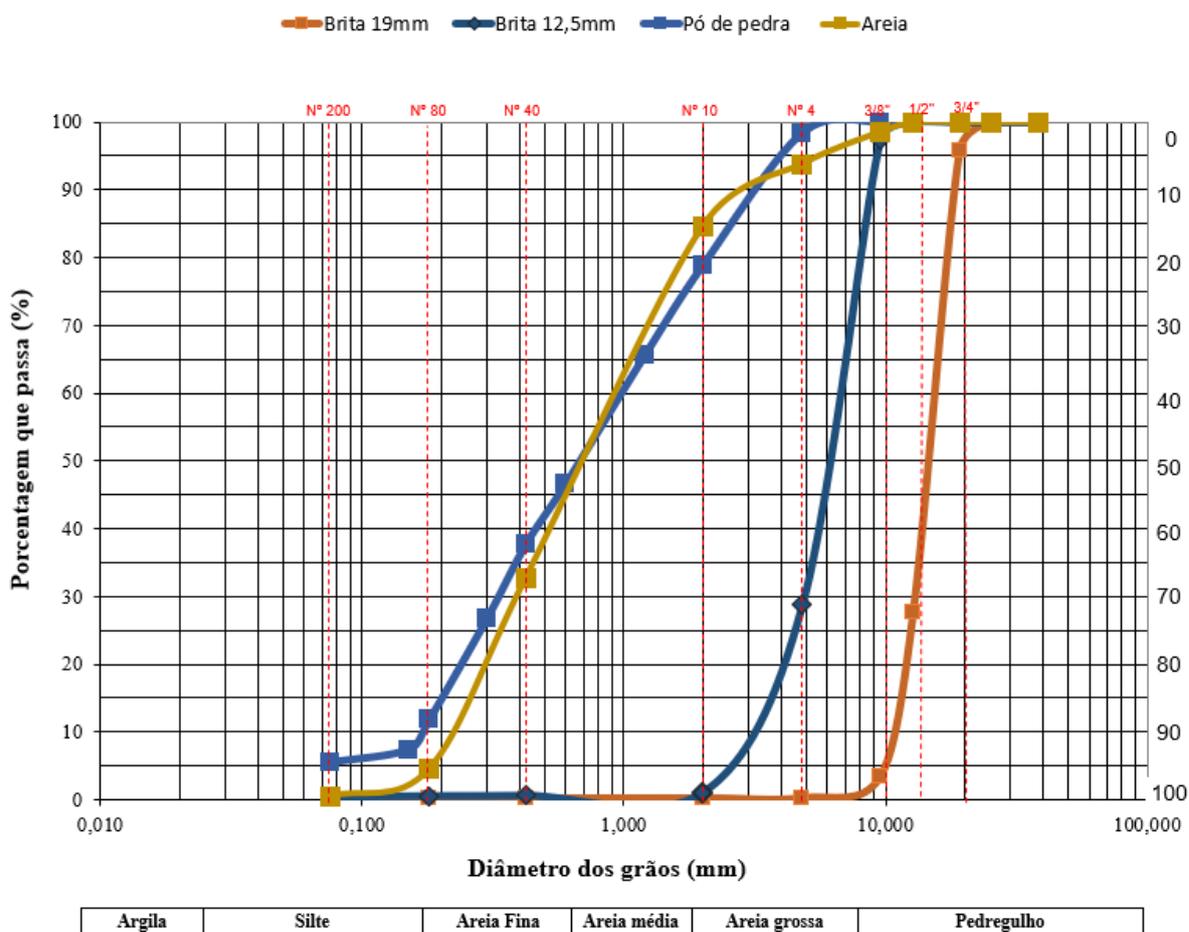


Tabela 3 - Resultados da caracterização dos agregados graúdos

Ensaio	Norma	Critério	Brita 19mm	Brita 12,5mm
Massa específica real (g/cm ³)	DNIT – ME 195/97	-	2,78	2,74
Massa específica aparente (g/cm ³)	DNIT – ME 195/97	-	2,70	2,66
Absorção (%)	DNIT – ME 195/97	< 2	0,52	0,92
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT – ME 035/98	< 50	21%	
Índice de forma	ASTM D 4791/10	> 0,5	0,88	0,74
Partículas planas e alongadas (%)	ASTM D 4791/10	<10%	1,00	0,19
Partículas fraturadas (%)	ASTM D 5821/13	>90%	100,00	100,00

Tabela 4 - Resultados de caracterização dos agregados miúdos

Ensaio	Norma	Critério	Pó de pedra	Areia
Massa específica real (g/cm ³)	NM 52/2009 ou DNIT 411/2019-ME		2,59	2,51
Massa específica aparente (g/cm ³)	NM 52/2009 ou DNIT 411/2019-ME		2,46	2,49
Absorção (%)	NM 30/2001 ou DNIT 411/2019-ME	< 2%	0,33	0,65
Angularidades (%)	ASTM C 1252/17	< 50	46,58%	45,76%
Equivalente areia (%)	ASTM C 1252/17	>55%	65,22%	86,39%

3.1.3 Zeólita

A zeólita utilizada foi a clinoptilolita, de origem natural e proveniente da Eslováquia, cedida pelas Indústrias Celta Brasil, localizada em Cotia, São Paulo. Segundo o fornecedor, esse material tem capacidade de liberar de 5% a 6% do seu peso na forma de água no momento da mistura.

A zeólita clinoptilolita, utilizada nessa pesquisa, apresenta fórmula química nominal $(\text{Na,K})_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ é a zeólita natural mais comum, encontrada principalmente em rochas sedimentares de origem vulcânica. Esses depósitos despertaram interesse comercial porque os tufos de clinoptilolita geralmente são bastante puros, consistindo em 60% a 90% de clinoptilolita sendo o restante composto principalmente de feldspato, argila, vidro e quartzo. Por esse motivo, são necessárias técnicas simples de extração. (ARMBRUSTER, 2001).

Segundo Ambrozova et al. (2017) esse tipo de zeólita foi encontrada em muitas áreas do mundo, por exemplo, na Europa (Hungria, Itália, Romênia, Eslováquia, Eslovênia, Turquia, ex-Iugoslávia), na Rússia e em vários estados da antiga União Soviética (Geórgia, Ucrânia, Azerbaijão), Ásia (China, Irã, Japão, Coreia), África (África do Sul), Austrália e Nova Zelândia e em muitos países das Américas, como Argentina, Cuba, México e os Estados Unidos.

Conforme mostrado no *Atlas of Zeolite Framework Types* (BAERLOCHER et al., 2007) a clinoptilolita é identificada pelo código HEU, de densidade estrutural 17.1 T/1000Å³. As suas células unitárias são monoclinicas, com o grupo espacial C2/m e os canais possuem tamanhos de 3,1×7,5Å; 3,6×4,6Å e 2,8×4,7Å variáveis devido à considerável flexibilidade da estrutura.

Na Tabela 5 e na Tabela 6 são mostradas, respectivamente, as informações a respeito das características físicas e da composição química da zeólita estudada. O fornecedor informou que, por tratar-se de um mineral natural, há ocorrência de variações nos valores identificados de acordo com região da formação rochosa. Portanto tais informações apresentadas correspondem a intervalos com mínimos e máximos dos valores históricos.

Por meio da Tabela 6 é possível verificar que a zeólita clinoptilolita apresenta a sílica (62,0%) e o óxido de alumínio (7,0%) como principais constituintes.

Tabela 5 - Características físicas da zeólita clinoptilolita

Tamanho do grão (granulometria)	#325 (45 µm)
Cor	Bege a levemente esverdeado
Massa específica aparente	0,5 – 1,0 g/cm ³
pH	6,5 – 10,0
Umidade	≤ 6 %
Ponto de fusão	1000 a 1400 °C
Capacidade de troca catiônica	1,2 a 2,0 mEq/g

Tabela 6 - Composição Química da zeólita clinoptilolita

Ensaio	Valor máximo	Valor mínimo
Perda de fogo	15,0%	7,0%
SiO ₂	75,0%	62,0%
Al ₂ O ₃	15,0%	7,0%
Fe ₂ O ₃	3,0%	0,5%
TiO ₂	0,5%	0,0%
CaO	5,0%	0,5%
MgO	3,0%	0,0%
Na ₂ O	5,0%	0,0%
K ₂ O	5,0%	0,5%
MnO	0,5%	0,0%
P ₂ O ₅	0,5	0,0%
ZnO	0,5%	0,0%
CuO	0,1%	0,0%

O teor de umidade para três amostras de zeólita foi determinado em laboratório e resultou num valor médio de 8,8%.

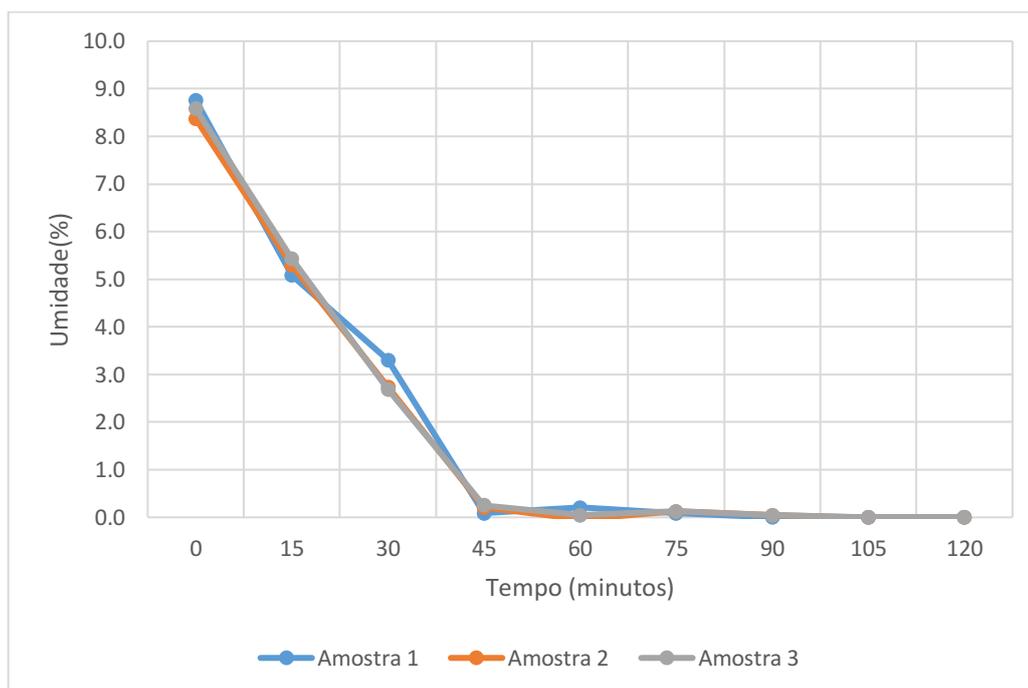
A liberação de água contida na estrutura cristalina da zeólita foi avaliada ao longo do tempo, por meio de medições de massa de 15 em 15 minutos durante 2 horas, numa

temperatura convencional de produção de HMA (150 °C). A escolha desse tempo de análise foi baseada no tempo médio do efeito espumante da zeólita relatado na literatura (AKISSEY ET AL., 2011; VAIANA ET AL., 2013).

A curva de liberação de água da zeólita (Figura 24) temperatura de 150°C mostra que a zeólita liberou mais água até 1 hora de condicionamento. Após esse período, observou-se uma constância de massa.

Segundo Akissey et al. (2011) e Vaiana et al. (2013) esse tempo característico em que a zeólita libera completamente a água contida na sua estrutura é chamado de tempo de formação de espuma (*foaming time*), período ideal durante o qual ocorre a expansão do ligante contido na mistura e, conseqüentemente, redução da viscosidade da mistura, melhoria na trabalhabilidade e no revestimento dos agregados, resultando em menores volumes de vazios.

Figura 24 - Curva de liberação de água da zeólita à 150°C



3.1.4 Óleo de Algodão

Para a formulação do bioligante foi utilizado o óleo de algodão bruto, cedido por um produtor particular da cidade de Campina Grande-PB.

A sua viscosidade foi determinada no viscosímetro rotacional na temperatura ambiente (25°C), utilizando os procedimentos da norma ASTM D7867 (2013). O valor obtido foi de 70,16cP.

A massa específica do óleo de algodão foi determinada por picnometria, resultando num valor de 0,92g/cm³.

3.1.5 Ligante asfáltico virgem

O ligante asfáltico foi cedido pela empresa Rocha Cavalcante, sendo usado como ligante virgem na mistura asfáltica de referência e nas misturas asfálticas recicladas com a adição de zeólita. Foi utilizado também como ligante base dos bioligantes formulados para as misturas asfálticas recicladas.

A Tabela 7 apresenta os resultados da caracterização do ligante asfáltico virgem. Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e *performance grade* (PG) foram realizados com amostras do ligante asfáltico antes e após o envelhecimento a curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (*Rolling Thin Oven Test*).

Os ensaios de viscosidade rotacional foram realizados utilizando um viscosímetro Rotacional de marca Brookfield, nas temperaturas de 135, 142, 150, 165 e 177°C.

Os ensaios de performance grade (PG) e de fluência e recuperação do ligante asfáltico sob tensões múltiplas (MSCR) foram realizados em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) da série *Discovery Hybrid Rheometer* (DHR-1).

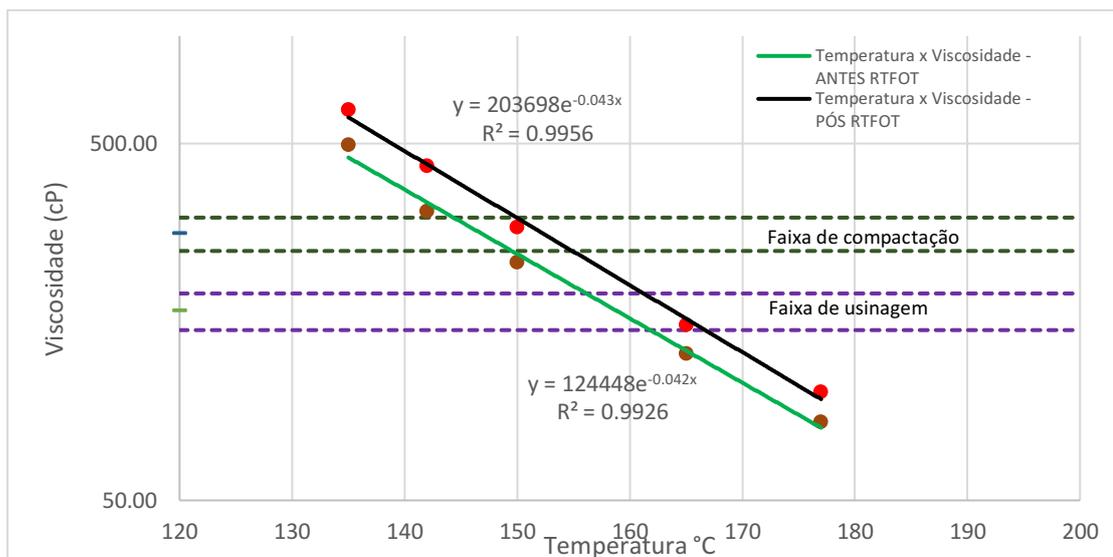
De acordo com as especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) o ligante asfáltico se enquadra na classificação CAP 50/70.

Por meio do resultado do ensaio de viscosidade traçou-se a curva viscosidade x temperatura do ligante (Figura 25) que possibilitou a determinação da temperatura de compactação e de usinagem que serão utilizadas na mistura de referência. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 170±20 cP. Logo, nessa faixa de usinagem, escolheu-se 160°C como a temperatura de usinagem. A temperatura dos agregados foi de 15°C acima da temperatura definida para o ligante e a temperatura de compactação foi definida dentro da faixa que o ligante apresentou viscosidades entre 280±30cP, escolhendo-se assim 145°C.

Tabela 7 - Resultados de caracterização do ligante asfáltico virgem

Ensaio		Resultados	Especificações	Normas
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)		50,63	50 a 70	ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de Amolecimento (°C)		50,50	≥ 46	AASPM D36/D36M – 14: 2020
Ponto de Fulgor (°C)		324,00	235°C mín	ASTM D8254-19
135°C		497,50	141,00	
142°C		323,57		
Viscosidade	150°C	232,50	50,00	ASTM D4402/D4402M: 2015
Rotacional	165°C	129,00		
(cP)	177°C	83,25	30 - 150	
Temperatura máxima de PG (°C)		64		
Índice de Susceptibilidade Térmica		-1,04	-1,5 a +0,7	
Pós RTFOT				ASTM D2872: 2019
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)		45,00		ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de Amolecimento (°C)		54,50		AASPM D36/D36M – 14: 2020
135°C		623,75		
142°C		433,50		
Viscosidade	150°C	292,00		ASTM D4402/D4402M: 2015
Rotacional	165°C	155,67		
(cP)	177°C	100,75		
Aumento no ponto de amolecimento (°C)		4,00	< 8,00	
Penetração retida (%)		88,89	> 55,00	
Temperatura máxima de PG (°C)		64		ASTM D6373: 2021
Jnr a 0,1 kPa		2,50		
Jnr a 3,2 kPa		3,36		
MSCR	Percentual de recuperação a 0,1 kPa	15,14		ASTM D7405:2020
	Percentual de recuperação a 3,2 kPa	0,95		

Figura 25 - Viscosidade x Temperatura do ligante asfáltico virgem, antes e pós RTFOT



3.2 MÉTODOS

As etapas metodológicas dessa pesquisa estão detalhadas adiante. Para a realização dos ensaios laboratoriais, os seguintes espaços físicos foram utilizados:

- Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), localizados na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus Campina Grande;
- Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica (LAMMEN), localizado na Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Campus Natal;
- Laboratório de Ensino (LADEN) localizado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Campus Recife;

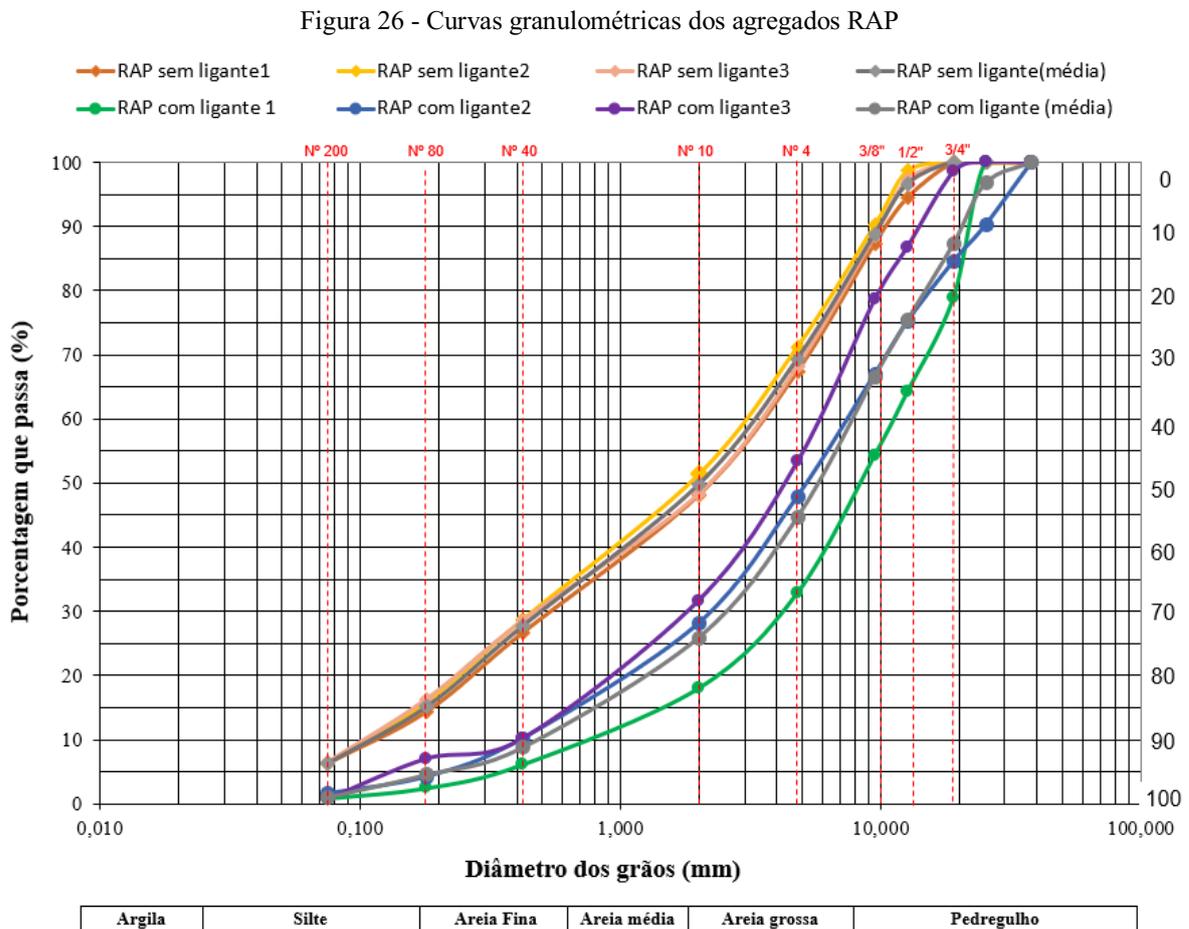
Os ensaios foram realizados de acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infraestrutura e Transportes (DNIT), *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Nos métodos da pesquisa também foram consideradas algumas práticas laboratoriais exitosas encontradas na literatura sobre o assunto tratado.

3.2.1 Etapa 1: Caracterização do RAP

A seguir serão descritos os procedimentos adotados para a caracterização e obtenção das informações básicas do RAP necessárias para a etapa de dosagem das misturas asfálticas recicladas.

3.2.1.5 Caracterização dos agregados presentes no RAP

A distribuição granulométrica dos grãos do agregado RAP foi realizada antes e após a extração do ligante. Isso proporciona uma melhor avaliação dos resultados mecânicos das misturas asfálticas recicladas finais pois a granulometria do agregado RAP pode variar devido ao aquecimento, espessura do masticue e liberação de partículas finas no ligante e/ou solvente de extração. Três amostras foram ensaiadas e as curvas granulométricas de cada uma delas, juntamente com a curva média para cada situação, estão mostradas na Figura 26.



A massa específica aparente do agregado RAP foi calculada de acordo com a abordagem descrita por McDaniel et al. (2000), com base na densidade máxima teórica (G_{mm}^{RAP}) e num valor assumido para a absorção do agregado RAP. Segundo os autores, essa abordagem funciona bem nos casos em que os registros históricos da caracterização dos agregados originais forem desconhecidos e a absorção do agregado RAP puder ser prevista com alguma confiança. Essa abordagem segue os passos descritos:

- 1- Determinar a densidade máxima teórica do RAP (G_{mm}^{RAP}), de acordo com a AASHTO T 209 (2020).
- 2- Calcular a massa específica efetiva do RAP (G_{se}^{RAP}) usando a G_{mm}^{RAP} , o teor de asfalto presente no RAP (P_b) e uma massa específica do asfalto assumida (G_b), como segue (Equação 13):

$$G_{se}^{RAP} = \frac{100 - P_b}{\frac{G_{mm}^{RAP}}{G_b} - \frac{P_b}{G_b}} \quad Eq. 13$$

McDaniel e Anderson (2001) recomendam um valor de 1,020 para G_b . A G_{se}^{RAP} poderá ser usada como o valor de massa específica real (G_{sb}^{RAP}), conforme primeira abordagem, mas isto poderá superestimar a G_{sb} do agregado combinado. Além disso, usando G_{se}^{RAP} como G_{sb}^{RAP} no projeto de misturas recicladas com elevadas quantidades de RAP, o erro poderá ser ampliado.

- 3- Assumir um valor típico para absorção de asfalto, P_{ab} , baseado na experiência com projetos de mistura asfálticas recicladas para o local específico, e usar esse valor para estimar o G_{sb}^{RAP} (Equação 14):

$$G_{sb}^{RAP} = \frac{G_{se}^{RAP}}{\left[\frac{P_{ab} - G_{se}^{RAP}}{100G_b} + 1 \right]} \quad Eq. 14$$

Se os dados de absorção de agregados semelhantes estiverem disponíveis em registros anteriores, então esse valor deve ser usado como uma estimativa para P_{ab} . Se os dados históricos não estiverem disponíveis, um valor para P_{ab} pode ser estimado como uma porcentagem do valor típico de absorção em água. Por exemplo, P_{ab} pode ser estimado como 60–65 por cento do valor típico de absorção de água do agregado. Esta considera o fato de que a absorção de água do agregado varia de acordo com a região ou área (COPELAND, 2011).

Os dados da massa específica máxima medida e do cálculo da massa específica real e massa específica aparente do agregado RAP antes da extração estão mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de caracterização do agregado RAP antes da extração do ligante

Massa específica real (g/cm ³) - Gsa	2,70
Massa específica aparente (g/cm ³) - Gsb	2,78
Massa específica máxima medida (g/cm ³) - Gmm	2,51

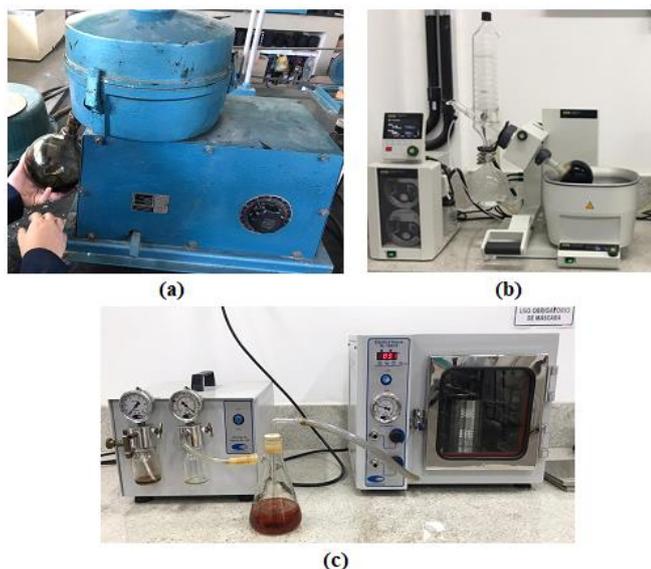
3.2.1.6 Caracterização do ligante presente no RAP

Para a extração do ligante RAP da matriz de agregados foi aplicada a técnica de centrifugação no Rotarex (Figura 27a) utilizando como solvente o tricloroetileno, seguindo as recomendações da norma DNIT-ME 053/1994. Essa técnica permitiu determinar também o teor de ligante envelhecido presente no RAP, que foi de 5,64%.

A recuperação foi feita por meio do Rotavapor® R300 Buchi (Figura 27b), dotado de bomba de vácuo V-300 e interface I-300, do Laboratório SupraMat da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), seguindo os procedimentos preconizados pela norma ASTM D2172 (2017).

A solução de ligante RAP mais tricloroetileno foi colocada no balão de destilação, que ficou rotacionando dentro de uma cuba com água aquecida à 60°C até que o tricloroetileno evaporasse, identificado pela redução do estado borbulhante, restando apenas o ligante RAP no balão. Posteriormente, o ligante RAP foi colocado em estufa à vácuo, numa temperatura de 80°C por 5h, para a eliminação do solvente residual (Figura 27c).

Figura 27 - (a) Extração do ligante RAP no Rotarex; (b) Recuperação do ligante RAP no rotoevaporador (c) eliminação do solvente residual na estufa a vácuo



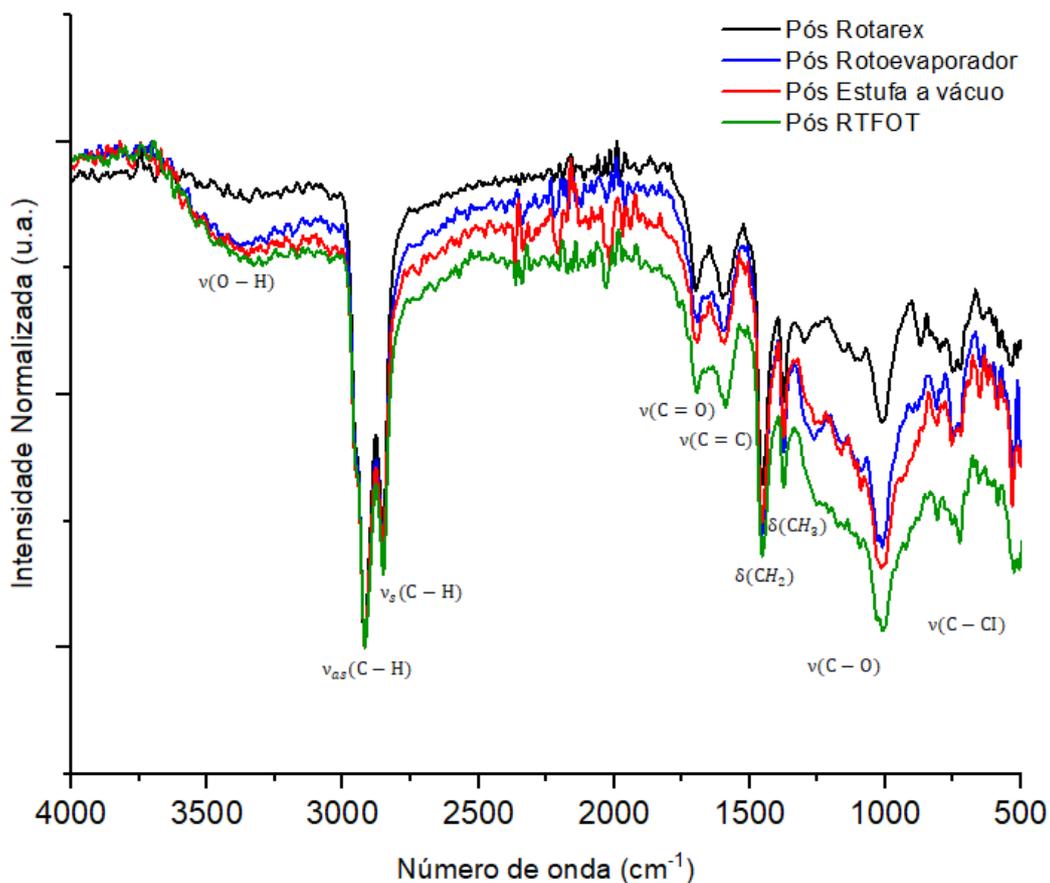
Fonte: Elaborada pela autora (2023)

A amostra de ligante recuperado foi submetida ao envelhecimento a curto prazo no *Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT, no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande (LEP/UFCG).

Com o objetivo de verificar o estado de envelhecimento oxidativo do ligante RAP e avaliar a eliminação do solvente, foram coletadas amostras nos seguintes momentos: (i) após extração no Rotarex; (ii) após a passagem pelo rotoevaporador (iii) após a estufa a vácuo (iv) após o RTFOT. Essas amostras foram submetidas ao ensaio Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) no Laboratório LAMMEN da UFRN, seguindo os procedimentos da norma ASTM E1252 – 98(2013) e1. O equipamento utilizado foi um Espectrômetro Bruker Vertex 70, com sonda ATR, na faixa de 4000 a 500 cm^{-1} .

A Figura 28 mostra os resultados do FTIR das quatro amostras coletadas. Percebe-se que todas as amostras apresentaram picos de transmitância entre 540 e 785 cm^{-1} , referente às ligações C-Cl do solvente tricloroetileno (TCE), o que indica que mesmo com o procedimento de recuperação do ligante, ainda existe a presença de solvente residual no ligante RAP.

Figura 28 - Resultados de FTIR para amostras do ligante RAP



Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Os resultados da caracterização física e reológica do ligante RAP recuperado estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados de caracterização do ligante RAP

Ensaio	Resultados	Normas
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	27,00	ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de Amolecimento (°C)	60,50	AASTM D36/D36M – 14: 2020
	135°C	1975,00
	142°C	1371,00
Viscosidade Rotacional (cP)	150°C	985,00
	165°C	563,00
	177°C	400,00
Temperatura máxima de PG (°C)	82	
Pós RTFOT		ASTM D2872: 2019
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	5,25	ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de Amolecimento (°C)	91,75	AASTM D36/D36M – 14: 2020
	135°C	13751,00
	142°C	7868,00
Viscosidade Rotacional (cP)	150°C	5019,00
	165°C	1891,83
	177°C	935,88
Temperatura máxima de PG (°C)	100	ASTM D6373: 2021
	Jnr a 0,1 kPa	0,009
	Jnr a 3,2 kPa	0,010
MSCR	Percentual de recuperação a 0,1 kPa	51,70
	Percentual de recuperação a 3,2 kPa	50,00

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

3.2.1.7 Determinação do DoA'

Essa etapa da pesquisa teve como objetivo estimar o grau relativo de ativação do ligante RAP (DoA') em diferentes condições de temperatura de mistura, sem a influência de outros fatores tais como umidade do RAP, tempo de mistura e adição de agente de reciclagem.

Esta etapa foi baseada no roteiro proposto no RILEM TC 264 RAP Task Group 5, com alterações no modo de compactação e nas temperaturas de condicionamento avaliadas. Ao invés da compactação Marshall foi utilizada a compactação SUPERPAVE e foram usadas as

temperaturas de 120°C, 140°C, 160°C e 180°C para englobar um valor de temperatura de compactação (160°C) comum aos três bioligantes escolhidos na etapa de dosagem. Outra inovação é que além do parâmetro de resistência à tração, o DoA' também foi calculado em função do volume de vazios da mistura e em função dos valores de módulo de resiliência dos corpos de prova compactados.

Dentre as especificações SUPERPAVE para a determinação do teor de ligante asfáltico de projeto está a verificação do volume de vazios da mistura asfáltica para a garantia do seu desempenho mecânico satisfatório. Existe uma tendência de redução do volume de vazios com o aumento do teor de ligante na mistura (QUEIROZ, 2016; JOHN et al., 2021). Segundo Pires et al. (2019) o volume de vazios de amostras compactadas de RAP também podem ser usadas como uma medida de mobilização do ligante.

O ensaio de módulo de resiliência objetivou determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia quando solicitado a um carregamento e, posteriormente, retornar ao seu estado inicial quando se cessam as tensões causadoras das deformações. O MR é pouco influenciado pelo teor de asfalto dentro da faixa normal de dosagem, mas pode variar com o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante (maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade), propriedades volumétricas (maior com a diminuição do teor de vazios de ar), energia de compactação, temperatura de compactação e temperatura do ensaio (MOTTA e ALDERSON, 1995; MOTTA et al., 2002; KATO, 2016; BOEIRA, 2018).

Como a quantidade mínima de ligante RAP ativo varia em função das condições de processamento (temperatura de mistura e tempo de condicionamento), o que leva a alterações no volume de vazios da mistura e como o valor do módulo de resiliência pode ser considerado inversamente proporcional ao volume de vazios, dessa forma pretendeu-se também estimar o DoA' por meio do MR dos corpos de prova compactados.

O fluxograma dos procedimentos para a determinação do DoA' está mostrado na Figura 29. Inicialmente, o RAP foi seco em estufa em baixa temperatura (40°C) por 48 horas para eliminar a umidade residual. Posteriormente, procedeu-se com a etapa de condicionamento por quatro horas, onde, para cada temperatura, foi aquecida uma quantidade mínima de 10 amostras de RAP seco. Passadas as primeiras duas horas na estufa, o RAP foi misturado manualmente com o objetivo de desmanchar os grumos, sendo posteriormente reconduzido para a continuação do condicionamento.

Após o período de condicionamento completo, os dez corpos de prova, por temperatura, foram moldados no compactador SUPERPAVE com aplicação de 100 giros e, posteriormente, foi determinado o volume de vazios (V_v) de todos eles. Depois de passado um mínimo de 24h os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR). Com os resultados do V_v , RT e MR, calculou-se o DoA'_{V_v} , DoA'_{RT} e o DoA'_{MR} , possibilitando assim a análise da variação do grau relativo de ligante RAP ativado em função da temperatura de mistura.

A nomenclatura de cada composição analisada, bem como as suas especificações de tempo e temperatura de condicionamento e a quantidade de corpos de prova moldados estão mostrados no Quadro 9.

Quadro 9 - Composições para avaliação do DoA'

Nomenclatura Adotada	$t_{\text{condicionamento (h)}}$	$T_{\text{condicionamento (}^\circ\text{C)}}$	Quantidade mínima de CPs
RAP-120	2h+2h	120 $^\circ\text{C}$	10
RAP-140		140 $^\circ\text{C}$	10
RAP-160		160 $^\circ\text{C}$	10
RAP-180		180 $^\circ\text{C}$	10

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

O DoA'_{V_v} , DoA'_{RT} e o DoA'_{MR} foram calculados conforme Equações 15, 16 e 17:

$$DoA'_{V_v} (\%) = \frac{Vv_{RAP}(t_{(mínVv)}^\circ\text{C})}{Vv_{RAP}(X^\circ\text{C})} \times 100 \quad Eq. 15$$

Onde:

$Vv_{RAP}(X^\circ\text{C})$ - é o resultado do V_v do RAP em uma temperatura específica “X”,

$Vv_{RAP}(t_{(mínVv)}^\circ\text{C})$ - é o valor mínimo de V_v observado entre as temperaturas avaliadas.

$$DoA'_{RT} (\%) = \frac{RT_{RAP}(X^\circ\text{C})}{RT_{RAP}(t_{(máxRT)}^\circ\text{C})} \times 100 \quad Eq. 16$$

Onde:

$RT_{RAP}(X^\circ\text{C})$ - é o resultado da RT do RAP em uma temperatura específica “X”,

$RT_{RAP}(t_{(máxRT)}^\circ\text{C})$ - é o valor máximo de RT observado entre as temperaturas avaliadas.

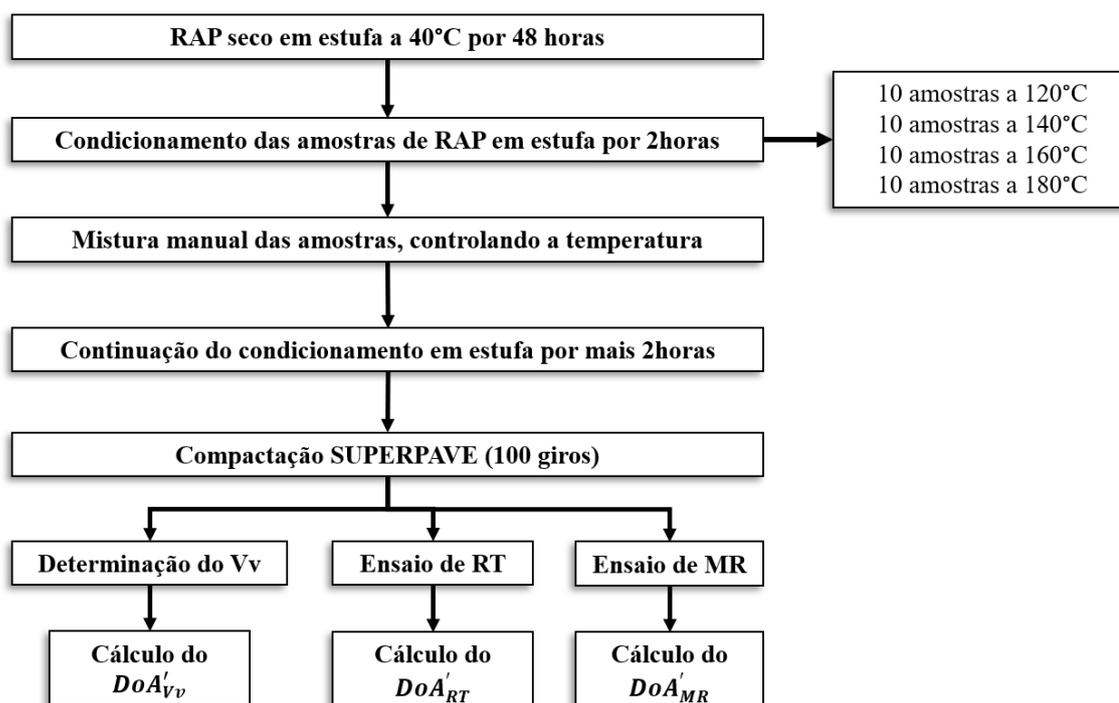
$$DoA'_{MR} (\%) = \frac{MR_{RAP}(X^{\circ}C)}{MR_{RAP}(Vv_{min})} \times 100 \quad Eq.17$$

Onde:

$MR_{RAP}(X^{\circ}C)$ - é o resultado da MR do RAP em uma temperatura específica “X”,

$MR_{RAP}(Vv_{min})$ - é o valor de MR correspondente à situação de menor volume de vazios “Vv”.

Figura 29 - Fluxograma dos procedimentos para a determinação do DoA' (%)



3.2.1.7.2 Valores do DoA'

As Figuras 30, 31 e 32 apresentam os valores de Volume de Vazios (%), Resistência a Tração (MPa) e Módulo de Resiliência (MPa) em função das temperaturas de condicionamento, para os corpos de prova compactados com 100% de RAP. Por meio das linhas de tendência, observa-se que na temperatura de 140°C os corpos de prova apresentaram menor volume de vazios e maior resistência à tração e módulo de resiliência e nas outras temperaturas houve um aumento do volume de vazios e quedas dos valores das duas propriedades mecânicas avaliadas. Analisando as barras de erros, constata-se também uma menor dispersão dos resultados de RT e MR nesta temperatura.

Segundo Pires et al. (2019) um aumento na temperatura de compactação amolece o ligante do RAP e, assim, diminui a viscosidade geral da mistura, melhora a compactação e resulta em uma amostra mais resistente. No entanto, por meio dos resultados obtidos verifica-se que acima de uma certa temperatura os corpos de prova RAP podem se tornar menos resistentes e menos rígidos.

Na temperatura de 120°C possivelmente o ligante do RAP ainda não havia experimentado uma ativação suficiente para melhor aglomerar as partículas de agregados, o que pode ser comprovado pelos resultados dos DoA'_{VV} , DoA'_{RT} e o DoA'_{MR} calculados nesta temperatura e mostrados nas Tabela 10 Tabela 11 Tabela 12. Isso fez com que os corpos de prova apresentassem valores de RT e MR mais baixos e percentual de vazios mais elevados em comparação com as amostras compactadas à 140°C.

Visualmente verificou-se que os corpos de prova das temperaturas de 160°C e 180°C apresentavam um aspecto menos coeso, com desprendimento das partículas mais finas, resultando em uma estrutura com mais vazios. Este mesmo fenômeno de maiores porcentagens de vazios e valores de resistência à tração mais baixos, juntamente com uma tendência parabólica sobre as temperaturas de condicionamento, também foi verificado nos resultados do RILEM TC 264 RAP Task Group 5.

Figura 30 - Volume de Vazios x Temperatura

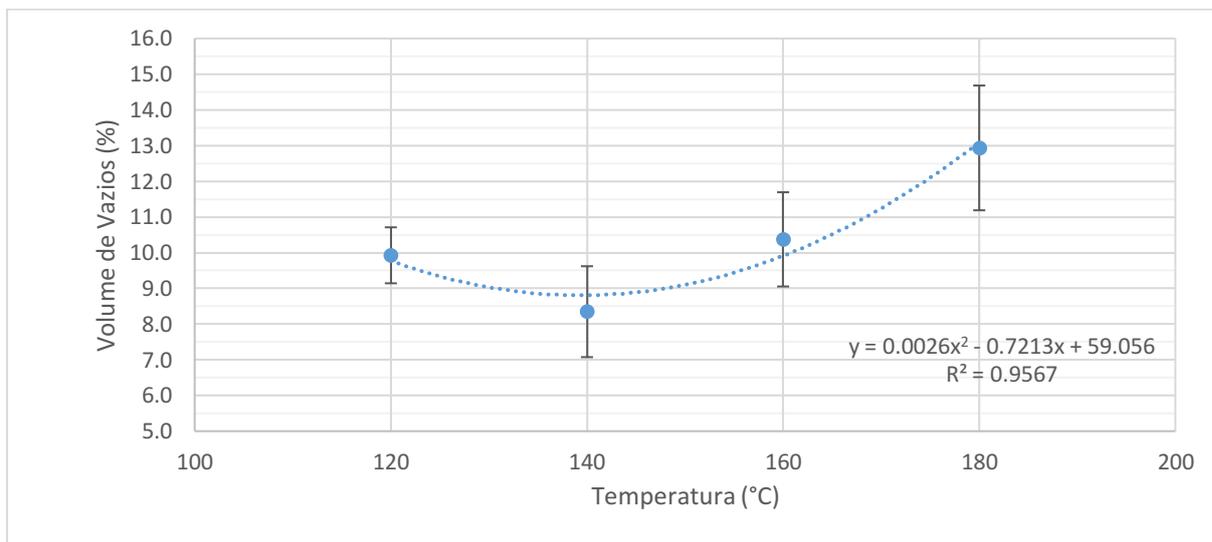


Figura 31 - Resistência à Tração x Temperatura

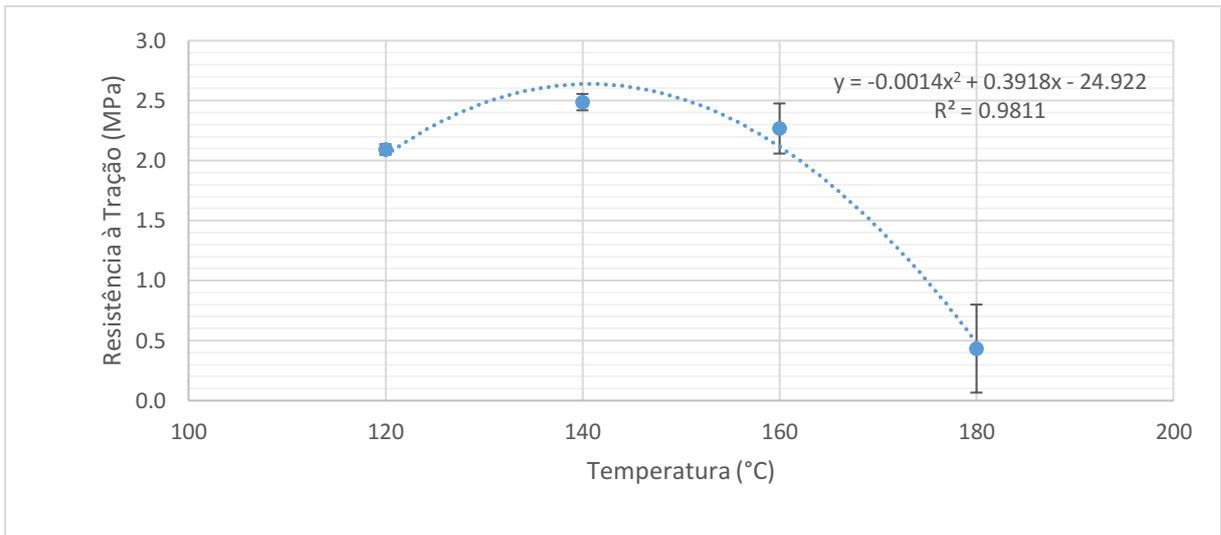
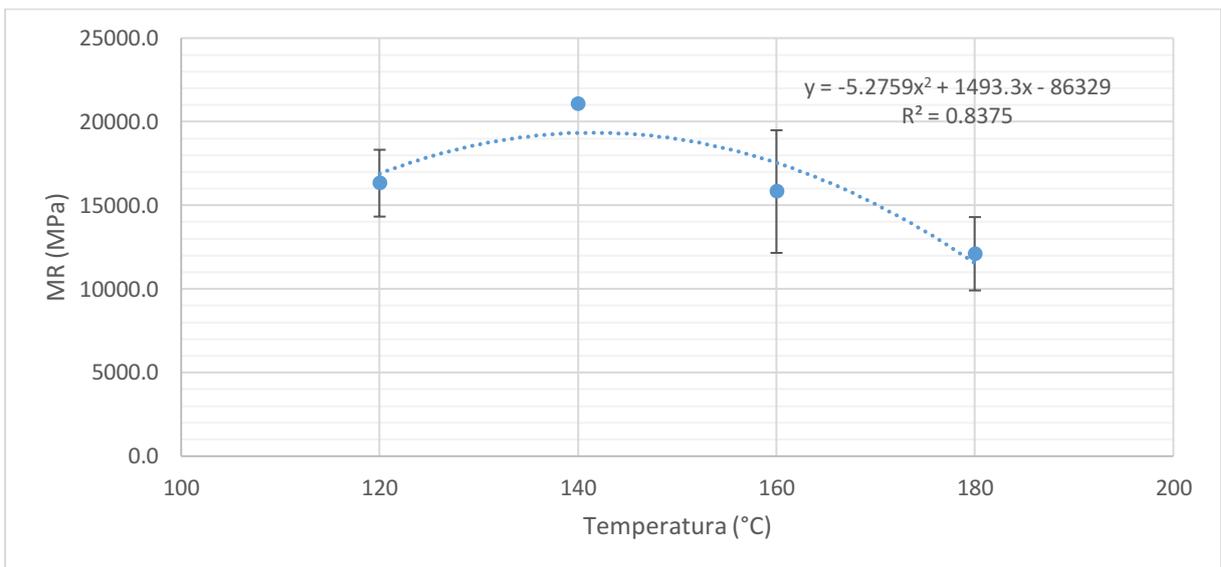


Figura 32 - Módulo de Resiliência x Temperatura



As Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 mostram os resultados do grau relativo de ativação do ligante RAP nas diferentes condições de temperatura de mistura, em função do volume de vazios, resistência à tração e módulo de resiliência. Observa-se que o DoA'_{Vv} , DoA'_{RT} e o DoA'_{MR} exibiram 100% de ativação na temperatura de 140°C.

Os DoA' calculados em função do Vv e MR mostram que houve um aumento da quantidade de ligante envelhecido participando da coesão da amostra devido a elevação da temperatura de 120°C para 140°C.

Pelos valores de DoA' calculados em função da RT é possível verificar que na temperatura de 160°C ainda ocorreu uma ativação considerável do ligante RAP, superior à quantidade encontrada na temperatura de 120°C.

Essas constatações mostram que a temperatura de 140°C foi a que mais favoreceu a ativação do ligante envelhecido do RAP estudado. Acima de 140°C existe a possibilidade de ter havido uma queima ou um envelhecimento excessivo do ligante RAP, o que conduziu a uma perda das suas propriedades coesivas comprometendo a sua ativação e, conseqüentemente, a coesão da amostra.

Com a redução da coesão das amostras confeccionadas nas temperaturas de 160°C e 180°C, devido à menor ativação do ligante envelhecido, as partículas mais finas se desprenderam deixando uma estrutura com mais vazios, menos rígida e com a resistência próxima a das amostras confeccionadas em temperaturas mais baixas, conforme pode ser observado nas Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 10 - DoA' em função do volume de vazios

Amostra	Vv (%)	DoA'_{Vv} (%)
RAP-120°C	9,93	84,1
RAP-140°C	8,35	100,0
RAP-160°C	10,37	80,5
RAP-180°C	12,94	64,5

Tabela 11 - DoA' em função da Resistência à Tração

Amostra	RT (MPa)	DoA'_{RT} (%)
RAP-120°C	2,09	84,1
RAP-140°C	2,49	100,0
RAP-160°C	2,27	91,2
RAP-180°C	0,43	17,4

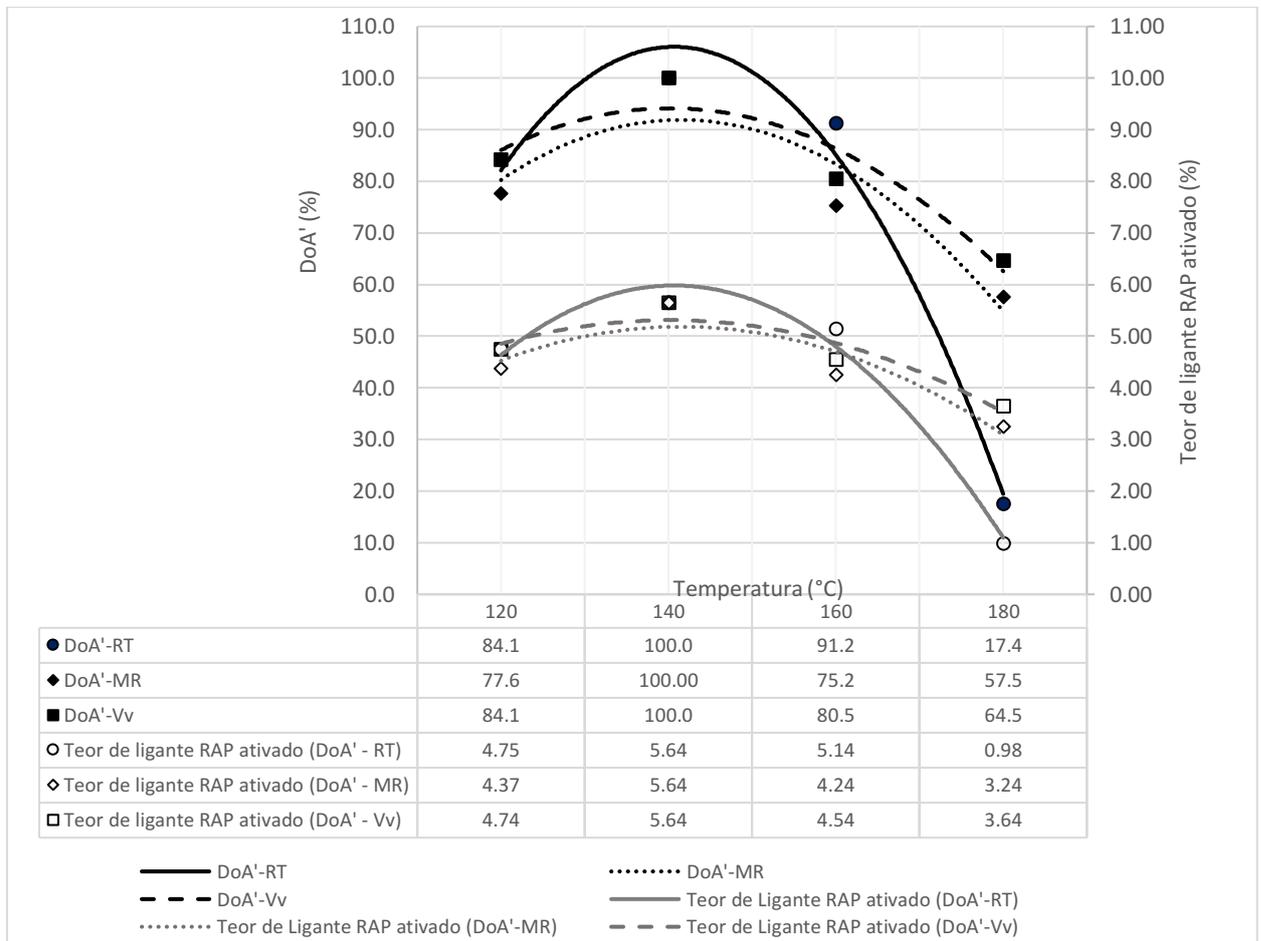
Tabela 12 - DoA' em função do Módulo de Resiliência

Amostra	MR (MPa)	DoA'_{MR} (%)
RAP-120°C	16324,7	77,6
RAP-140°C	21048,0	100,0
RAP-160°C	15822,1	75,2
RAP-180°C	12104,0	57,5

A Figura 33 mostra a relação dos graus relativos de ativação com os teores de ligante RAP ativados em cada uma das temperaturas avaliadas, sabendo que o teor total de ligante envelhecido presente no RAP é de 5,64%. Durante a realização dos ensaios pode-se perceber que os corpos de prova da temperatura de 180°C estavam ressecados e se desagregando, possivelmente devido à falta de coesão resultante da queima do ligante do RAP provocada pelo superaquecimento.

Assim, dentre todas as temperaturas, a de 180°C foi a que resultou nos menores valores de RT e MR e maiores valores de Vv acarretando, conseqüentemente, nos menores valores de DoA'_{Vv} , DoA'_{RT} e DoA'_{MR} , que indicaram uma quantidade de ligante RAP ativo de 3,64%, 3,24% e 0,98%, respectivamente.

Figura 33 - DoA' e teor de ligante RAP ativado



3.2.2 Etapa 3: Formulação e caracterização dos bioligantes

A preparação dos bioligantes (mistura do CAP 50/70 com óleo de algodão) foi realizado por meio do misturador de baixo cisalhamento, dotado de manta aquecedora e controlador de temperatura.

A nomenclatura e composição dos bioligantes formulados estão mostrados no Quadro 10. Todos eles foram submetidos aos ensaios de caracterização convencional e reológica e, posteriormente, foi feita uma comparação dos valores obtidos com os do ligante virgem.

Quadro 10 - Bioligantes formulados

Nomenclatura adotada para o bioligante	Composição
BL2%	92% de CAP 50/70 + 2% de óleo de algodão
BL4%	96% de CAP 50/70 + 4% de óleo de algodão
BL6%	94% de CAP 50/70 + 6% de óleo de algodão
BL8%	92% de CAP 50/70 + 8% de óleo de algodão
BL10%	90% de CAP 50/70 + 10% de óleo de algodão
BL12%	88% de CAP 50/70 + 12% de óleo de algodão

A Figura 34 e Figura 35 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de penetração e ponto de Amolecimento, respectivamente. Verifica-se um aumento nos valores de penetração e redução nos valores de ponto de amolecimento à medida em que se aumentava o teor de óleo de algodão no ligante asfáltico. O mesmo comportamento foi observado por Melo Neto *et al.* (2022), que avaliaram teores de 4% e 5% de óleo refinado de algodão e por Ziegler *et al.* (2016) que avaliaram teores de 1%, 2% e 3% de óleo bruto de algodão.

Para a situação antes do RTFOT, na avaliação do teste t de *Student* para os resultados de penetração e ponto de amolecimento verificou-se que apenas a amostra BL2% não apresentou diferença significativa quanto ao ligante asfáltico de referência, pois os p-valores foram de 0,1699 e 0,0887, respectivamente para ambos os ensaios, superando a significância de 5%.

Para a situação após RTFOT, a avaliação estatística dos resultados de penetração indicou que todas as amostras de bioligante apresentaram diferença significativa quando comparadas ao ligante asfáltico de referência. Quanto ao ponto de amolecimento, as amostras BL2% e BL4% não apresentaram diferença significativa comparadas ao CAP 50/70, pois os p-valores foram de 0,1087 e 0,0565, respectivamente, superando a significância de 5%.

Figura 34 - Resultados do ensaio de Penetração

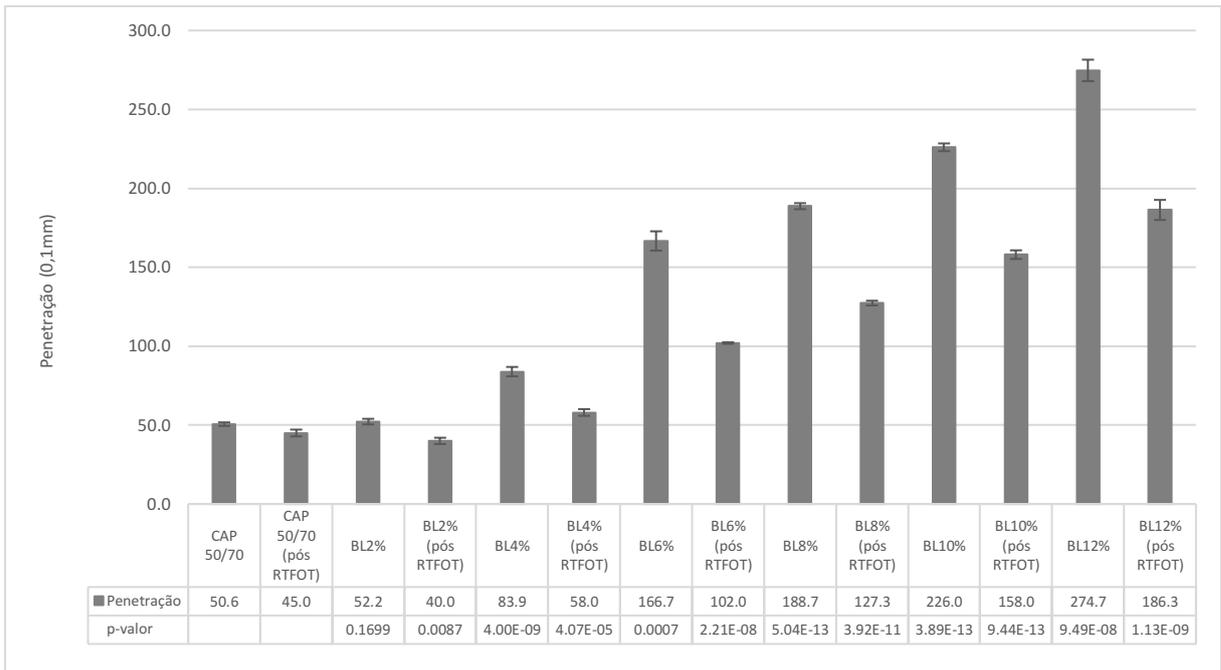
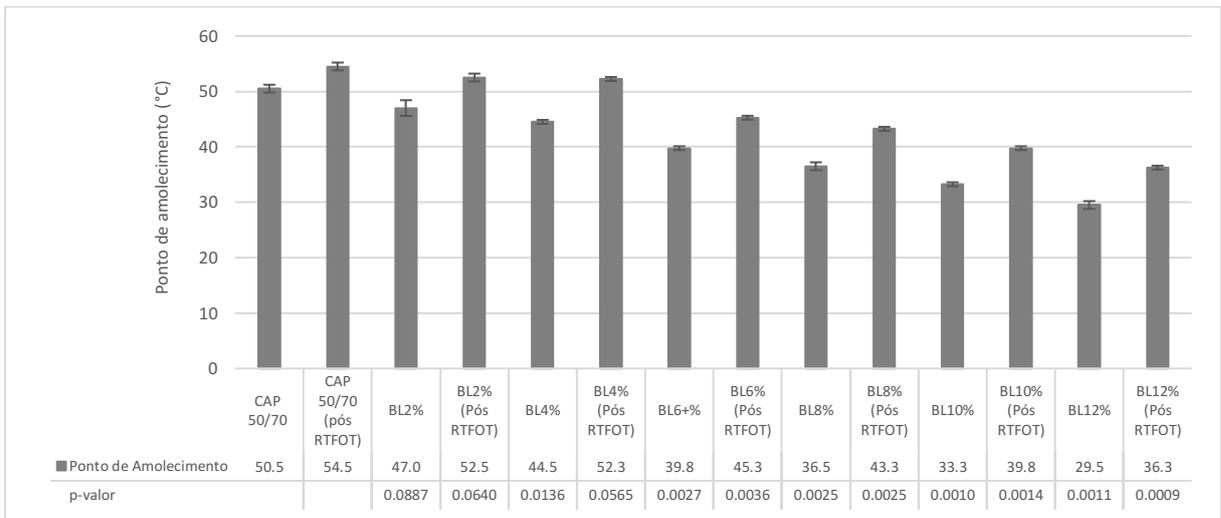


Figura 35 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento



O Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) foi avaliado pela Equação 18, proposta em 1936 por Pfeiffer e Van Doormaal, a partir dos valores de ponto de Amolecimento e penetração a 25°C.

$$IST = \frac{(500)(\log PEN) + 20(T^{\circ}C) - 1951}{(120) - (50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad Eq. 18$$

Onde:

T°C é o valor do ponto de amolecimento

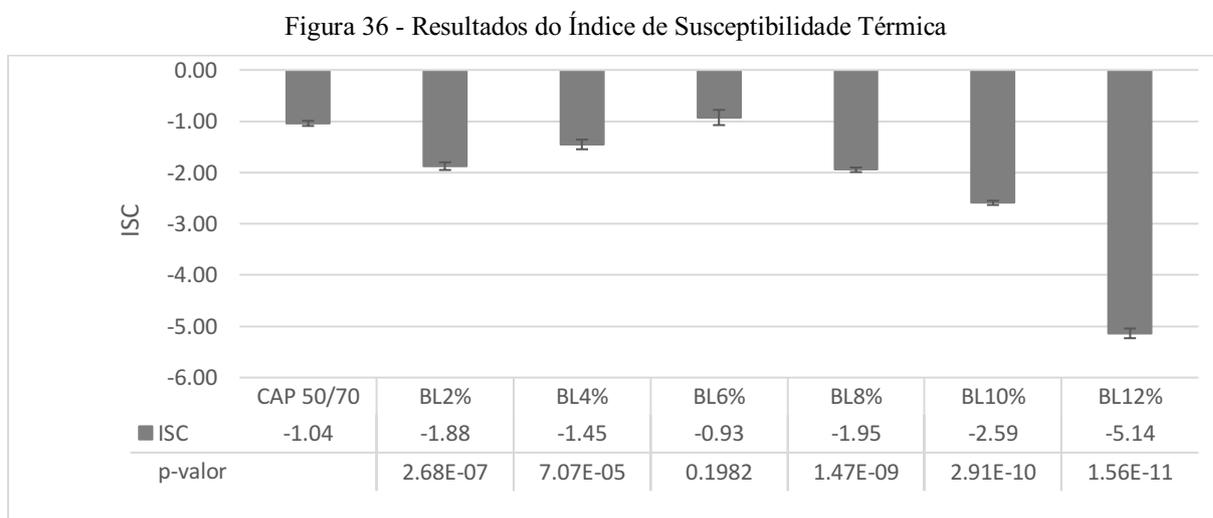
PEN é o valor da penetração à 25°C, 100 g, 5 s.

De acordo com Botaro et al. (2006) e Marinho filho et al. (2020) asfaltos pouco susceptíveis tornam-se duros e quebradiços, em condições de baixas temperaturas e asfaltos muito susceptíveis modificam sua consistência para pequenas variações de temperatura.

Senço (1997) especificou que IST na faixa de -2 e +2 corresponde a ligantes asfálticos que apresentam elasticidade, sendo denominadas tipo sol ou betumes normais.

Logo, a partir dos dados de IST mostrados na Figura 36 para as amostras analisadas, pode-se observar que o BL10% e BL12% são as amostras mais sensíveis às variações térmicas, tendendo a amolecer rapidamente com o incremento de temperatura.

O gráfico da Figura 36 também indica que o BL6% exibiu IST menor do que do ligante virgem, de IST igual a -1,04. No entanto, no teste t de *Student* o BL6% apresentou p-valor maior que a significância de 5% indicando que não existe diferença significativa entre o resultado dessa amostra e a do ligante virgem. Para os demais, o p-valor foi inferior à significância, sugerindo maior tendência de mudança de consistência com a variação de temperatura em comparação com o ligante virgem.



As Figuras 37 e 38 apresentam os resultados do ensaio de viscosidade. Nestas observa-se que houve uma redução da viscosidade do ligante asfáltico com o uso do óleo de algodão, antes e após RTFOT.

Luz et al. (2019) estudaram ligantes modificados com óleo de soja novo e residual, num teor de 2%, ligantes modificados com óleo de milho novo, num teor de 1%, e com óleo

de milho residual, num teor de 2%, e também verificaram menores viscosidades comparadas ao ligante puro. Qurashi et al. (2018) avaliaram a adição de óleo de motor ao ligante asfáltico, nos teores de 2, 4, 6 e 8% e constataram diminuição da viscosidade. Melo Neto (2022) verificou que a viscosidade do ligante asfáltico antes e após o RTFOT diminuiu com a inserção de ácido graxo da borra do óleo de soja nos teores de 1%, 3% e 5%.

Segundo Ruiz (2020) os bio-óleos podem trazer uma opção atrativa na reciclagem devido à redução da viscosidade dos ligantes asfálticos envelhecidos quando usados como modificadores.

Figura 37 - Resultados do ensaio de Viscosidade (antes do RTFOT)

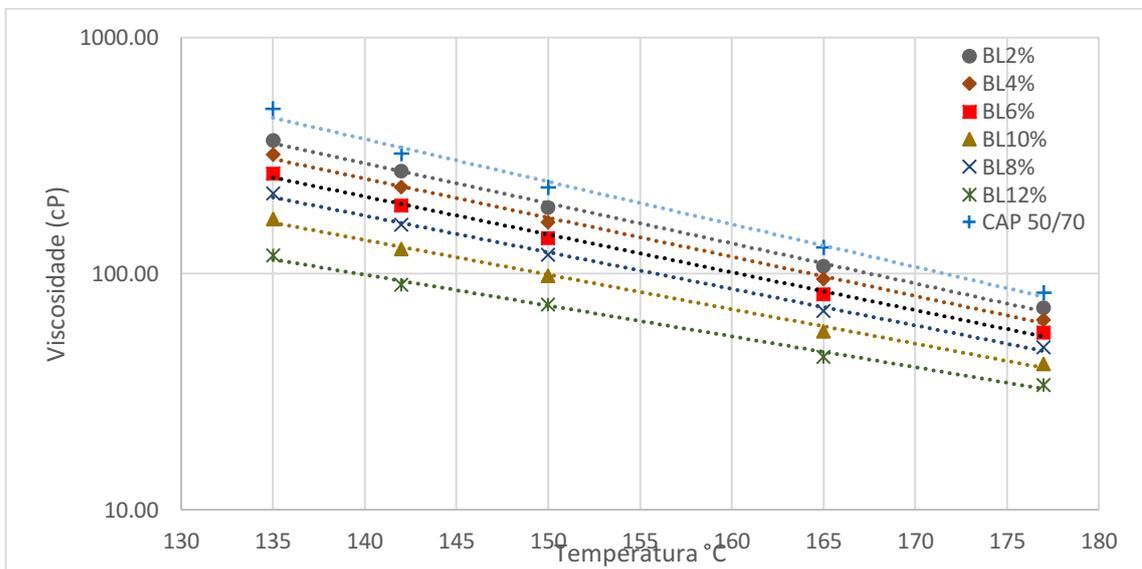
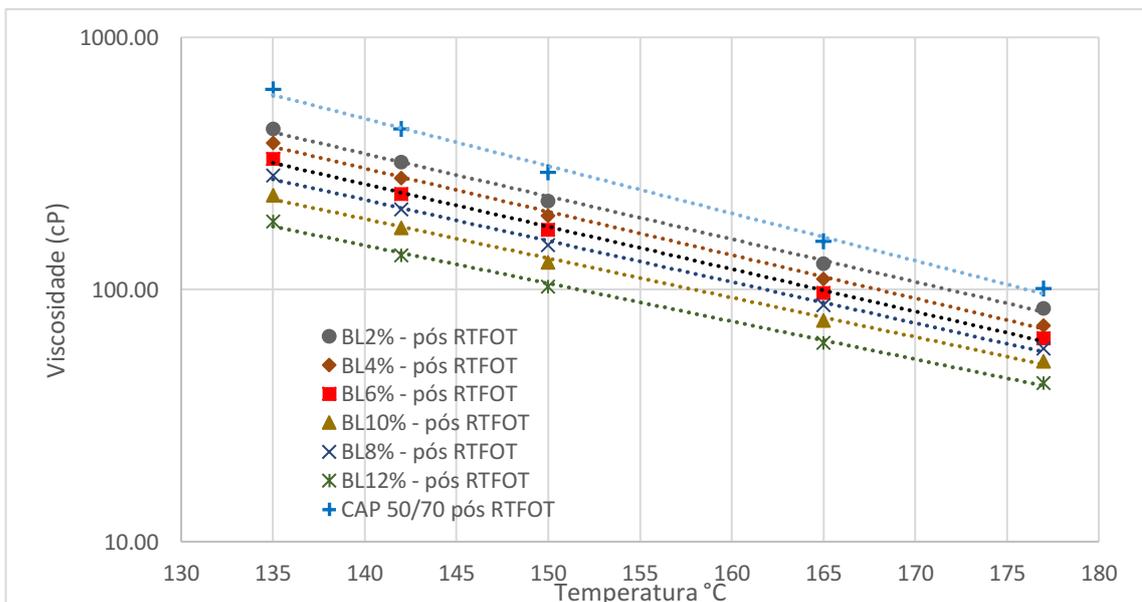


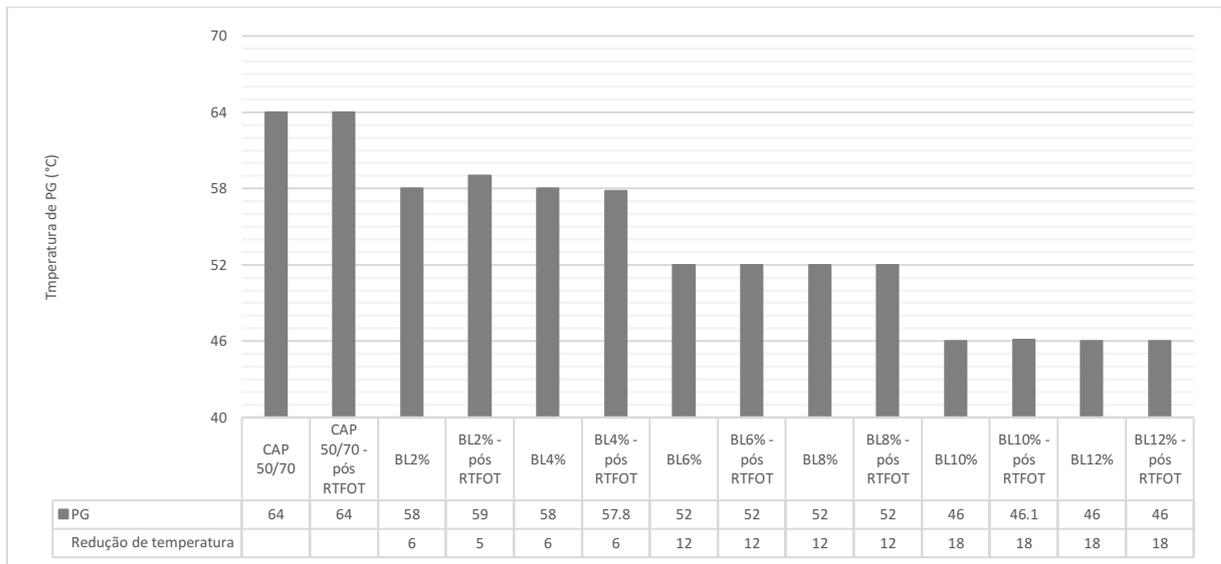
Figura 38 - Resultados do ensaio de Viscosidade (pós RTFOT)



A Figura 39 mostra as temperaturas de falha do PG contínuo para o ligante puro e para os bioligantes, na qual o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ atinge um valor inferior a 1kPa. Observa-se que houve uma redução da temperatura de *performance grade* do ligante asfáltico com a introdução do óleo de algodão, com destaque para os bioligantes BL10% e BL12% que obtiveram uma redução na ordem de 18°C no PG, antes e após o RTFOT.

Por meio dos resultados apresentados, verifica-se o potencial deste bioligante para proporcionar maiores taxas de reciclagem, considerando que no *Blending Chart* do modelo de mistura B do método SUPERPAVE, o teor de RAP permitido em misturas asfálticas é inversamente proporcional ao valor do PG do ligante asfáltico.

Figura 39 - Resultados do ensaio de Performance Grade



A Figura 40 mostra os resultados de compliância não recuperável (Jnr) para o ligante asfáltico virgem e os bioligantes, nas tensões de 100 Pa até 3,2 kPa. Observa-se que o Jnr diminuiu nos teores de 4% e 6% de óleo de algodão em ambas as intensidades de tensão. Esse comportamento indica que esses bioligantes são menos suscetíveis a deformações permanentes.

A porcentagem de recuperação elástica é mostrada na Figura 41. Por meio de um comparativo com o ligante asfáltico virgem, para 100Pa e 320Pa os bioligantes obtiveram percentual de recuperação menor, sendo praticamente zero em teores mais elevados de óleo. Tal resultado era previsto, pois como o ligante virgem utilizado não possui adição de polímeros, então a resposta elástica não é esperada.

De acordo com Anderson et al (2010) e com *Asphalt Intitute* (2010) o percentual de recuperação é um indicativo da resposta elástica retardada do ligante asfáltico, de modo que valores elevados para esta propriedade sinalizam uma componente elástica significativa no material na temperatura de realização do MSCR.

Figura 40 - Resultados da Compliância não recuperável

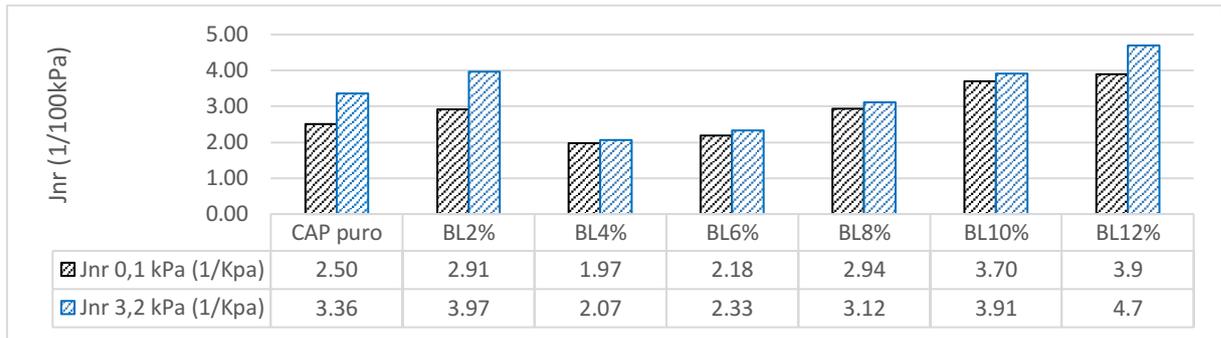
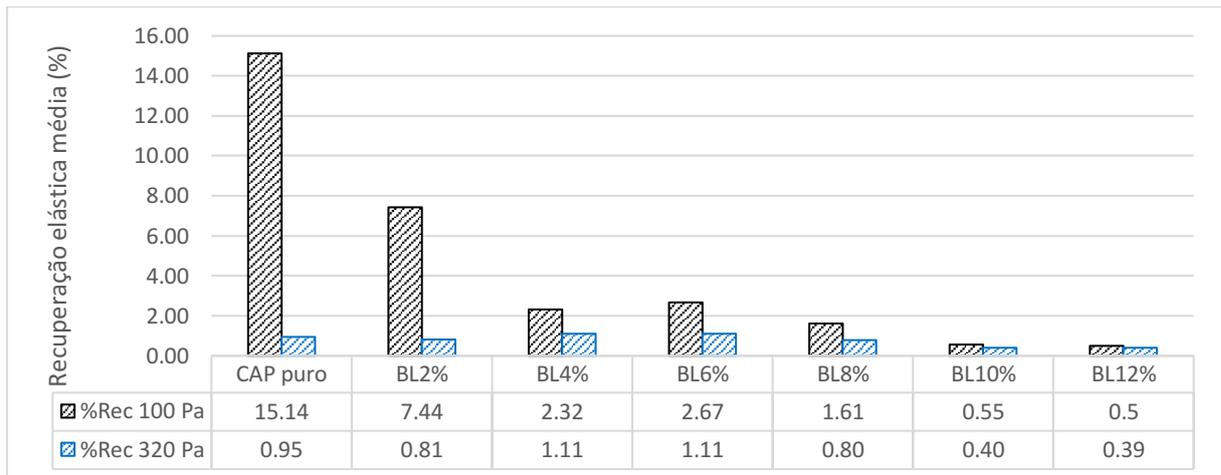


Figura 41 - Resultados da Recuperação elástica média



A escolha dos bioligantes usados nas misturas asfálticas recicladas foi baseada nos resultados de *performance grade* dos bioligantes avaliados nessa seção, optando-se por aplicar nas misturas asfálticas recicladas aqueles bioligantes cujos PGs permitiram maiores taxa de reciclagem, determinadas por meio dos *blending chart* do modelo de mistura B do método SUPERPAVE. O detalhamento dessa escolha será feito no item 3.2.4.9.

3.2.3 Etapa 2: Avaliação do cenário 100%RAP + Aditivo

Quando um aditivo é inserido no RAP, as quantidades de ligantes disponíveis e indisponíveis podem mudar devido à combinação das condições de processamento com a

ação do aditivo. Além disso, a quantidade total de ligante dentro deste cenário aumentará exatamente pela quantidade de aditivo que contribuirá para formar o ligante ativado e possivelmente permanecerá na mistura como componente residual (LO PRESTI et al., 2019).

Conforme explicado anteriormente, a variação do volume de vazios pode acontecer devido mudança no teor de ligante da mistura e a variação do módulo de resiliência pode estar relacionado com a alteração do volume de vazios da mistura. Além disso, a maior atividade do ligante RAP tende a produzir misturas com valores de RT mais altos (PIRES et al., 2019). Além disso, um aumento na temperatura de compactação amolece o ligante RAP e, assim, diminui a viscosidade geral da mistura, melhora a compactação e resulta em uma amostra mais coesa.

Nesse cenário, essa etapa da pesquisa pretendeu estabelecer um comparativo entre os valores das propriedades volumétricas (volume de vazios) e mecânicas (resistência à tração e módulo de resiliência) dos corpos de prova contendo somente RAP com os corpos de prova contendo RAP + aditivos (zeólita e óleo de algodão) no intuito de verificar a possível interferência dos aditivos estudados na disponibilidade de ligante RAP.

Os corpos de prova contendo RAP + zeólita e os corpos de prova contendo RAP + óleo de algodão foram confeccionados seguindo os mesmos procedimentos do fluxograma mostrado na Figura 29 do item 3.2.1.7. As amostras com óleo de algodão foram produzidas nas temperaturas de 120°C, 140°C e 160°C e as amostras com zeólita foram produzidas nas temperaturas de 140°C e 160°C. Ambos os aditivos foram adicionados ao RAP após as primeiras 2h de condicionamento, no momento da mistura para desmanche dos grumos.

Os teores de zeólita (percentual por massa de RAP) foram escolhidos seguindo as recomendações do fabricante. A escolha do teor de óleo de algodão (percentual por massa de ligante RAP) será detalhada no item 3.2.4.9.

Para as composições com zeólita, avaliou-se dois tempos de condicionamento após a sua inserção no RAP (1h e 2h), no intuito de analisar também a influência do efeito espumante desse mineral no volume de vazios, na resistência à tração, no módulo de resiliência das misturas asfálticas contendo 100% de RAP e, conseqüentemente, na disponibilidade do ligante RAP.

A nomenclatura de cada composição analisada, bem como as suas especificações de teor aditivos, tempo e temperatura de condicionamento e a quantidade total de corpos de prova (cps) moldados estão mostrados no Quadro 11 e no Quadro 12. Quadro 11

Quadro 11 - Composições para avaliação do cenário 100% RAP + óleo de algodão

Nomenclatura Adotada	% de óleo de algodão/massa de ligante RAP	t_{condicionamento} (h)	T_{condicionamento} (°C)	Quantidade de cps
2%Alg-120	2	2+2	120	4
2%Alg-140	2		140	4
2%Alg-160	2		160	4
4%Alg-120	4		120	4
4%Alg-140	4		140	4
4%Alg-160	4		160	4
6%Alg-120	6		120	4
6%Alg-140	6		140	4
6%Alg-160	6		160	4
10%Alg-120	10		120	4
10%Alg-140	10		140	4
10%Alg-160	10		160	4

Quadro 12 - Composições para avaliação do cenário 100% RAP + zeólita

Nomenclatura Adotada	% de zeólita/massa de RAP	t_{condicionamento} (h)	T_{condicionamento} (°C)	Quantidade de cps
0,3Z-1h-140	0,30	2 +1	140	4
0,3Z-2h-140		2+2		4
0,6Z-1h-140	0,60	2 +1		4
0,6Z-2h-140		2+2		4
0,3Z-1h-160	0,30	2 +1	160	4
0,3Z-2h-160		2+2		4
0,6Z-1h-160	0,60	2 +1		4
0,6Z-2h-160		2+2		4

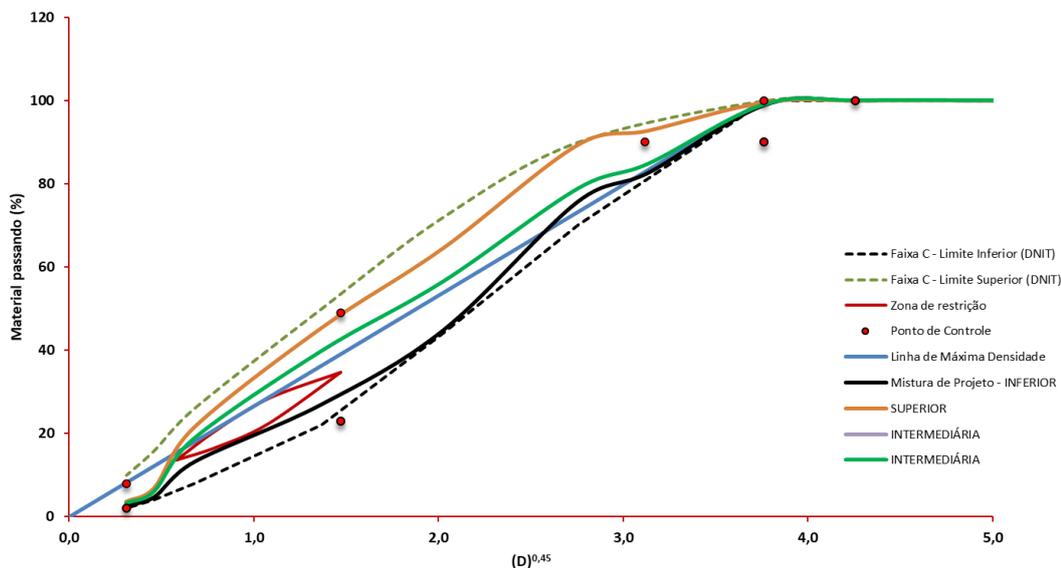
3.2.4 Etapa 4: Dosagem das misturas asfálticas estudadas

3.2.4.8 Dosagem das misturas asfálticas de referência

A metodologia de dosagem para a determinação da composição granulométrica e do teor ótimo de ligante da mistura de referência, denominada REF, foi a SUPERPAVE, com 100 giros, para nível de tráfego médio a alto e tamanho nominal máximo (TMN) de 19,0 mm. A faixa adotada foi a faixa C de revestimento da norma DNIT ES 031 (2006).

Inicialmente, foram determinadas três composições granulométricas (inferior, intermediária e superior), enquadradas dentro dos limites da faixa C especificados na norma DNIT ES 031 (2006), conforme mostrado na Figura 42.

Figura 42 - Curvas granulométricas inferior, intermediária e superior da mistura asfáltica de referência



Após a compactação dos corpos de prova para cada curva granulométrica, com um teor de ligante asfáltico inicial de 5%, e posterior avaliação dos seus respectivos parâmetros volumétricos, observou-se que a composição inferior foi a que mais e aproximou dos critérios SUPERPAVE requeridos para a faixa escolhida, conforme mostrado na Tabela 13

Tabela 13 - Parâmetros volumétricos das misturas asfáltica com teor de ligante inicial

Denominação da Mistura	% de ligante	%Gmm @Ninicial	%Gmm @Nprojeto	%Gmm @Nmáx.	%Vv	%VAM	%RBV	%P/A
INFERIOR	5	87,2	96	97,8	5,0	16,4	75,6	0,6
INTERMEDIÁRIA	5	92,5	96	96,6	3,7	15,3	73,8	0,65
SUPERIOR	5	88,4	96	98,1	5,6	15,9	74,9	0,73
Critério - Faixa C NORMA DNIT 031/2006 -ES	> 4,5	≤ 89,00	96	≤ 98,00	de 3% - 5%	15% mín	de 75% - 82%	0,6-1,2

Para a determinação do teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura da curva granulométrica inferior, procede-se compactando dois corpos de prova para os teores de

ligante de 4,7%, 5,2%, 5,7% e 6,2%. Os resultados estão mostrados na Tabela 14 e o teor de ligante que proporcionou um atendimento a todos os critérios SUPERPAVE foi o de 5,2%, sendo este considerado o teor de ligante asfáltico de projeto para a mistura de referência. A Tabela 15 mostra os percentuais em massa de cada material usado nessa mistura.

Tabela 14 - Parâmetros volumétricos das misturas asfáltica com teor de ligante inicial

Denominação da Mistura	% de Ligante	%Vv	%VAM	%RBV	%P/A
INFERIOR	4,7	5,5	11,2	64,3	0,6
	5,2	4,2	15,3	75,5	0,6
	5,7	2,5	15,2	75,4	0,6
	6,2	1,3	15,5	75,2	0,6
Critério - Faixa C NORMA DNIT 031/2006 –ES	> 4,5	de 3% – 5%	15% mín	de 75% – 82%	0,6-1,2

Tabela 15 - Traço da mistura asfáltica de referência (REF)

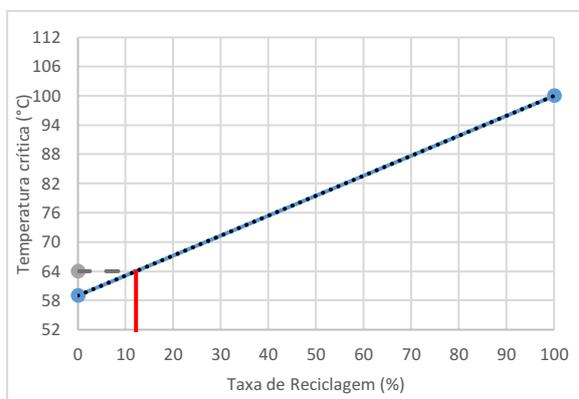
Material	% em massa
Brita 19mm	22,0%
Brita 12,5mm	41,0%
Pó de Pedra	26,8%
Areia	4,0%
Cal	1,0%
Ligante asfáltico (CAP 50/70)	5,2%

3.2.4.9 Dosagem das misturas asfálticas recicladas com uso de bioligantes

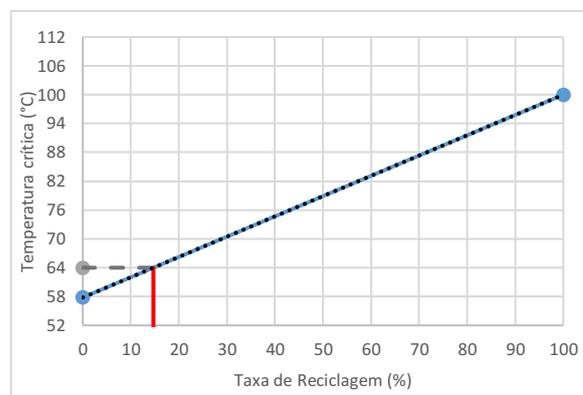
Como os PGs pós RTFOT dos bioligantes e do ligante RAP são conhecidos, na dosagem das misturas asfálticas recicladas com o uso dos bioligantes aplicou-se o *Blending Chart* do modelo de mistura B do método SUPERPAVE para encontrar o teor de RAP a ser usado em cada uma das composições. Para todas elas, o alvo foi a temperatura crítica máxima de 64°C. Os gráficos resultantes dessa avaliação estão mostrados nas Figura 43.

A Tabela 16 mostra o resumo dos dados de entrada e da taxa de reciclagem encontrada para cada uma das situações.

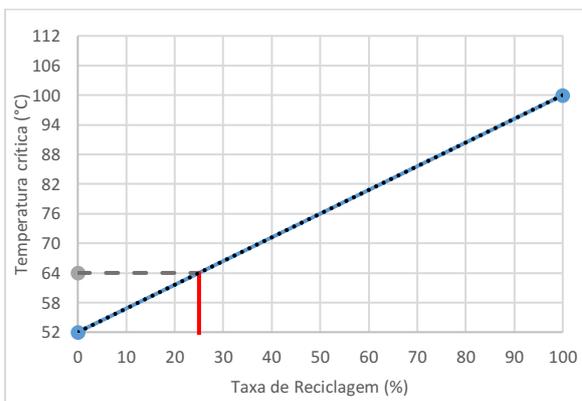
Figura 43 - Taxa de reciclagem para mistura asfáltica reciclada com (A) BL2%; (B) BL4%; (C) BL6%; (D) BL8%; (E) BL10%; (F) BL12%



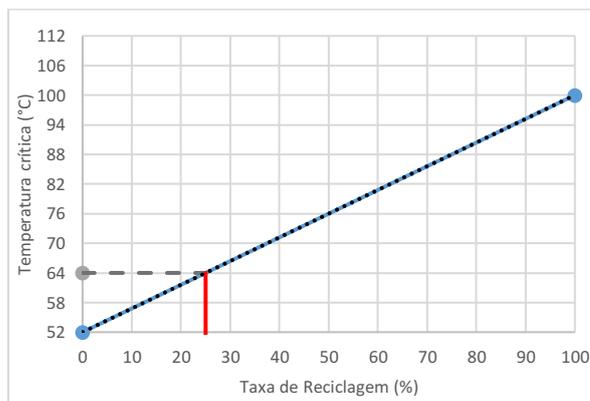
(A)



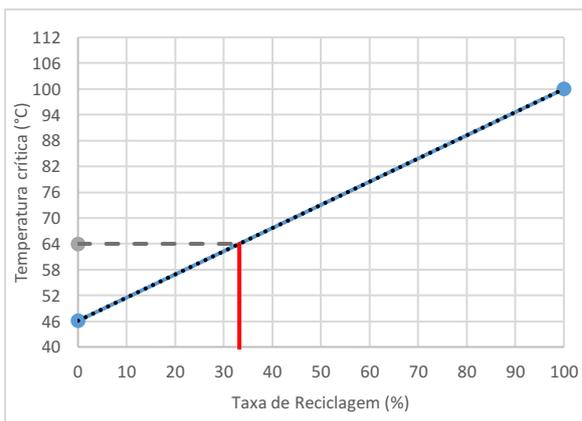
(B)



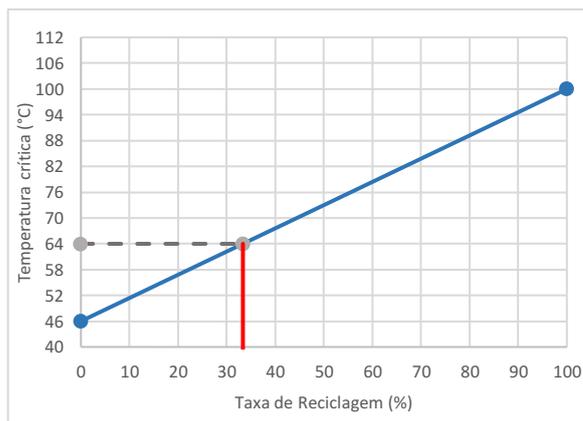
(C)



(D)



(E)



(F)

Tabela 16 - Traço da mistura asfáltica de referência

Bioligante	PG pós RTFOT (contínuo)	PG alvo	Taxa de Reciclagem (%)
BL2%	59	64	12
BL4%	58		15
BL6%	52		25
BL8%	52		25
BL10%	46		33
BL12%	46		33

Após a avaliação das taxas de reciclagem permitidas por cada bioligante, decidiu-se confeccionar as misturas asfálticas recicladas com bioligantes com os seguintes teores de óleo de algodão: 4%, 6% e 10%. Os teores de 8% e 12% foram descartados pois indicaram taxas de reciclagens iguais aos teores de 6% e 10%, respectivamente. As nomenclaturas adotadas para essas misturas recicladas estão mostradas no Quadro 13

Quadro 13 - Nomenclaturas das MAR com uso de bioligante

Nomenclatura adotada as misturas recicladas com bioligante	Descrição
MAR-BL4%	Mistura asfáltica reciclada com BL4% + 15% de RAP
MAR-BL6%	Mistura asfáltica reciclada com B6% + 25% de RAP
MAR-BL10%	Mistura asfáltica reciclada com BL10% + 33% de RAP

Para manter a similaridade com a composição granulométrica da mistura asfáltica de referência, as três misturas recicladas foram enquadradas na Faixa C do DNIT, conservando a proximidade com a mistura inferior selecionada anteriormente, conforme mostrado nos gráficos das Figura 44, Figura 45, Figura 46.

Figura 44 - Curvas granulométricas da MAR-BL4% (15% de RAP)

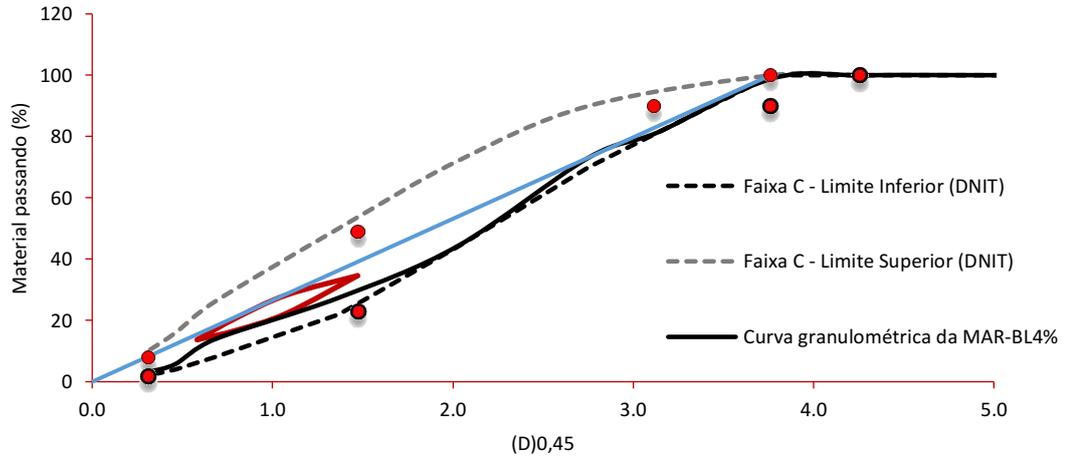


Figura 45 - Curvas granulométricas da MAR-BL6% (25% de RAP)

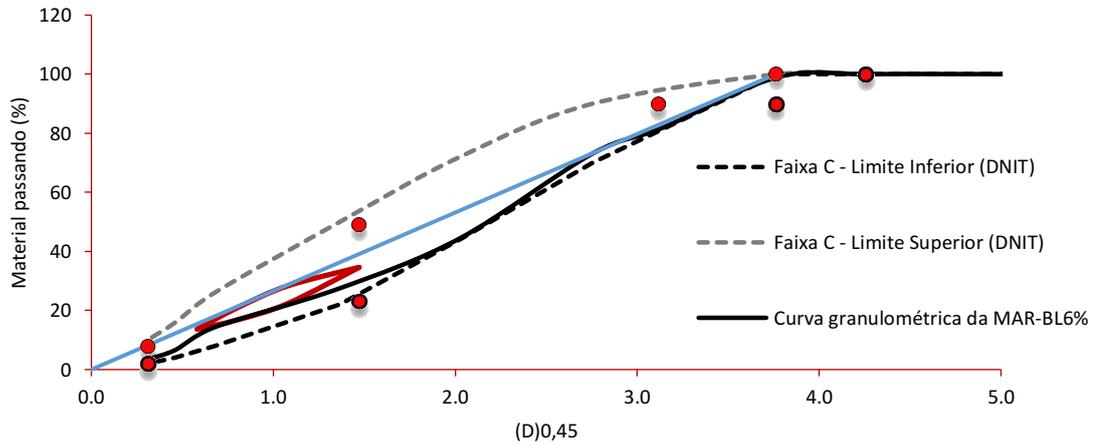
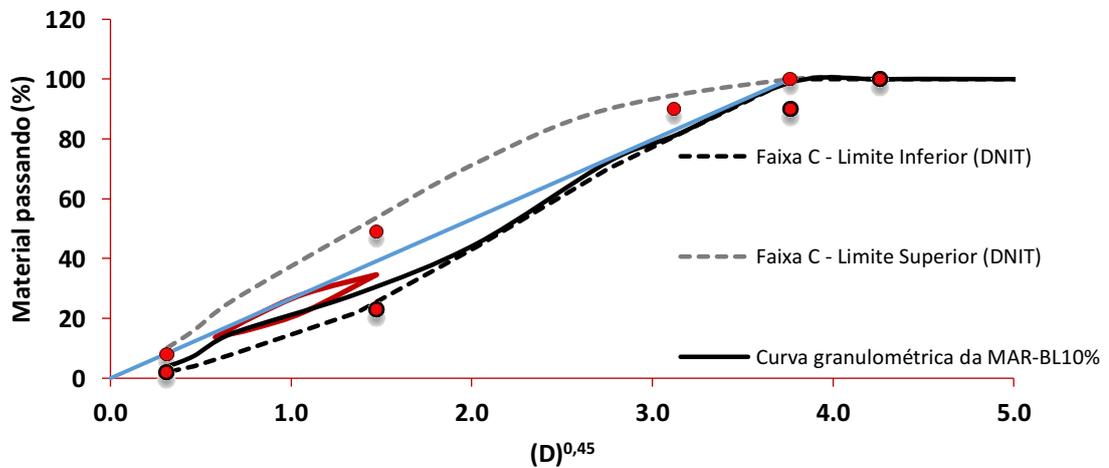


Figura 46 - Curvas granulométricas da MAR-BL10% (33% de RAP)



Para a determinação do teor de ligante de projeto dessas misturas asfálticas recicladas foram considerados os seguintes aspectos:

- As temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas recicladas foram estimadas por meio da Equação 19, desenvolvida por Wu et al. (2007) e estão apresentadas na Tabela 17 e Tabela 18.

$$\ln T_b = W^{0,5} \ln T_r + (1 - W^{0,5}) \ln T_f \quad \text{Eq. 19}$$

Onde,

T_b é a temperatura ótima relevante da mistura de ligantes (usinagem e compactação) ;

T_r é a temperatura ótima relevante do ligante do RAP (usinagem e compactação) ;

T_f é a temperatura ótima relevante do ligante virgem (usinagem e compactação) ;

W é o teor de RAP na mistura.

Tabela 17 - Estimativa da Temperatura de Usinagem

Bioligante	Tr	Tf	W	Tusinagem (°C) - Equação	Tusinagem (°C) - usada
BL4%	194	148	15%	164,28	160
BL6%	194	143	25%	166,30	160
BL10%	194	130	33%	163,19	160

Tabela 18 - Estimativa da Temperatura de Compactação

Bioligante	Tr	Tf	W	Tcompact(°C) - Equação	Tcompact (°C) - usada
BL4%	181	135	15%	151,28	151
BL6%	181	130	25%	153,05	151
BL10%	181	115	33%	149,19	151

- Para a temperatura de 160°C o valor do DoA'_{RT} foi de 91,2%. Logo, o percentual de ligante de projeto dessas misturas recicladas levou em conta a correção da quantidade de ligante RAP ativo nessa condição de condicionamento. Portanto, usando essa temperatura de 160°C, considerou-se que o ligante presente no RAP atua como “*partial blending*”, interagindo parcialmente com o bioligante.

A partir dessas hipóteses, prosseguiu-se com os procedimentos da dosagem SUPERPAVE. Os resultados do teor de ligante de projeto para cada mistura, bem como seus respectivos parâmetros volumétricos estão mostrados na Tabela 19. A Tabela 20 mostra os percentuais em massa de cada material usado nessas misturas.

Tabela 19 - Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas com uso de bioligante

Denominação da Mistura	% de bioligante	%Vv	%VAM	%RBV	%P/A
MAR-BL4%	4,4	4,0	15,3	77,51	0,66
MAR-BL6%	3,6	4,2	15,2	79,69	0,67
MAR-BL10%	3,3	4,0	15,5	80,41	0,67

Tabela 20 - Traço das misturas asfálticas recicladas com uso de bioligante

Material	Misturas recicladas com bioligante		
	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%
RAP (%)	15,0	25,0	33,0
Brita 19mm (%)	24,0	22,8	24,0
Brita 12,5mm (%)	34,6	31,8	28,0
Pó de Pedra (%)	16,0	10,8	7,7
Areia (%)	5,0	5,0	3,0
Cal (%)	1,0	1,0	1,0
Bioligante (%)	4,4	3,6	3,3

3.2.4.10 Dosagem das misturas asfálticas recicladas com uso de zeólita

As misturas asfálticas recicladas com zeólita foram confeccionadas com os mesmos teores de RAP das misturas asfálticas recicladas com bioligante, mantendo-se os traços de materiais.

No item 4.1 será visto que o teste t de Student indicou que a temperatura de 160°C é mais eficiente na redução do volume de vazios das amostras com zeólita, e a Análise de Variância mostrou que não há diferença significativa entre as amostras com 0,3% e 0,6%. Portanto, adotou-se o teor de zeólita de 0,3% e a temperatura de usinagem de 160°C.

Como a zeólita é um material pulverulento, o seu percentual foi descontado na quantidade de filler das misturas.

O teor de ligante de projeto permaneceu o mesmo das misturas asfálticas recicladas com bioligante, para cada taxa de reciclagem avaliada. No entanto, ao invés do bioligante, foi utilizado o ligante asfáltico virgem (CAP 50/70). As nomenclaturas adotadas para essas misturas recicladas estão mostradas no Quadro 14.

Quadro 14 - Nomenclaturas das MAR com uso de bioligante

Nomenclatura adotada as misturas recicladas com zeólita	Descrição
MAR-Z15	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 15% de RAP + 0,3% de zeólita
MAR- Z25	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 25% de RAP + 0,3% de zeólita
MAR- Z33	Mistura asfáltica reciclada com CAP 50/70 + 33% de RAP + 0,3% de zeólita

Após a compactação dos corpos de prova, foram avaliados os volumes de vazios e todos eles ficaram próximos de 4%. Portanto, os percentuais em massa de cada material usado nessas misturas ficaram sendo os que estão mostrados na Tabela 21.

Tabela 21 - Traço das misturas asfálticas recicladas com uso de zeólita

Material	Misturas recicladas com Zeólita		
	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-Z33
RAP (%)	15,0	25,0	33,0
Brita 19mm (%)	24,0	22,8	24,0
Brita 12,5mm (%)	34,6	31,8	28,0
Pó de Pedra (%)	16,0	10,8	7,7
Areia (%)	5,0	5,0	3,0
Cal (%)	0,7	0,7	0,7
Zeólita (%)	0,3	0,3	0,3
Ligante asfáltico (CAP 50/70) (%)	4,4	3,6	3,3

3.2.5 Etapa 5: Avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas estudadas

Todas as misturas dosadas foram avaliadas por meio dos ensaios mecânicos mostrados no Quadro 15. Isso permitiu avaliar a influência não somente da modificação do ligante, mas também do efeito espumante da zeólita, em comparação com as misturas asfálticas de referências, nas propriedades de resistência, rigidez e deformação.

Quadro 15 - Ensaio para a avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas

Ensaio	Norma
Resistência à tração por compressão diametral	DNIT 136/2018 - ME
Dano por umidade induzida	DNIT 180/2018 - ME
Módulo de resiliência	DNIT 135/2018 - ME
Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	DNIT 183/2018 - ME
Resistência à deformação permanente (Flow Number)	DNIT 184/2018 - ME
Cantabro	DNIT 383/99 - ME

3.2.5.10.3 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

Este ensaio determina a resistência à tração indireta de corpo de prova cilíndrico de mistura asfáltica, por meio do ensaio de compressão diametral com carregamento estático crescente até a ruptura (monotônico).

Sua configuração considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um corpo de prova cilíndrico que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendicularmente a esse diâmetro (Figura 47).

A aplicação das forças ocorre por meio de frisos metálicos com comprimento igual ao do corpo de prova, com objetivo de garantir a distribuição do carregamento ao longo das duas geratrizes opostas do corpo de prova (Figura 47). O corpo de prova foi submetido a um carregamento com velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até sua ruptura.

A resistência à tração foi determinada pela Equação 20:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{Eq. 20}$$

Onde:

σ_t = resistência à tração;

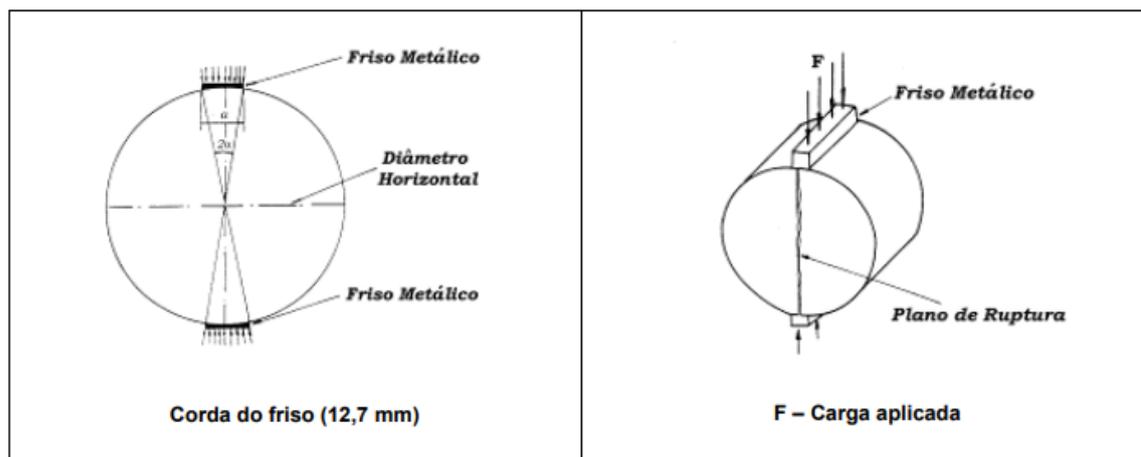
F = carga de ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova.

O resultado final foi a média de pelo menos 3 resultados, expresso em MPa.

Figura 47 - Esquema do ensaio de compressão diametral



Fonte: DNIT 136/2018 - ME

3.2.5.10.4 Dano por umidade induzida

Esse ensaio tem o intuito de verificar a sensibilidade à água de misturas asfálticas compactadas, moldadas em laboratório, avaliando-se a adesividade agregado-ligante e a coesão da mistura em condições resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água. O dano por umidade induzida se refere à relação entre a resistência à tração das amostras condicionadas e a resistência à tração das amostras em condições normais.

Seis corpos de prova para cada tipo de mistura foram moldados, garantindo para todos o volume de vazios de $7 \pm 1\%$ por meio da alteração da altura das amostras. Inicialmente, todos eles tiveram suas massas (A) e dimensões aferidas. Três corpos de prova pertenceram ao grupo condicionado e os outros três ao grupo não condicionado.

O grupo condicionado foi colocado em um recipiente com água, aplicando-se um vácuo na faixa de 13kPa a 97kPa de pressão absoluta por 5 a 10 minutos. Posteriormente, o corpo de prova foi retirado da água e o excesso de água superficial foi eliminado, determinando-se em seguida sua massa (B).

Por meio de uma relação entre a massa seca e massa na condição saturado superfície seca, foi calculado o volume de água absorvido (J) e a saturação (S).

Após o vácuo, os corpos de prova foram embalados em filme plástico e colocados dentro de sacos plásticos com 10ml de água, vedando-os e em seguida levando-os para o congelamento a $-18 \pm 3\%$ °C por um período mínimo de 16 horas.

Após o congelamento, os corpos de prova foram mergulhados em um banho d'água a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ por um tempo de $24 \pm 1\text{h}$. Após esse tempo, a temperatura do grupo foi ajustada num banho d'água a 25°C por 2 h a 3 h.

Depois do condicionamento, o conjunto foi imediatamente submetido ao ensaio de resistência à tração na prensa Marshall (RTc).

O grupo não condicionado teve sua temperatura ajustadas num banho a 25°C e posteriormente foi submetido ao ensaio de resistência à tração na prensa Marshall (RT). A resistência à tração retida por umidade induzida (RRT), foi calculada como sendo a razão entre RTc e RT.

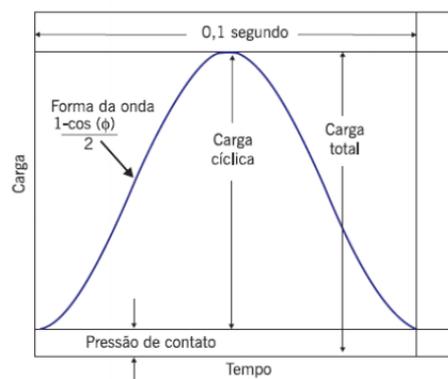
3.2.5.10.5 Módulo de resiliência (MR)

O módulo de resiliência é a relação entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente), por ciclo.

O ensaio para a obtenção do módulo de resiliência de misturas asfálticas utiliza o equipamento de compressão diametral de carga repetida, determinando também, o módulo instantâneo e o módulo total e pode determinar o coeficiente de Poisson.

O princípio do ensaio é baseado na aplicação de uma carga compressiva em formato de onda pulsante (*haversine*) (Figura 48) repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular, que gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação, sendo então medido o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada.

Figura 48 - Forma do pulso de carregamento no ensaio de módulo de resiliência



Após o período de condicionamento a 25°C e aplicação da pressão de contato, foi realizado o condicionamento de carregamento, aplicando-se 50 ciclos de carga igual a 10% da força da RT, numa frequência de 1Hz, com o tempo de aplicação de 0,10 segundo e, portanto, com 0,90 segundo de repouso ou descarregamento para a obtenção do módulo de resiliência.

3.2.5.10.6 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada

A fadiga é a redução da resistência de um material sob um carregamento repetido, de magnitude inferior à sua resistência sob o carregamento estático.

O ensaio foi feito na temperatura de 25°C na câmara da prensa UTM-25, por meio da aplicação de compressão diametral à tensão controlada, numa frequência de pulso de 1 Hz, sendo 0,1s para a aplicação da carga senoidal e 0,9s de repouso.

Os níveis de tensão adotados foram de 25, 30, 35 e 40% da resistência à tração da mistura, obedecendo a capacidade máxima do equipamento que é de 5000N.

As expressões da vida de fadiga em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) entre a tensão de tração e de compressão (Equação 21) e em função do parâmetro deformação resiliente (ε_i) (Equação 22) serão determinadas por plotagem dos pontos experimentais e regressão numérica, para obter os modelos matemáticos utilizados para análise da vida de fadiga.

$$\Delta\sigma = \frac{8F}{100\pi dh} \quad \text{Eq. 21}$$

$$\varepsilon_i = \frac{(\%RT)}{MR} \quad \text{Eq. 22}$$

Onde:

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

ε_i = deformação resiliente específica;

F= carga aplicada (N);

d= diâmetro do corpo de prova (cm);

h= altura do corpo de prova (cm);

RT= resistência à tração (MPa);

MR= módulo de resiliência (MPa);

Com o auxílio do Microsoft Excel®, em gráficos dílog, foram projetadas as curvas de fadiga $\Delta\sigma \times N$ e $\varepsilon_i \times N$ para cada uma das misturas de acordo com as Equações 23 e 24:

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad \text{Eq. 23}$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k_4} \quad \text{Eq. 24}$$

Onde:

N= número de aplicações de carga na ruptura, no fim do ensaio;

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

$k_1 ; k_2 ; k_3$ e k_4 = parâmetros determinados no ensaio;

3.2.5.10.7 Resistência à deformação permanente (Flow Number)

Este ensaio simula a condução de um veículo pesado repetidamente sobre a estrutura do pavimento e oferece como resposta o *flow number* (FN), que é o número de ciclos de carga que o pavimento pode tolerar antes que ocorra a fluência.

Os corpos de prova tiveram altura de $150,0 \pm 2,5$ mm e o diâmetro de $102,0 \pm 2,0$ mm. Para a compactação, a altura em 150,0 mm será fixada, ajustando-se o valor da massa da mistura asfáltica de forma a atingir o grau de compactação de $97,0 \pm 0,5$ % da densidade aparente de projeto da mistura asfáltica compactada (G_{mb}) ou $7 \pm 0,5$ % de volume de vazios.

Os corpos de prova foram colocados na câmara de temperatura a $60,0 \pm 0,5$ °C, por um período mínimo de 3 horas. O carregamento de ensaio foi realizado em duas etapas: o pré-carregamento e o carregamento cíclico. No pré-carregamento do corpo de prova, foi aplicada uma carga de compressão de contato com valor de $10,2 \pm 0,5$ kPa por 60 segundos.

Posteriormente, foi aplicado o carregamento cíclico de compressão, com magnitude variando desde a carga de contato até a carga máxima de 204 ± 4 kPa, com pulso de 0,1 segundo e repouso de 0,9 segundos.

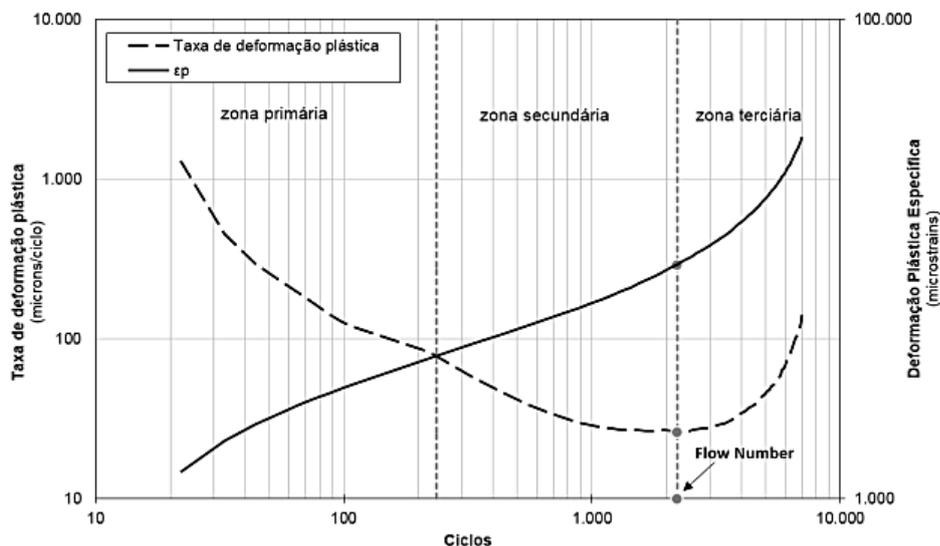
O resultado do ensaio foi mostrado num gráfico que relaciona deformação permanente com o número de ciclos aplicados. A curva gerada pode ser subdividida em três zonas de deformação: a zona primária (côncava para baixo), a zona secundária (reta) e a zona terciária (côncava para cima), conforme mostrado na Figura 49.

Na zona primária a densificação da amostra ensaiada ocorre a uma taxa elevada. Na zona secundária a taxa de deformação é praticamente constante e na zona terciária a deformação cresce exponencialmente, indicando rompimento da amostra. O número de ciclos onde ocorre a transição entre as zonas secundárias e terciárias é definido como *flow number* (FN).

A partir do ciclo referente ao FN a deformação ocorre a volume constante e a taxa de deformação volta a subir, visto que a amostra não oferece mais resistência aos carregamentos.

O critério de parada do ensaio foi a ruptura do corpo de prova, quando a zona terciária for alcançada, ou quando o número de ciclos atingir 7200.

Figura 49 - Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN



Fonte: adaptada de Witczak et al. (2002)

3.2.5.10.8 Cântabro

O arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento é denominado desgaste, sendo uma patologia comum em revestimentos brasileiros. O ensaio usualmente utilizado para determinação de resistência à desagregação é o ensaio Cântabro.

O ensaio de perda Cantabro foi realizado para a obtenção de uma medida indireta para detecção de problemas de durabilidade nas misturas asfálticas estudadas.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT – ME 383/99 e consistiu na avaliação da perda por desgaste das misturas empregando o aparelho de abrasão Los Angeles. Os corpos de prova foram pesados (P) e posteriormente colocados individualmente no aparelho de Abrasão Los Angeles sem nenhuma carga abrasiva, onde foram efetuadas 300 revoluções na velocidade angular de 30 rpm. Após esta etapa foram retirados do tambor e novamente pesados (P'). O percentual de desgaste da mistura asfáltica (A) foi calculado de acordo com a Equação 25:

$$A(\%) = \frac{P-P'}{P} \times 100 \quad \text{Eq. 25}$$

3.2.6 Etapa 6: Avaliação da sustentabilidade das misturas asfálticas estudadas

Nesta etapa foi realizada uma análise do potencial de circularidade, do ciclo de vida e do custo do ciclo de vida das misturas asfálticas estudadas para investigar até que ponto as alternativas são eficientes na melhora das dimensões ambientais e econômicas da sustentabilidade.

Essa análise teve por base a mensuração do Índice de Circularidade de Misturas Asfálticas (ICM_{MAR}), dos impactos ambientais e dos custos associados às etapas do ciclo de vida de todas as misturas asfálticas abordadas nesse estudo.

No final, foi feita uma análise integrada das dimensões mecânicas, ambientais e econômicas para embasar o processo decisório da escolha da alternativa que melhor atendesse ao conceito de sustentabilidade.

3.2.6.1 Economia circular para misturas asfálticas recicladas

A avaliação ambiental iniciou-se com a estimativa do potencial de circularidade das misturas asfálticas recicladas, por meio do cálculo do Índice de Circularidade de Misturas Asfálticas (ICM_{MAR}).

O ICM_{MAR} foi calculado tanto por meio da metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019), como também por meio de uma proposta de adaptação dessa metodologia.

A adaptação proposta nesse estudo se refere à incorporação de um conjunto maior de parâmetros mecânicos na quantificação do Fator de Utilidade (χ), além da resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente utilizadas por Mantalovas e Di Mino (2019).

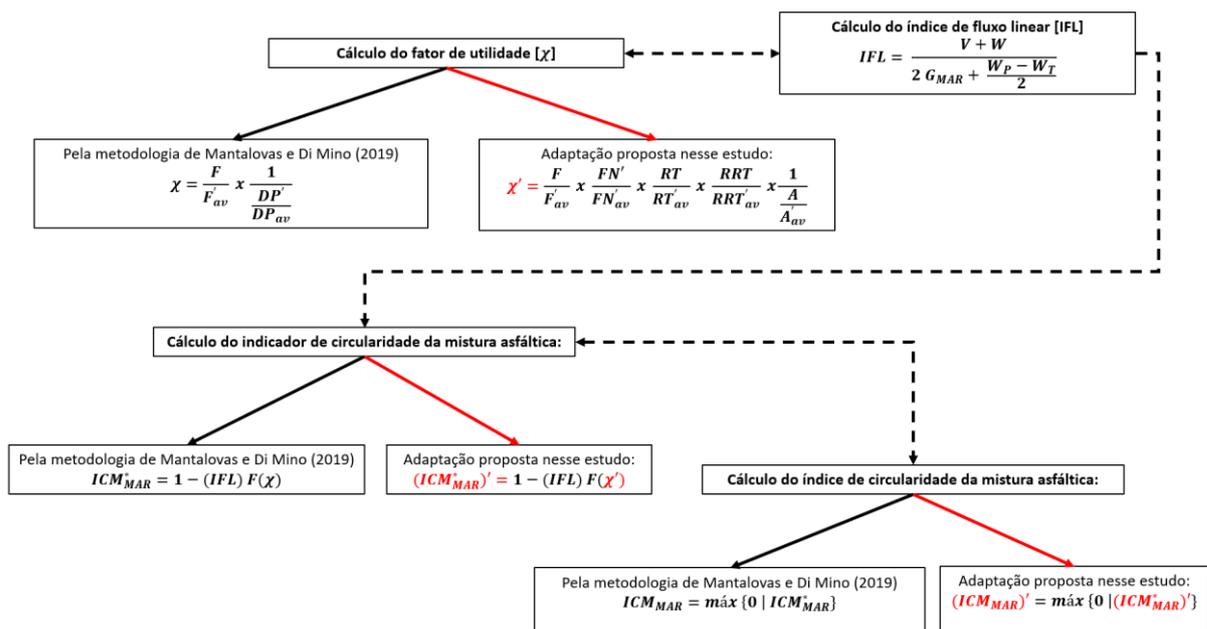
Na metodologia adaptada, no cálculo do fator de utilidade χ foram incluídos também os resultados de resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida e desgaste cântabro. A escolha dessas três propriedades se deu devido aos seguintes fatores:

- A resistência à tração tem sido usada como ferramenta de projeto e avaliação para misturas asfálticas SUPERPAVE. Essa propriedade é usada para prever o comportamento de tração das misturas asfálticas que são constantemente flexionadas quando submetidas ao carregamento do tráfego. É um indicador de resistência e aderência contra fadiga, trincamento por temperatura e deformações (KHOSLA E HARIKRISHNAN, 2007; BOURAIMA E QIU, 2017; VEROPALUMBO et al. 2019)

- Os pavimentos não estão sujeitos somente às ações das cargas do tráfego ao longo da vida de serviço. As condições ambientais à sua volta também exercem ação sobre seu desempenho. A penetração da água no interior dos revestimentos asfálticos pode desencadear a perda de propriedades mecânicas tais como o a resistência ao trincamento por fadiga e a resistência à deformação permanente. Esse fenômeno pode ocorrer por meio de dois mecanismos: a perda de coesão, que ocorre dentro do próprio filme de ligante asfáltico, e a perda de adesão que ocorre na interface entre os agregados e o ligante asfáltico (BROWN et al., 2009; FREITAS et al., 2019). Misturas asfálticas muito susceptíveis ao dano por umidade apresentam menor vida útil.
- A superfície do pavimento está frequentemente sujeita a ação abrasiva das rodas do veículo, que levam à perda de material por arrancamento (MABUI et al, 2019). Os resultados do ensaio de Cântabro apresentam o potencial de fornecer uma avaliação indireta da durabilidade mecânica, da coesão e da resistência à desintegração das misturas asfálticas ao longo da sua vida útil (MAIA et al., 2019).

Portanto, o cálculo do índice de circularidade das misturas asfálticas estudadas seguiu o fluxograma mostrado na Figura 50.

Figura 50 - Cálculo do Índice de circularidade das misturas asfálticas estudadas



Onde:

IFL é o índice de fluxo linear, calculado conforme detalhado no item 2.8.1;

χ é o fator de utilidade, calculado conforme Mantalovas e Di Mino (2019);

χ' é o fator de utilidade, calculado por meio da proposta de adaptação desse estudo;

F = número de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga da mistura asfáltica reciclada;

F'_{av} = número de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga da mistura asfáltica de referência;

DP' = número de ciclos de carregamento antes de atingir um determinado valor de profundidade de deformação da mistura asfáltica reciclada;

DP'_{av} = número de ciclos de carregamento antes de atingir um determinado valor de profundidade de deformação da mistura de referência;

FN' = número de ciclos de carregamento suportado pela mistura asfáltica antes de atingir um dos critérios de parada: 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 *microstrains*;

FN'_{av} = número de ciclos de carregamento suportado pela mistura asfáltica de referência antes de atingir um dos critérios de parada: 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 *microstrains*;

RT = resistência à tração da mistura asfáltica reciclada;

RT'_{av} = resistência à tração da mistura asfáltica de referência;

RRT = resistência ao dano por umidade induzida da mistura asfáltica reciclada;

RRT'_{av} = resistência ao dano por umidade induzida da mistura asfáltica de referência;

A = resistência ao desgaste Cântabro da mistura asfáltica reciclada;

A'_{av} = resistência ao desgaste Cântabro da mistura asfáltica de referência;

ICM^*_{MAR} = indicador de circularidade da mistura asfáltica, calculado conforme Mantalovas e Di Mino (2019);

$(ICM^*_{MAR})'$ = indicador de circularidade da mistura asfáltica, calculado conforme a proposta de adaptação desse estudo;

ICM_{MAR} = índice de circularidade da mistura asfáltica, calculado conforme Mantalovas e Di Mino (2019);

$(ICM_{MAR})'$ = índice de circularidade da mistura asfáltica, calculado conforme a proposta de adaptação desse estudo;

A comparação do valor do ICM_{MAR} calculado seguindo a metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019) e do ICM_{MAR} calculado com a inserção dessas outras três propriedades

mecânicas das misturas asfálticas no Fator de Utilidade permitiu realizar uma verificação da sensibilidade desse índice frente a consideração de uma quantidade maior de unidades funcionais do produto.

3.2.6.1.1 Pressupostos para o cálculo dos ICM_{MAR} das misturas asfálticas estudadas

A seguir serão explicados alguns pressupostos considerados no cálculo dos ICM_{MAR} das misturas asfálticas estudadas, pelos dois métodos:

- O ICM_{MAR} foi calculado com base na massa (kg) de mistura asfáltica necessária para pavimentar 1km de rodovia com espessura de 7,5cm;
- A fração do produto coletado para a reciclagem no final da vida útil do pavimento foi considerada igual a 70%, justificada pela média do percentual de reaproveitamento de RAP em misturas asfálticas à quente e mornas praticado em países europeus e americanos, conforme discutido no item 2.1.1.
- A eficiência do processo de reciclagem na fase 1 (tratamento do RAP) adotada foi de 100%, pois nesse estudo o RAP foi utilizado no seu estado bruto, sem passar por nenhum tipo de beneficiamento;
- A eficiência do processo de reciclagem na fase 2 (produção de mistura asfáltica) adotada foi de 98%, considerando as perdas de material durante a fase de produção;
- Para as duas condições de cálculo de ICM_{MAR} foram avaliados dois cenários distintos em termos de fadiga: uma condição de carregamento médio (30% da RT) e uma condição de carregamento elevado (40% da RT);

3.2.6.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das misturas asfálticas recicladas

Para a complementação da análise da sustentabilidade ambiental das misturas asfálticas recicladas, foi realizada uma avaliação do ciclo de vida com base em adaptações dos procedimentos adotados nas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), NBR ISO 14044 (ABNT, 2009).

A ACV realizada também foi baseada no Documento de Orientação para a Preparação de Regras de Categoria de Produto (PCR) e declarações ambientais de produto (EPD) para misturas de asfalto (*Guidance Document For Preparing Product Category Rules (Pcr) And*

Environmental Product Declarations (Epd) For Asphalt Mixtures) da Associação Europeia de Pavimento Asfáltico (EAPA) e no estudo da Associação Nacional de Pavimentos Asfálticos dos Estados Unidos (NAPA) intitulado Avaliação do ciclo de vida de misturas de asfalto em apoio a uma declaração ambiental de produto (*Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration*).

3.2.6.2.1 Definição de objetivo e escopo da ACV

- **Objetivo da ACV**

O objetivo da aplicação da ACV nesse estudo foi calcular e analisar os impactos ambientais das diferentes composições de misturas asfálticas (REF; MAR-BL4%; MAR-BL6%; MAR-BL10%; MAR-Z15; MAR-Z25; MAR-Z33) consideradas como alternativas de projeto para a camada de revestimento de um pavimento.

A aplicação da ACV permitiu uma análise comparativa entre as alternativas de projeto para, em conjunto com o Índice de Circularidade de Misturas Asfálticas, identificar a mais vantajosa em termos ambientais.

- **Unidade funcional**

A unidade funcional é uma unidade de referência à qual se relacionam os resultados da ACV, e que deve representar a função do sistema analisado. A unidade funcional declarada para esta ACV é de 1km de pavimento com 7,0 metros de largura e que suporta um tráfego médio de $10^6 < N \leq 10^7$ possuindo, portanto, 7,5cm de espessura de camada de revestimento. O horizonte de vida útil adotado para essa camada de revestimento foi de 10 anos (tempo médio de vida útil previsto pelo DNIT para as misturas asfálticas empregadas na camada de rolamento).

A distância média de transporte (DMT) considerada foi de 50 km, baseada nas indicações do Manual de Custos Médios Gerenciais (DNIT, 2019), que recomenda esse valor para fins de levantamento de custos. Essa DMT foi utilizada para todas as situações de transporte necessárias nessa ACV.

- **Fronteiras do sistema do produto**

Nesse estudo, a ACV das misturas asfálticas obedeceu a abordagem *Cradle-to-grave* (“do berço ao túmulo”), considerando as etapas desde a obtenção da matéria-prima até o fim da vida útil do produto concebido.

A Figura 51 ilustra a fronteira do sistema considerada nesse estudo, com todos os processos elementares analisados. A fronteira inicia na fase de aquisição de todos os materiais componentes das misturas e se encerra com o RAP sendo conduzido para a usina para ser reciclado (na ACV de todas as alternativas de misturas recicladas) ou para a disposição em aterro sanitário (na ACV da alternativa de REF).

Todas as entradas e saídas de cada processo elementar da fronteira do sistema do produto foram incluídas no cálculo dos impactos.

➤ No estágio do produto foram considerados:

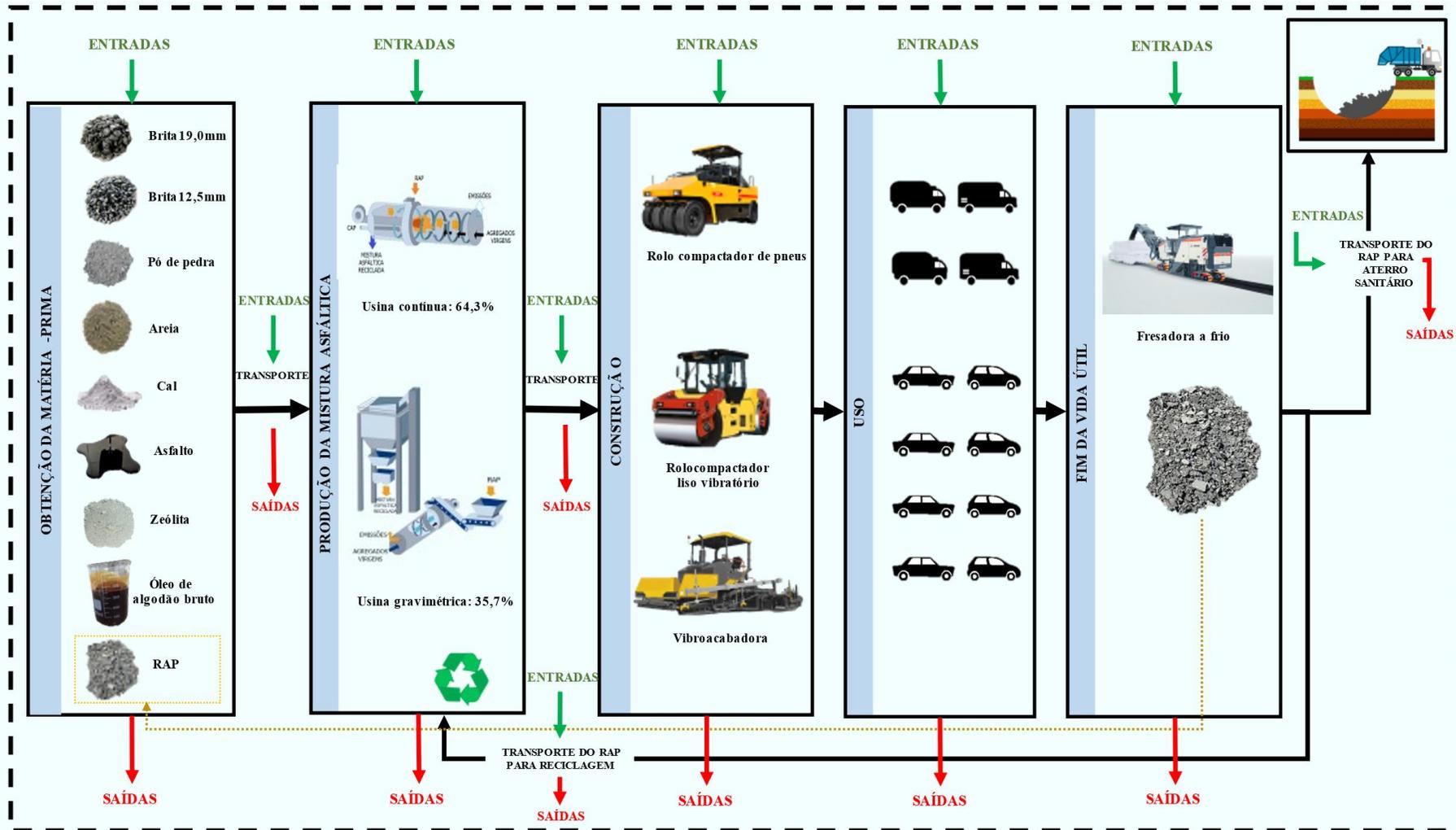
- Os processos de extração e britagem, a manutenção de equipamentos e a infraestrutura necessária para a produção dos agregados (brita 19mm, brita 12,5mm e pó de pedra);
- O transporte dos blocos de rocha até o britador primário;
- A extração da areia natural por dragagem, a manutenção de equipamento e o processamento da areia;
- A extração do petróleo e seu refino em asfalto;
- O transporte do petróleo para refinarias e o transporte do asfalto para o terminal de distribuição;
- A extração, processamento e disponibilização em embalagens da cal;
- Os processos de extração e britagem e a disponibilização em embalagens da zeólita;
- A recepção das sementes de algodão, o processamento das sementes e a produção do óleo bruto por meio da técnica de extração por solvente.
- O transporte de todas as matérias-primas para a usina;
- A ocupação do solo, a infraestrutura e os maquinários da usina para a produção das misturas asfálticas;
- Os processos de produção das misturas asfálticas (peneiramento, secagem, mistura e armazenamento).

- No estágio da construção foram considerados:
 - Os maquinários para pavimentação;
 - As emissões e lixiviação decorrentes do pavimento construído.

- No estágio de uso foram considerados:
 - O tráfego de veículos leves e pesados;
 - A transformação do solo ocupado pela rodovia.

- No estágio de fim de vida foram considerados:
 - A fresagem e o transporte do RAP para a reintrodução na cadeia produtiva (usina), na ACV das alternativas de misturas recicladas, ou para aterro sanitário, na ACV da alternativa de REF.

Figura 51 - Diagrama da fronteira do sistema com seus processos unitários e tipos de dados.



3.2.6.2.2 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

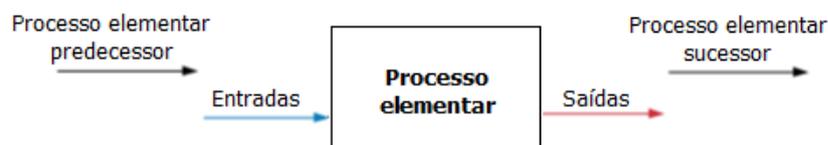
- Coleta de dados

Nesta fase foi realizada a coleta de dados secundários para a construção do inventário de cada processo elementar, a fim de quantificar as entradas de energia, de matéria-prima, entradas auxiliares e outras; os produtos, coprodutos e resíduos; as liberações para a atmosfera, água e solo e outros aspectos ambientais.

Para a aquisição, foram consultados bancos de dados disponibilizados no OpenLCA nexus, repositório online de inventários de ciclo de vida, sendo a maioria extraída da base Ecoinvent. Outros dados foram obtidos na literatura, por meio de consultas em publicações técnico-científicas confiáveis.

Para cada processo elementar foi construído um Diagrama de Fluxo de Vida (DFV) ilustrando os seus fluxos de entrada e saída e a quantificação dos dados de cada fluxo, de acordo com a unidade funcional. A Figura 52 apresenta o modelo do DFV confeccionado para cada processo elementar da ACV.

Figura 52 - Modelo do Diagrama de Fluxo de Vida (DFV) utilizado



- Modelagem do ciclo de vida

Os dados inventariados, organizados em concordância com a fronteira e referenciados à unidade funcional, foram inseridos no software OpenLCA® para a modelagem e avaliação do ciclo de vida.

O OpenLCA® é um software gratuito, desenvolvido em 2006 pela empresa GreenDelta, que permite a importação de bancos de dados disponibilizados no OpenLCA nexus e a inserção de dados manualmente.

3.2.6.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A fase de avaliação de impacto da ACV teve como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV. Foi feita uma associação dos dados do inventário com categorias de impactos ambientais e indicadores de categoria.

Para a realização da AICV, escolheu-se o método ReCiPe (2016), uma continuação dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2000, que integra e harmoniza as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura comum e consistente.

No nível intermediário (*midpoint*) do método são avaliados todos os indicadores ambientais contemplados por ele, de forma individual.

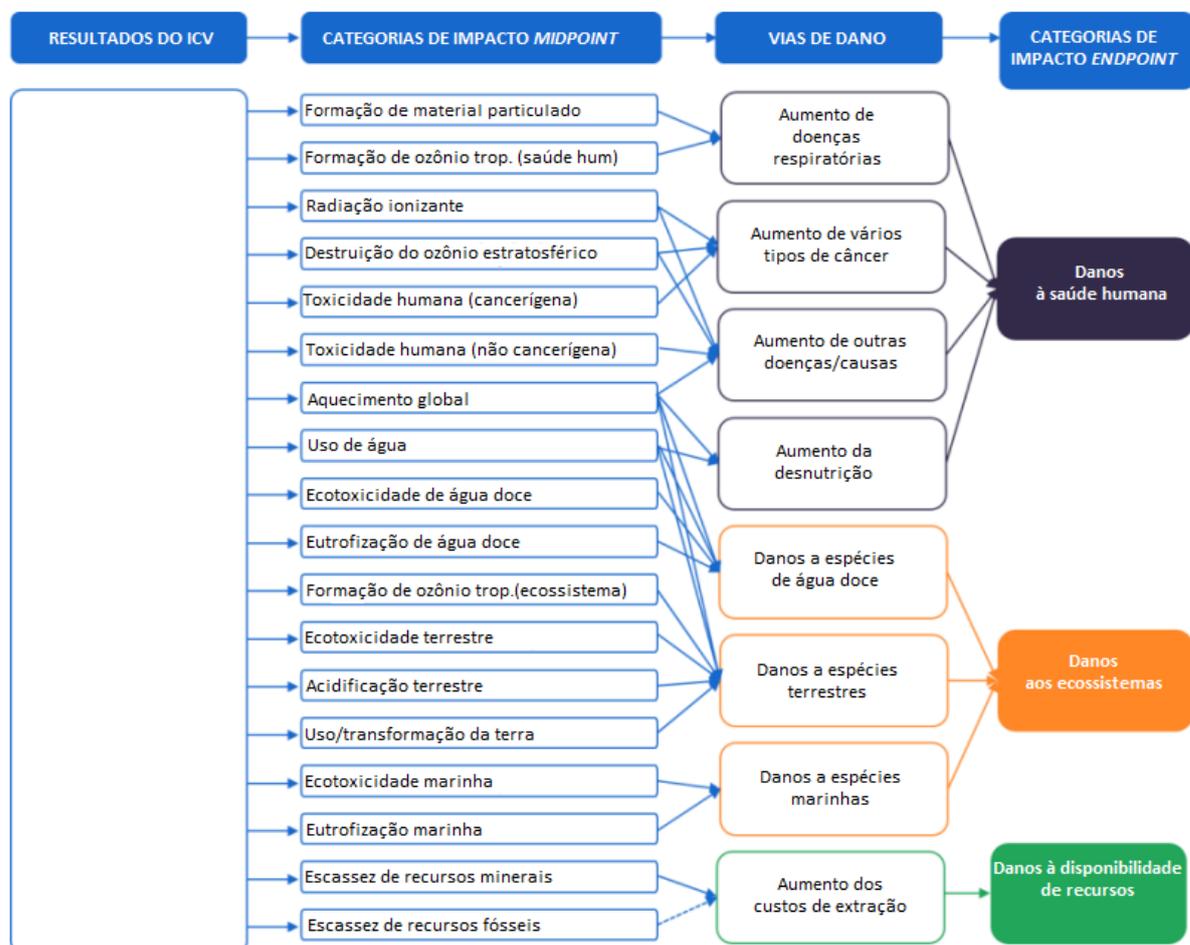
No nível final (*endpoint*) os mecanismos ambientais do nível intermediário são convertidos e agregados em três categorias de impacto: qualidade dos ecossistemas, saúde humana e escassez de recursos. O endpoint é uma medida do dano – no final da cadeia de causa e efeito – causado por um estressor em termos de anos de vida humanos perdidos e anos vividos com deficiência, espécies desaparecidas e recursos financeiros perdidos.

A visão geral da ligação entre os mecanismos ambientais, ou seja, os pontos médios e as três categorias de impacto finais são mostrados na Figura 53.

As duas abordagens são complementares na medida que a *midpoint* é direcionada aos problemas, fornecendo resultados confiáveis, porém de difícil comparação entre eles, e a *endpoint* é direcionada ao dano, permitindo uma interpretação menos complexa dos resultados da ACV, possibilitando o agrupamento dos problemas em três categorias finais.

O Quadro 16 mostra as categorias de impacto *endpoints* relacionados a cada uma das três áreas de proteção. DALYs (anos de vida ajustados por incapacidade), relevantes para a saúde humana, representam os anos perdidos ou que uma pessoa fica incapacitada devido a uma doença ou acidente. A unidade para a qualidade do ecossistema é a perda de espécies locais ao longo do tempo (ano espécie). A unidade de escassez de recursos é o dólar (US\$), que representa os custos extras envolvidos na extração futura de recursos minerais e fósseis.

Figura 53 - Visão geral das categorias de impacto contempladas na metodologia ReCiPe2016 e sua relação com as áreas de proteção.



Fonte: Adaptado de Huijbregts et al. 2016

Quadro 16 - Visão geral das categorias de endpoint, indicadores e fatores de caracterização.

Área de proteção	Endpoint	Nomenclatura	Unidade
saúde humana	danos à saúde humana	perda de anos de vida ajustada por incapacidade	ano
ambiente natural	danos à qualidade do ecossistema	perda de espécies integrada no tempo	espécie×ano
escassez de recursos	danos à disponibilidade de recursos	custo excedente	dólar

Todas as categorias de *midpoint* e *endpoint* do método ReCiPe (2016) estão disponíveis em três versões, levando em conta três perspectivas culturais diferentes:

- individualista é baseada no interesse de curto prazo, tipos de impacto incontestáveis e otimismo tecnológico em relação à adaptação humana para evitar problemas futuros;

- hierárquica baseia-se num consenso científico, mais comuns em relação a prazos, utilizando-se de períodos de tempo médio;
- igualitária é a perspectiva mais preventiva, tendo em conta o período de tempo mais longo e todas as vias de impacto para as quais existem dados disponíveis.

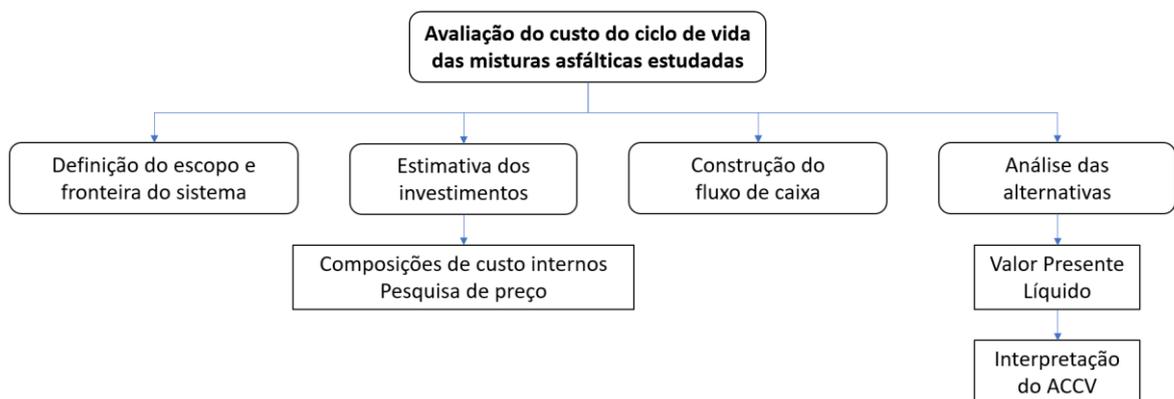
Nesse estudo optou-se por realizar uma avaliação mista. As três categorias de impacto *endpoint* foram avaliadas numa perspectiva hierárquica e a categoria *midpoint* “aquecimento global” também foi avaliada por ter sido uma das maiores causadoras de impactos ambientais para todas as alternativas de misturas.

3.2.6.3 Avaliação do Custo do Ciclo de Vida das misturas asfálticas recicladas

A Avaliação do Custo do Ciclo de Vida permitiu uma análise econômica sistemática dos custos das fases do ciclo de vida, ao longo de um período de análise, das misturas asfálticas recicladas.

A metodologia empregada nesta etapa está mostrada na Figura 54 e detalhada a seguir.

Figura 54 - Fluxograma da metodologia de ACCV



- Definição do escopo e fronteira do sistema

Esta análise contemplou as etapas de fabricação da mistura asfáltica, transporte, construção do revestimento do pavimento e seu fim de vida útil após 10 anos de uso. A unidade funcional foi a mesma declarada na ACV (1km de rodovia). Assim sendo, a ACCV realizada nessa pesquisa pode ser classificada como ambiental.

A fase de extração de matéria-prima foi suprimida, pois considerou-se que a obtenção dos materiais seria realizada diretamente no comércio.

A fase de uso do pavimento devido a operação dos veículos, atraso de tráfego e outros, também não foi considerada nesse estudo, pois as premissas adotadas seriam as mesmas para todas as alternativas, o que causaria um impacto de valor igual no ACCV delas.

- Estimativa dos investimentos

Na estimativa dos investimentos foram considerados os custos internos associados ao ciclo de vida das misturas asfálticas referentes à aquisição das matérias-primas e de aditivos (diretamente no comércio), transporte, construção do pavimento e fim da vida útil.

Para isso elaborou-se composições unitária para cada uma dessas fases com base no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT referente ao mês de outubro de 2022.

As descrições das composições utilizadas foram as seguintes:

- Para a produção da mistura asfáltica de referência: Código 6416078 – Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais (APÊNDICE A);
- Para a produção das misturas asfálticas recicladas: Código 6416098 – Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial (APÊNDICE B);
- Para a execução do revestimento usando a mistura asfáltica de referência: Código 4011463 – Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais (APÊNDICE C);
- Para a execução do revestimento usando as misturas asfálticas recicladas: Código 4011478 – Concreto asfáltico reciclado em usina com adição de asfalto - brita comercial (APÊNDICE D);
- Para o serviço de fresagem do pavimento, com qualquer alternativa de mistura asfáltica, no fim da sua vida útil: Código 4011479 – Fresagem contínua de revestimento asfáltico (APÊNDICE E).

- Determinação dos custos

Como a distância média de transporte (DMT) adotada foi de 50km para todas as ocorrências de transporte inseridas nas composições, decidiu-se por utilizar os custos unitários dos materiais, equipamentos e mão de obra dos relatórios sintéticos do ano de 2022 referentes

ao estado de São Paulo, onde fica localizado o fornecedor da zeólita, existindo também nesse estado fornecedores de óleo bruto de algodão.

Os custos horários de equipamentos utilizados incluem os custos de propriedade (depreciação, remuneração de capital, seguros e imposto), custos de manutenção (material rodante, partes de desgaste, reparos em geral) e custos de operação (combustíveis, filtros, mão-de-obra e operação).

Os custos de mão-de-obra foram definidos em função do salário, encargos sociais (contribuições previdenciárias), encargos complementares (alimentação, transporte e ferramentas manuais) e encargos adicionais (EPI, exames ocupacionais).

No intuito de prever a influência da pluviometria e de outras condições climáticas desfavoráveis sobre a eficiência dos equipamentos e a produção das equipes mecânicas e de mão de obra na fase de construção, utilizou-se também nas composições unitárias o Fator de Influência de Chuvas (FIC) igual a 0,00453 proposto pelo SICRO para a região de São Paulo. O FIC foi aplicado diretamente sobre o custo unitário de execução (mão de obra e equipamentos) na composição unitária dos APÊNDICE C e APÊNDICE D.

Os custos de materiais são derivados de pesquisa de preço na região do Rio de Janeiro e São Paulo, considerando o pagamento à vista e a carga tributária incidente.

Os preços da zeólita e do óleo de algodão inseridos nas composições foram obtidos por meio de uma pesquisa de preço realizada em sites de fornecedores praticados desde 2019 até 2023.

O preço do CAP 50/70 foi obtido no Relatório da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) de preços médios ponderados semanais praticados pelos produtores e importadores de derivados de petróleo e biodiesel no Brasil, no período de 20 de março de 2023 a 26 de março de 2023.

Nas composições referentes a produção das misturas asfálticas foi realizado um ajuste no tipo de usina asfáltica inserida na lista de equipamento devido ao pressuposto adotado na ACV desse estudo, de que 64,3% da produção seria por meio de usina contínua e 35,7% por meio de usina gravimétrica. Para a usina contínua foi considerada uma composição do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (Código 93433 - Usina de mistura asfáltica à quente, tipo contrafluxo, produção 40 a 80 ton/hora - CHP diurno. af_03/2016 e Código 93434 - Usina de mistura asfáltica à quente, tipo contrafluxo, prod 40 a 80 ton/hora - CHI diurno. AF_03/2016)

Os custos de recuperação foram calculados para um horizonte de 10 anos de vida útil da camada de rolamento, obtidos na literatura por meio de composições de custos de recuperação disponibilizadas pelo DNIT, em que o custo médio anual de recuperação de 1 km de rodovia é R\$ 300.000,00 (DNIT, 2021). A atividade de pavimentação corresponde a aproximadamente 30% desses custos, conforme composições de custos realizadas pelo DNIT, o que representa um custo anual de R\$ 90.000,00/km (DNIT, 2021).

A recuperação da camada de revestimento do pavimento ao longo dos 10 anos de vida útil considerou apenas as operações de tapa buraco e correções de defeitos.

- Construção do fluxo de caixa

Após a determinação dos custos e investimentos das alternativas analisadas, passou-se para a construção dos fluxos de caixa. As seguintes premissas foram adotadas:

- ✓ O horizonte de planejamento é de 10 anos, equivalente a vida útil considerada para a camada de revestimento;
- ✓ O valor residual, que para os pavimentos pode ser definido como o valor da vida útil restante no final do período de análise, foi considerado igual a zero com base no pressuposto de que todo o revestimento será demolido no final da vida útil;
- ✓ Juros, impostos e depreciação estão embutidos nos custos de materiais e mão-de-obra incluídos nas composições unitárias de cada fase do ciclo de vida considerada nesta avaliação econômica;
- ✓ A Taxa de Mínima Atratividade (TMA) ou taxa de desconto empregada foi obtida no site da Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura da Secretaria Especial de Produtividade Emprego e Competitividade do Ministério da Economia (SDI/SEPEC/ME), que recomenda o valor para Taxa Social de Desconto (TSD) para projetos de investimento em infraestrutura avaliados a partir de 2022 de 8,5% ao ano. A atualização desse valor ocorrer a cada dois anos.
- ✓ Para os serviços de recuperação da camada de revestimento do pavimento ao longo do horizonte de planejamento e também para os serviços de fresagem realizados no final da vida útil dos pavimentos foram aplicados os índices de reajuste de custos, de acordo com a instrução normativa N° 1/DNIT, de 24 de janeiro de 2023. Para os primeiros, o índice de reajustamento aplicado foi de 13,481% e para o segundo foi de 18,401%.

- ✓ Os benefícios derivados de cada alternativa (receitas) são externalidades ambientais e sociais, e nessa pesquisa foram consideradas como o potencial de circularidade por meio do Índice de Circularidade do Material (ICM) e do resultado da ACV.

- Análise das alternativas

As alternativas consideradas nessa ACCV foram comparadas usando uma medida comum de valor econômico, o Valor Presente Líquido (VPL), permitindo assim realizar uma análise da viabilidade financeira de cada uma.

Por meio deste método calculou-se o valor presente de cada fluxo de caixa, descontando, nesse cálculo, a taxa de juros (*i*) de 8,5%.

Portanto, para qualquer alternativa de mistura asfáltica avaliada o valor presente líquido dos fluxos de caixa para um horizonte de planejamento (*t*) de 10 anos, com taxa de desconto (*i*) de 8,5% foi dado pela Equação 26.

$$VPL = CI + \sum_{k=1}^Q CF_k \left[\frac{1}{(1+i)^{t_k}} \right] \quad Eq. 26$$

Onde:

VPL = valor presente líquido da alternativa

CI = Custo inicial de construção

CF_k = Custo futuro da atividade *k*

i = taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade (TMA), igual a 8,5%

t_k = ano no futuro do fluxo de caixa de atividade *k*

Q = número total de atividades

No final, foi identificada a alternativa de projeto que resultará num menor custo de longo prazo. Portanto, a viabilidade econômica foi dada à alternativa que apresentou o menor valor negativo de VPL.

3.2.7 Etapa 7: Avaliação integrada do desempenho mecânico, ambiental e econômico

Nesta etapa foi realizada uma avaliação integrada das dimensões mecânica, ambiental e econômica de todas as alternativas estudadas. Cada dimensão contemplou um conjunto de critérios.

Na dimensão mecânica, foram incluídos como critérios de análise as propriedades mecânicas avaliadas nesse estudo, que tinham seus resultados expressos por um único valor. Como o ensaio de vida de fadiga é expresso em curvas de $N \times \sigma$ e $N \times \varepsilon$, a resistência à fadiga foi incluída de forma indireta nesta avaliação por meio das suas respectivas unidades funcional utilizadas no cálculo do fator de utilidade do ICM_{MAR} e do $(ICM_{MAR})'$, conforme mostrado na Equação 27:

$$\frac{F}{F'_{av}} \quad \text{Eq. 27}$$

F = número de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga da mistura asfáltica reciclada;

F'_{av} = número de ciclos de carregamento antes da falha por fadiga da mistura asfáltica de referência;

Por englobar parâmetros mecânicos das misturas, o valor do fator de utilidade também foi inserido no conjunto de critérios da dimensão mecânica.

Na dimensão ambiental, foram incluídos como critérios os valores calculados de ICM_{MAR} e $(ICM_{MAR})'$, além dos valores normalizados de cada categoria de impacto *endpoint* obtidos por cada alternativa de mistura.

A dimensão econômica foi analisada segundo os valores de VPL de cada alternativa de mistura asfáltica.

As alternativas de misturas asfálticas foram, então, organizadas em um *ranking* por desempenho em cada critério. A numeração 1 foi dada a alternativa de melhor desempenho no critério n e a numeração 7 foi dada a alternativa de pior desempenho no critério n .

Os *rankings* dos critérios de todas as dimensões foram plotados em um gráfico, tornando possível a tomada de decisão pela alternativa de mistura que melhor se adequasse ao conceito de sustentabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nessa pesquisa.

4.1 AVALIAÇÃO DO CENÁRIO 100% RAP + ADITIVOS

Com o intuito de comparar os valores de resistência à tração, módulo de resiliência e volume de vazios das amostras com aditivos com as amostras sem aditivos foram plotados gráficos com os resultados dos ensaios e foi feita uma análise estatística por meio do teste t de *Student*.

Realizou-se ainda uma Análise de Variância (ANOVA) para investigar estatisticamente a interferências das variáveis “teor de óleo” e “temperatura” e das variáveis “teor de zeólita”, “temperatura” e “tempo de condicionamento” na resistência à tração, módulo de resiliência e volume de vazios dos cenários RAP + Óleo de Algodão e RAP + Zeólita. As Figura 55 e Figura 56 mostram o comparativo dos valores de volume de vazios das amostras 100%RAP, com e sem agentes de reciclagem.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que as amostras 2%Alg-140, 4%Alg-140, 0,3Z-1h-140, 0,3Z-2h-140 e 0,6Z-1h-140 não apresentaram diferença significativa quanto às amostras sem agente de reciclagem, pois os p-valores foram de 0,0913, 0,1126, 0,6437, 0,1715 e 00,0731 respectivamente, superando a significância de 5%.

De modo geral, o óleo de algodão proporcionou uma redução no volume de vazios da amostra de RAP, sendo mais expressiva na temperatura de 140°C e 160°C. Na temperatura de 140°C a diminuição do volume de vazios pode também ter sido auxiliada pela maior quantidade de ligante RAP ativo, conforme apresentado nos resultados de DoA’(3.2.1.7.2).

O teste t de *Student*, utilizado para comparar os volumes de vazios obtidos nas temperaturas de 140°C e 160°C para cada teor de óleo, indicou que os resultados não apresentaram diferença significativa entre si.

As amostras com óleo de algodão foram comparadas com as amostras sem óleo, à 160°C e observou-se um comportamento inverso. As amostras sem óleo apresentaram um aumento de volume de vazios nessa temperatura de condicionamento. Com a adição do óleo de algodão aconteceu uma redução do volume de vazios na ordem de 3 a 6% e uma redução do desvio padrão para todos os teores analisados, comprovando a eficiência desse agente de reciclagem na melhoria desse parâmetro volumétrico. Portanto o óleo de algodão pode

diminuir a dificuldade em obter a volumetria da mistura desejada em laboratório e em campo (AL-QUADI et al., 2015) e melhorar a homogeneidade dos valores de propriedades mecânicas que possuem relação direta com esse parâmetro volumétrico.

Na temperatura de 140°C não houve alteração significativa no volume de vazios para ambos os teores de zeólita, exceto para a condição 0,6Z-2h-140, onde o teste t de *Student* indicou que o aumento observado no valor desse parâmetro volumétrico foi significativo.

Figura 55 - Cenário 100% RAP + Óleo de Algodão – Volume de Vazios

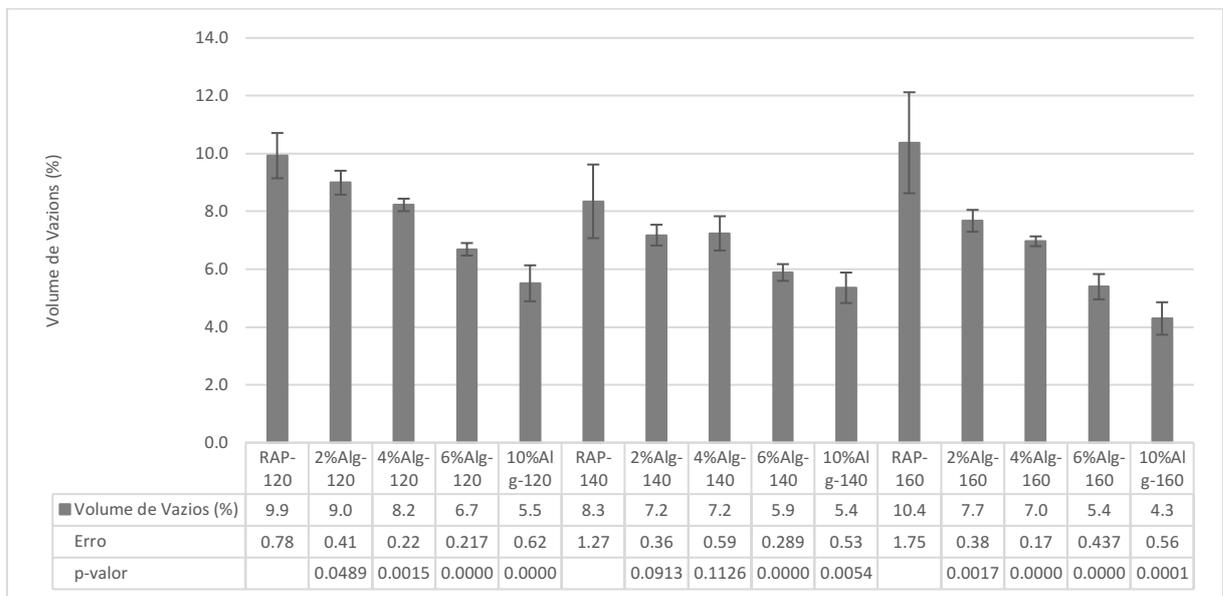
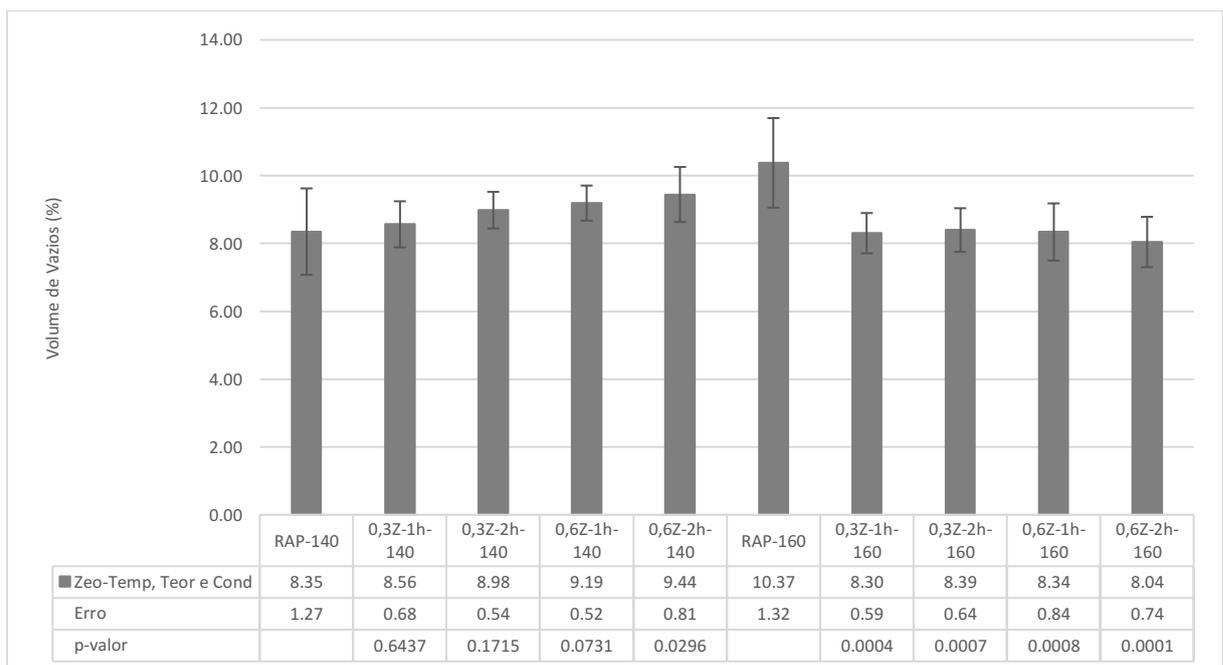


Figura 56 - Cenário 100% RAP + zeólita – Volume de Vazios



As Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24 mostram os resultados da análise de variância para o volume de vazios. Por meio dos p-valores da Tabela 22, observa-se que a variação do teor de óleo de algodão acarreta diferenças significativas do volume de vazios da amostra, sendo este menor quanto maior for o teor de óleo. Quanto a temperatura no cenário RAP+ óleo de algodão, como o p-valor ficou (0,0588) ficou próximo da significância de 5%, existe uma probabilidade dessa variável também ter influenciado no valor de volume de vazios.

O teste t de Student indicou que a temperatura de 160°C é mais eficiente na redução do volume de vazios das amostras com zeólita, mas não há diferença significativa entre as amostras com 0,3% e 0,6%, conforme aponta os resultados da ANOVA (Tabela 23). Entre as amostras com zeólita também não houve interferência significativa das variáveis tempo de condicionamento e temperatura no volume de vazios (Tabela 24).

Tabela 22 - ANOVA para Vv – Fatores Teor de Óleo de algodão e Temperatura

Variável	Parâmetros avaliados		
	Volume de Vazios		
	F	p-valor	F crítico
Teor de óleo	22,4621	0,0002	3,8379
Temperatura	4,1221	0,0588	4,4590

Tabela 23 - ANOVA para Vv – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura

Variável	Parâmetros avaliados					
	Volume de Vazios					
	1h			2h		
	F	p-valor	F crítico	F	p-valor	F crítico
Teor de zeólita	1,26	0,4635	161,45	0,02	0,9141	161,45
Temperatura	3,57	0,3099	161,45	5,96	0,2476	161,45

Tabela 24 - ANOVA para Vv – Fatores Tempo de Condicionamento e Temperatura

Variável	Parâmetros avaliados					
	Volume de Vazios					
	0,30%			0,60%		
	F	p-valor	F crítico	F	p-valor	F crítico
Tempo de condicionamento	2,46	0,36	161,45	0,01	0,95	161,45
Temperatura	6,80	0,23	161,45	16,64	0,15	161,45

A Figura 57 e Figura 58 mostram o comparativo gráfico dos resultados do ensaio de Resistência à Tração das amostras 100%RAP, com e sem agentes de reciclagem. Na tabela de

dados das Figura 57 e Figura 58 estão apresentados os valores médios de RT e do erro amostral para cada situação analisada, bem como os seus respectivos p-valores resultantes do teste t de *Student*.

A princípio, observa-se que todos os valores de RT de ambos os cenários ficaram acima de 0,65MPa, limite mínimo especificado pelo DNIT.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que todas as amostras com óleo de algodão e com zeólita apresentaram diferença significativa quanto às amostras sem agente de reciclagem, pois os p-valores foram menores que a significância de 5%. Portanto, pode-se afirmar que tanto o óleo de algodão, como a zeólita influenciaram no parâmetro de resistência à tração do RAP.

Estes resultados estão coerentes com o estudo de Costa (2022) e Eltwatia et al. (2022) que também identificaram que a adição de óleo de motor usado diminuiu os valores de resistência à tração de amostras com 100% de RAP. Isso indica que os aditivos diminuem a viscosidade do ligante asfáltico envelhecido no RAP.

Figura 57 - Cenário 100% RAP + Óleo de Algodão - Resistência à tração

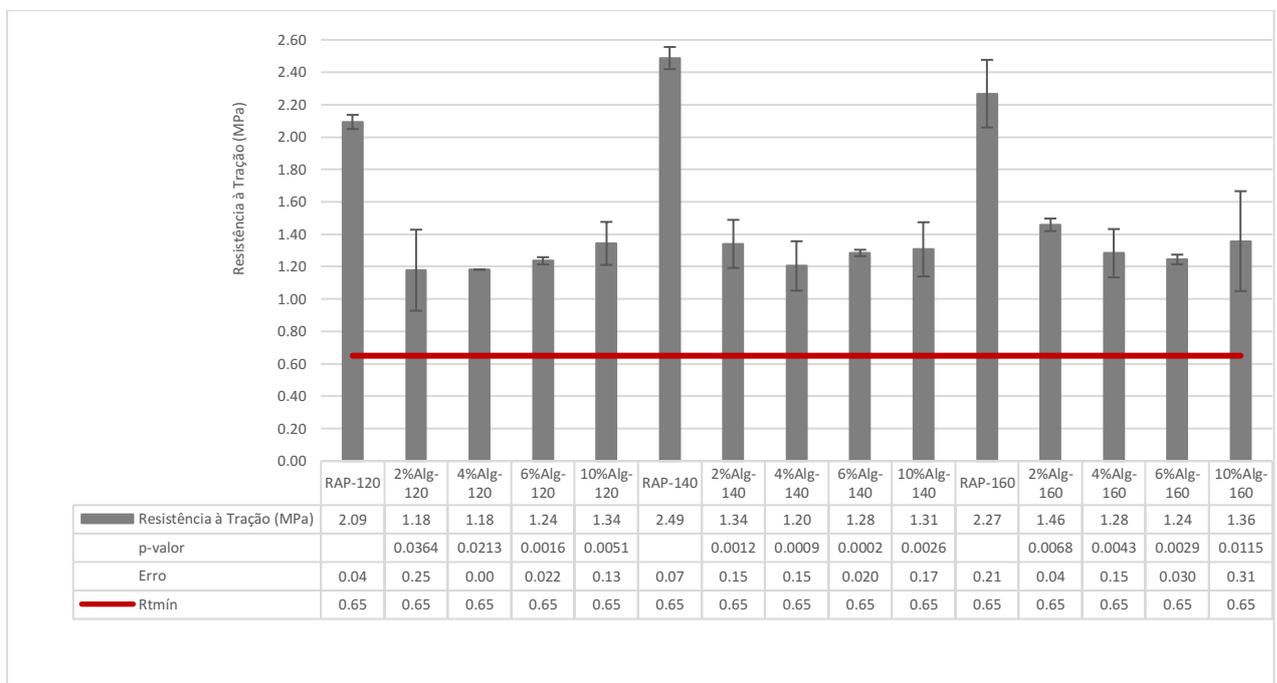
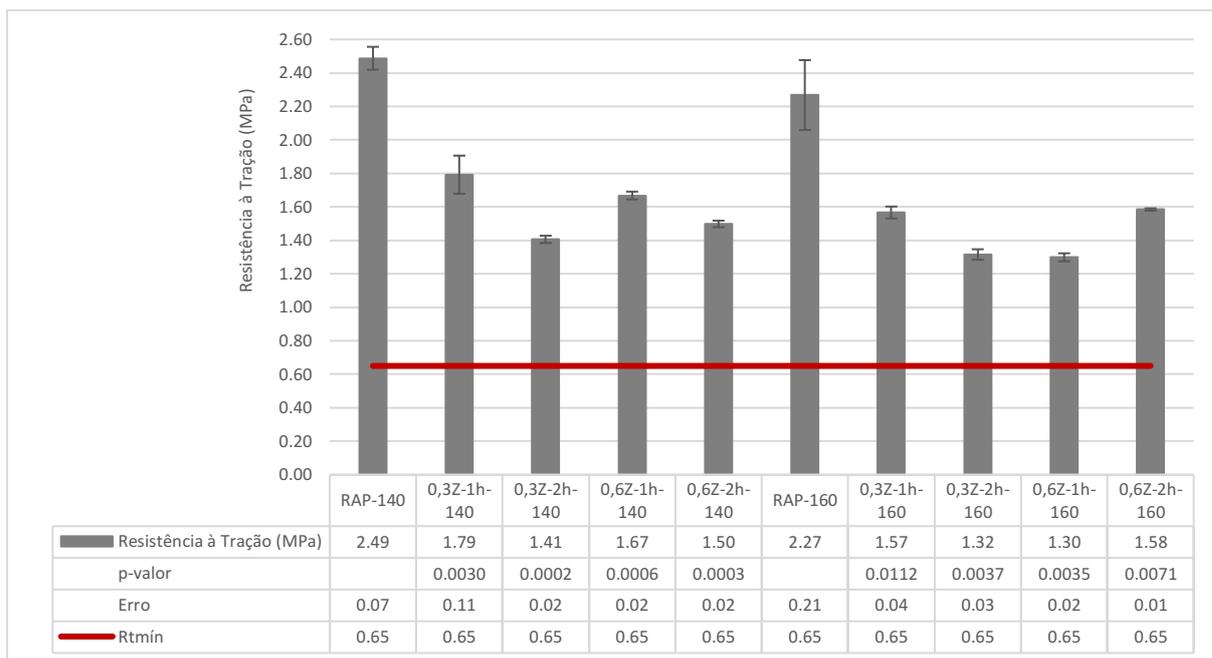


Figura 58 - Cenário 100% RAP + Zeólita – Resistência à Tração



As Tabelas 25, 26 e 27 mostram os resultados da análise de variância para a resistência à tração. Os valores da Tabela 25 indicam que a variável “teor de óleo” implicou em variações estatisticamente significativas da RT, pois o seu p-valor foi menor que a significância de 5%. Já a variação de temperatura não acarretou diferenças nos resultados de RT.

Os valores da Tabela 26 mostram que as variáveis “teor de zeólita” e “temperatura” não influenciam significativamente os resultados de RT, pois os seus p-valores foram maiores que a significância de 5%.

A Tabela 27 indica que as variáveis tempo de condicionamento e temperatura, avaliadas em cada situação de teor de zeólita, também não ocasionaram diferenças significativas nos valores de resistência à tração.

Tabela 25 - ANOVA para RT - Fatores Teor de Óleo de Algodão e Temperatura

Variável	Parâmetros avaliados		
	Resistência à tração		
	F	p-valor	F crítico
Teor de óleo	60,1989	5,21E-06	3,8379
Temperatura	2,2724	0,1654	4,4590

Tabela 26 - ANOVA para RT – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura

	Parâmetros avaliados					
	Resistência à tração					
	1h			2h		
	F	p-valor	F crítico	F	p-valor	F crítico
Teor de zeólita	7,51	0,2227	161,45	4,19	0,2893	161
Temperatura	17,29	0,1502	161,45	0,00	0,9837	161

Tabela 27 - ANOVA para RT – Fatores Tempo de Condicionamento e Temperatura

Variável	Parâmetros avaliados					
	Resistência à Tração					
	0,30%			0,60%		
	F	p-valor	F crítico	F	p-valor	F crítico
Tempo de condicionamento	22,16	0,13	161,45	0,06	0,84	161,45
Temperatura	5,46	0,26	161,45	0,39	0,65	161,45

As Figura 59 e Figura 60 mostram o comparativo dos resultados do ensaio de Módulo de Resiliência das amostras 100%RAP, com e sem agentes de reciclagem.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que as amostras 2%Alg-160, 4%Alg-160, 0,6Z-2h-140, 0,3Z-1h-160 e 0,6Z-1h-160 não apresentaram diferença significativa quanto às amostras sem agente de reciclagem, pois os p-valores foram de 0,7516 e 0,1952, 0,5973, 0,1174 e 0,2072 respectivamente, superando a significância de 5%. Mas de modo geral, pode-se afirmar que o óleo de algodão diminuiu a rigidez do RAP nas temperaturas de 120°C, 140°C e 160°C e a zeólita diminuiu a rigidez do RAP na temperatura de 140°C, para ambos os tempos de condicionamento.

O óleo de algodão proporcionou uma maior redução de rigidez na temperatura de 120°C. A rigidez aumentou nas temperaturas de 140°C e 160°C, mesmo assim ainda foi inferior à do RAP em ambas as temperaturas. Costa (2022) também verificou que a adição de óleo de motor usado diminuiu a rigidez de amostras com 100% de RAP.

Esses resultados corroboram com a observação de Mogawer et al. (2012) que alertam que os efeitos positivos da utilização de ligantes asfálticos mais moles nas misturas asfálticas recicladas podem ser minorados pelas condições de temperaturas de produção e pelos fatores de armazenamento, que influenciam fortemente na rigidez e nas propriedades de resistência ao trincamento.

Em todas as temperaturas houve uma redução do módulo de resiliência com o aumento do teor de óleo no RAP, no entanto, nas temperaturas de 160°C não foi observada diferença significativa entre o valor do MR do RAP e os valores das amostras 2%Alg-160 e 4%Alg-160, conforme resultado do teste t de *Student*. Isso também confirma a observação de Mogawer et al. (2012), apontada anteriormente.

Os p-valores das amostras com zeólita indicam que 0,3% desse aditivo pode promover uma redução de MR na temperatura de 140°C, em ambos os tempos de condicionamento, no entanto na temperatura de 160°C, a probabilidade é que aconteça um aumento da rigidez do RAP.

O teor de 0,6% de zeólita no tempo de condicionamento de 2h não alterou a rigidez do RAP. Na temperatura de 160°C e tempo de condicionamento de 2h aconteceu um aumento da rigidez do RAP, conforme indicado na avaliação do teste t de *Student*. Esse aumento do módulo de resiliência pode ser devido aos efeitos do ligante mais rígido e envelhecido do RAP, que é mais pronunciado à medida que a temperatura aumenta (BEHNOOD, 2020).

Figura 59 - Cenário 100% RAP + Óleo de Algodão – Módulo de Resiliência

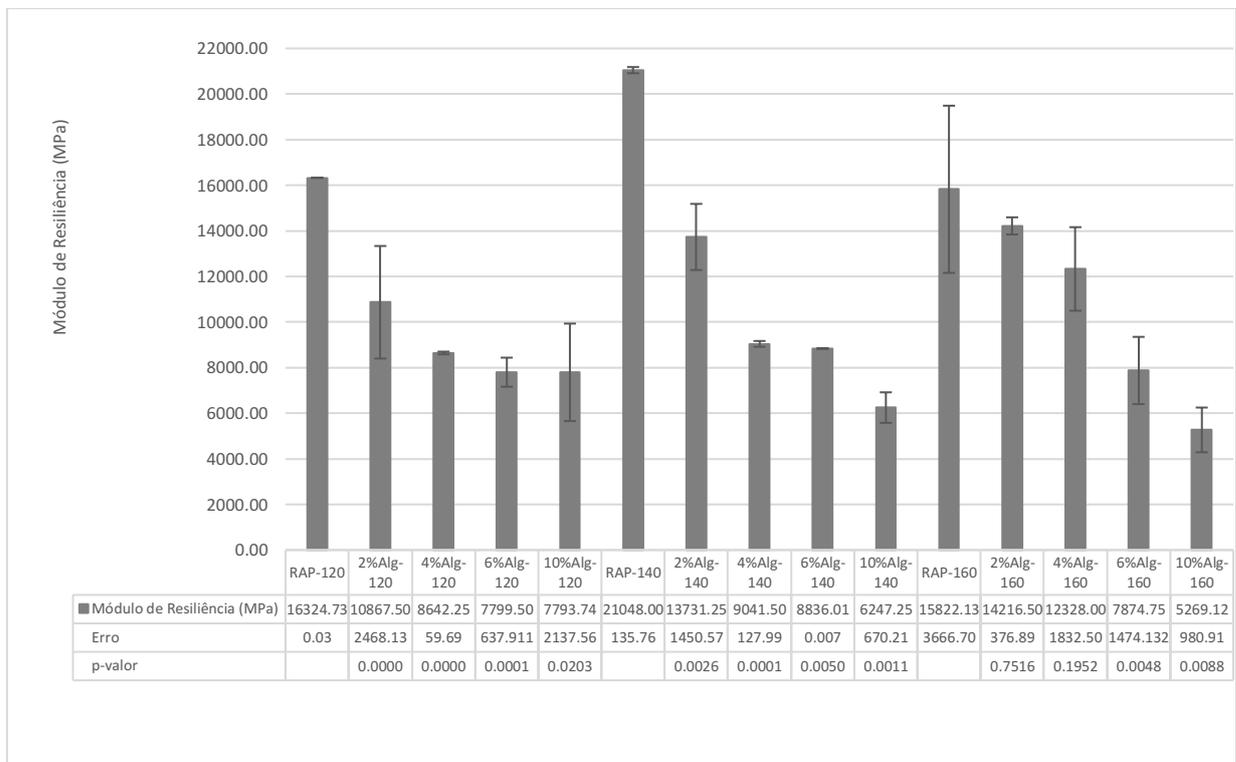
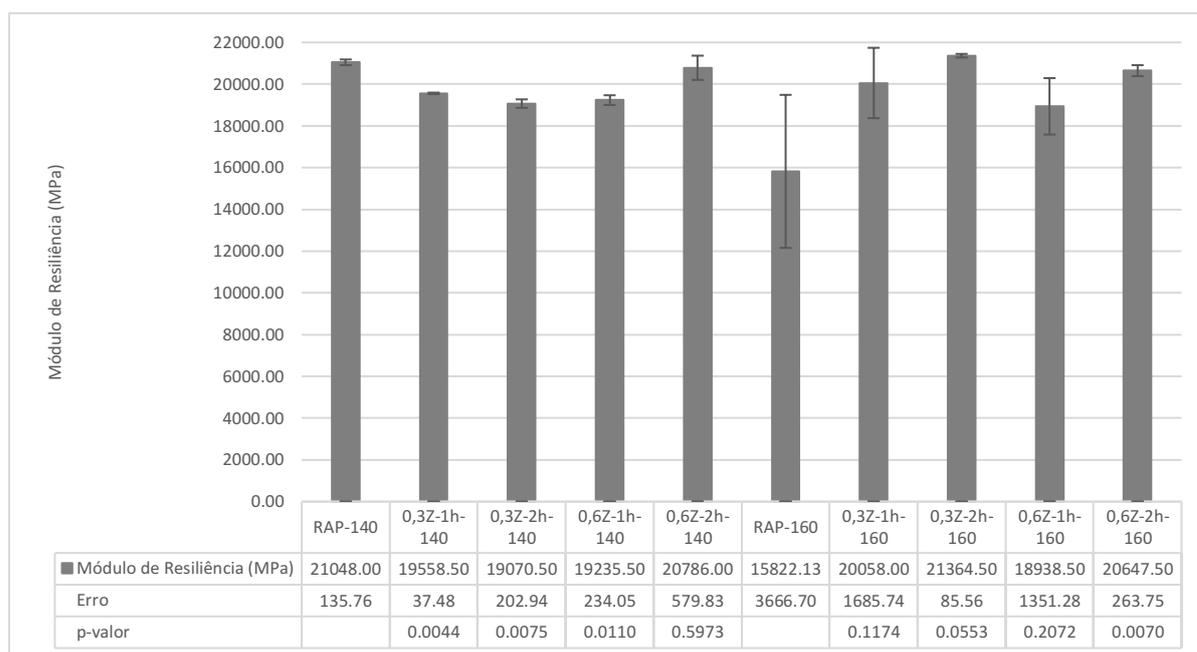


Figura 60 - Cenário 100% RAP + Zeólita – Módulo de Resiliência



As Tabelas 28, 29 e 30 mostram os resultados da análise de variância para o módulo de resiliência. Os valores da Tabela 28 indicam que a variável “teor de óleo” implicou em variações estatisticamente significativas do MR, pois o seu p-valor foi menor que a significância de 5%. Já a variação de temperatura não acarretou diferenças expressivas nos resultados de MR.

Os valores da Tabela 29 mostra que as variáveis “teor de zeólita” e “temperatura” não influenciam significativamente os resultados de MR, pois os seus p-valores foram maiores que a significância de 5%.

A Tabela 30 indica que as variáveis tempo de condicionamento e temperatura, avaliadas em cada situação de teor de zeólita, também não ocasionaram diferenças significativas nos valores de módulos de resiliência.

Tabela 28 - ANOVA para MR - Fatores Teor de Óleo de Algodão e Temperatura

Variável	Parâmetros avaliados		
	Módulo de Resiliência		
	F	p-valor	F crítico
Teor de óleo	15,9571	0,0007	3,8379
Temperatura	0,7560	0,5004	4,4590

Tabela 29 - ANOVA para MR – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura

Variável	Parâmetros avaliados					
	Módulo de Resiliência					
	1h			2h		
	F	p-valor	F crítico	F	p-valor	F crítico
Teor de zeólita	3,28	0,3212	161,45	0,17	0,752	161
Temperatura	0,06	0,8415	161,45	0,79	0,5384	161

Tabela 30 - ANOVA para MR – Fatores Tempo de Condicionamento e Temperatura

Variável	Parâmetros avaliados					
	Módulo de Resiliência					
	0,30%			0,60%		
	F	p-valor	F crítico	F	p-valor	F crítico
Tempo de condicionamento	0,21	0,73	161,45	422,91	0,03	161,45
Temperatura	2,42	0,36	161,45	7,55	0,22	161,45

4.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Neste item são apresentados e analisados os resultados das propriedades mecânicas (Resistência à Tração, Dano por Umidade Induzida, Módulo de Resiliência, Fadiga, *Flow Number* e Cântabro) das misturas asfálticas recicladas com uso de bioligantes e de zeólita.

Com o intuito de comparar os valores das propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas com agentes de reciclagem com a amostra de referência foram plotados gráficos com os resultados dos ensaios e foi feita uma análise estatística por meio do teste t de *Student* para comparar as três situações: mistura de referência, mistura asfáltica reciclada com uso de bioligante e mistura asfáltica reciclada com uso de zeólita.

Realizou-se ainda um teste t de *Student* para investigar estatisticamente a interferências das variáveis “teor de óleo” e “teor de zeólita” nos resultados mecânicos analisados.

4.1.1 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

A Figura 61 mostra o comparativo gráfico dos resultados do ensaio de Resistência à Tração da mistura asfáltica de referência com as misturas asfálticas com e sem agentes de reciclagem. Na tabela de dados da Figura 61 estão apresentados os valores médios de RT, bem como os seus respectivos p-valores resultantes do primeiro teste t de *Student*.

A princípio, observa-se que todos os valores de RT de ambos os cenários ficaram acima de 0,65MPa, limite mínimo especificado pelo DNIT.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que as amostras MAR-BL4% e MAR-BL6% e MAR-Z15, MAR-Z25 e MAR-Z33 apresentaram diferença significativa quanto à amostra de referência, pois os p-valores foram menores que a significância de 5%, onde na MAR-BL4% e MAR-BL6% houve uma redução da resistência à tração e na MAR-Z15 houve um aumento de RT.

A diminuição da RT das misturas asfálticas recicladas com o uso de 4% e 6% de óleo de algodão (redução de 27,08% e 31,25%, respectivamente, com relação à REF) corroboram com os estudos de Taherkhani e Noorian (2020) e Costa (2022) e que identificaram que a resistência à tração diminui com o aumento do teor de óleo residual de cozinha e de óleo residual de motor, respectivamente.

No teor de 10% de óleo o resultado de RT se assemelha ao da REF provavelmente influenciado pelo maior teor de RAP na mistura. Nos três estudos de Pradhan e Sahoo (2020) usando 4% de óleo de mahua, 5% de óleo de polanga e 5% de óleo de pongamia os autores também identificaram um incremento no valor da RT em cenários com taxas de reciclagem acima de 30%.

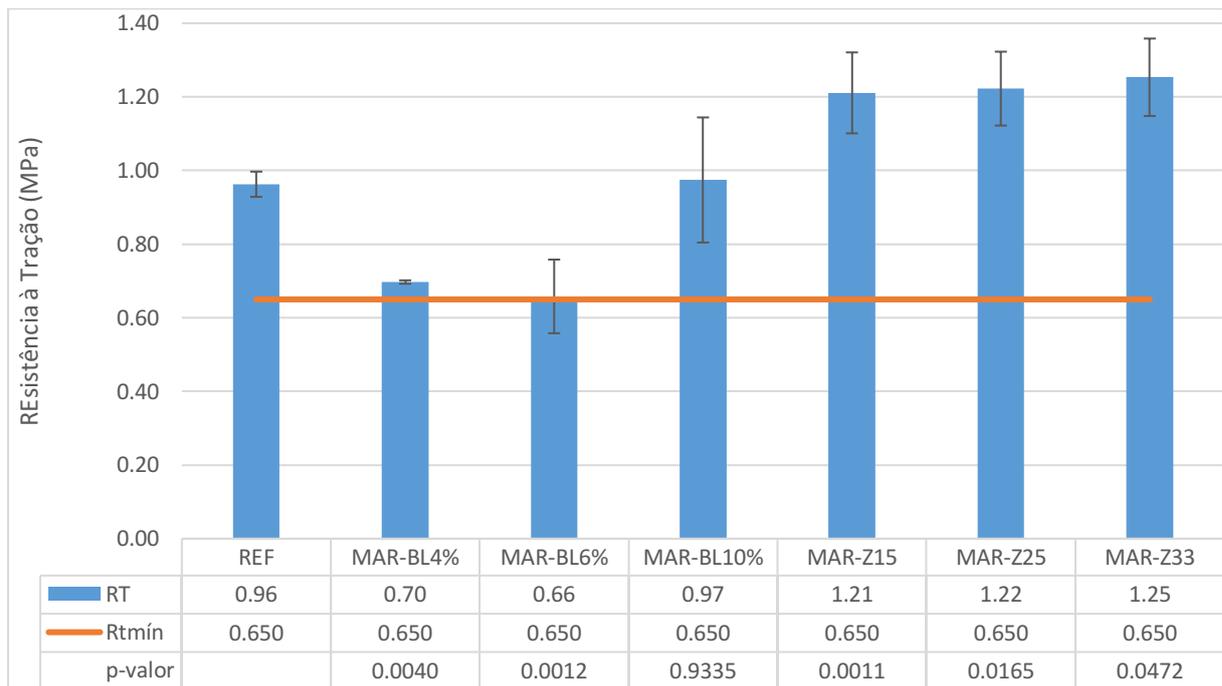
Taherkhani e Noorian (2020) verificou uma redução de 11,88% 42,71% e 57,67% na RT de misturas asfálticas recicladas com 25% de RAP utilizando, respectivamente, 5%, 10% e 15% de óleo residual de cozinha e Costa (2022) constatou uma redução de 20,16%, 16,13% e 29,84% na RT de misturas asfálticas recicladas com 50% de RAP utilizando, respectivamente, 12%, 15% e 18% de óleo residual de motor.

Taherkhani e Noorian (2020) também identificaram um aumento na RT, acima do resultado da mistura de referência (com 0% de RAP e 0% de óleo), nas misturas asfálticas com taxa de reciclagem superior a 25% e com o uso de 5% e 10% de óleo residual de cozinha. Essa mesma tendência foi observada na avaliação da MAR-BL10%, amostra com o maior

teor de RAP (33%), que apresentou valor de RT semelhante ao da REF e superior ao das outras misturas recicladas com menor teor de RAP.

Nesse estudo, as misturas com o uso de 0,3% de zeólita apresentaram um incremento de cerca de 28% no valor da RT em comparação com a mistura de referência. Esses resultados reforçam as análises realizadas por Hill et al. (2013) que verificaram um aumento de 16,43% na RT da mistura asfáltica com 15% de RAP e 0,25% de zeólita.

Figura 61 - Resultados de Resistência à Tração



A Tabela 31 mostra os resultados do teste t de *Student* para a resistência à tração das amostras com bioligante e com zeólita. Por meio da avaliação do p-valor, percebe-se que não houve uma diferença significativa entre as misturas asfálticas recicladas do conjunto com óleo de algodão nem entre as misturas asfálticas recicladas do conjunto com zeólita.

Tabela 31 - Comparativo da RT entre as MAR

Misturas asfálticas comparadas	p-valor
MAR-BL4% - MAR-BL6%	0,1960
MAR-BL4% - MAR-BL10%	0,8971
MAR-BL6% - MAR-BL10%	0,9807
MAR-Z15 - MAR-Z25	0,5663
MAR-Z15 - MAR-Z33	0,5663
MAR-Z25 - MAR-Z33	0,7131

4.1.2 Dano por umidade induzida

A Figura 62 mostra o comparativo gráfico dos resultados do ensaio do Dano por umidade induzida da mistura asfáltica de referência com as misturas asfálticas com e sem agentes de reciclagem. Na tabela de dados Figura 62 estão apresentados os valores médios de RRT, bem como os seus respectivos p-valores resultantes do primeiro teste t de *Student*.

De acordo com a norma AASHTO T 283 (2014) e a norma DNIT 031 (2006) o valor de RRT mínimo para que a suscetibilidade à umidade da mistura asfáltica seja considerável aceitável é de 70%. Todas as amostras analisadas satisfizeram os critérios estabelecidos, ficando a MAR-BL6% no limite permitido pelas normas.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que as amostras MAR-BL4%, MAR-BL6%, MAR-Z15 apresentaram diferença significativa quanto à amostra de referência, pois os p-valores foram menores que a significância de 5%, onde na MAR-BL4% e MAR-BL6% houve uma redução da resistência à tração retida, mas não tão expressiva, e na MAR-Z15 houve um aumento de RRT.

Pradhan e Sahoo (2020) também observaram redução da RRT de misturas asfálticas recicladas com 60% e 70% de RAP utilizando ligante asfáltico modificado com 4% de óleo de Mahua.

Mirhosseini et al. (2019) verificaram uma redução de 12,53% na RRT de misturas asfálticas com 40% de RAP + 5% de óleo de semente de tâmara em comparação com uma mistura asfáltica de referência (com 0% de RAP e 0% de óleo). Tais resultados corroboram com a perda de resistência ao dano por umidade exibida pelas misturas asfálticas recicladas com 4% e 6% de óleo de algodão, que foi de 9,70% e 11,09%, respectivamente.

Ziari et al. (2019), tendo também observado uma queda na RRT de 14,57% e 12,97% de duas amostras de misturas asfálticas confeccionadas com 50% de RAP, sendo a primeira com o uso de 6% de óleo de cozinha e a segunda com o uso de 6% de Rapiol, que é um aditivo modificador de ligante à base de plantas. Os autores comentam que ao adicionar o rejuvenescedor o ligante envelhecido aglutinado no agregado RAP é restaurado, o que leva a sua menor adesão ao agregado RAP e, conseqüentemente, maior susceptibilidade à umidade.

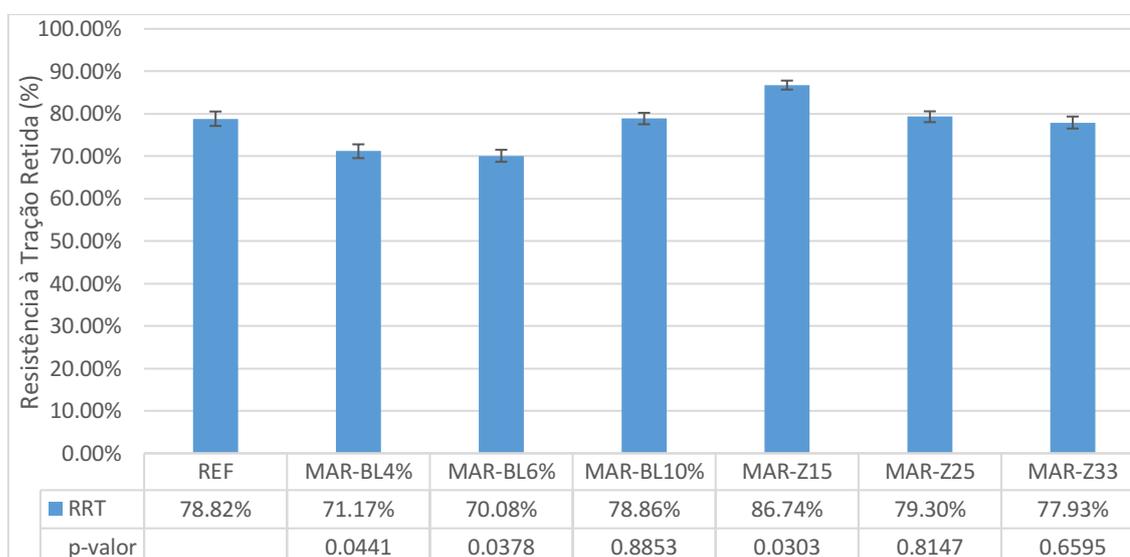
Num teor mais elevado de óleo de semente de tâmara (10%), Mirhosseini et al. (2019) verificaram que os resultados de RRT para as misturas com 20% e 30% de RAP ficaram próximos ao RRT da mistura de referência. Nesse estudo também não foi identificado

diferença significativa entre a resistência ao dano por umidade da mistura asfáltica reciclada com 10% de óleo de algodão em comparação com a REF.

Sobre o uso da zeólita, houve uma tendência de redução da RRT com o aumento da taxa de reciclagem, mantendo-se fixo o teor de zeólita, observada no gráfico da Figura 62 e no comparativo da RRT entre as MARs mostrado na Tabela 32. Yousefi et al. (2020) identificou uma perda de RRT (cerca de 22,74%) numa mistura asfáltica reciclada contendo zeólita e 50% de RAP e associou essa redução à falta de evaporação completa da água nesta tecnologia durante a etapa de mistura.

Hurley e Prowell (2005) salientam que durante o processo de produção das misturas asfálticas as moléculas de asfalto, por serem muito grandes, podem obstruir os poros das zeólitas. Portanto, segundo esses autores, existe o risco de que microfaturas no asfalto em temperaturas abaixo do ponto de congelamento possam revelar os poros da zeólita, antes obstruídos, permitindo a absorção de água e, conseqüentemente, tornando a mistura asfáltica mais susceptível à umidade.

Figura 62 - Resultados de Resistência à Tração Retida



A Tabela 32 mostra os resultados do teste t de *Student* para a resistência à tração retida das amostras com bioligante e com zeólita. Por meio da avaliação do p-valor, percebe-se que houve uma diferença significativa de RRT entre as misturas asfálticas recicladas com bioligante MAR-BL4% - MAR-BL10%, MAR-BL6% - MAR-BL10% e com zeólita MAR-Z15 - MAR-Z25 e MAR-Z15 - MAR-Z33.

A amostra com 10% de óleo de algodão e 33% de RAP apresentou um aumento de RRT de 9,75% e 11,13% em comparação com as amostras MAR-BL4% e MAR-BL6%,

respectivamente. Mirhosseini et al. (2019) também verificaram um incremento de 6,41% na RRT da mistura com 40% RAP +10% óleo de semente de tâmara em comparação com a mistura de 30% RAP +5% óleo de semente de tâmara.

Tabela 32 - Comparativo da RRT entre MAR

Misturas asfálticas comparadas	p-valor
MAR-BL4% - MAR-BL6%	0,1681
MAR-BL4% - MAR-BL10%	0,0338
MAR-BL6% - MAR-BL10%	0,0199
MAR-Z15 - MAR-Z25	0,0232
MAR-Z15 - MAR-Z33	0,0198
MAR-Z25 - MAR-Z33	0,4665

4.1.3 Módulo de resiliência (MR)

A Figura 63 mostra o comparativo gráfico dos resultados do ensaio de Módulo de Resiliência da mistura asfáltica de referência com as misturas asfálticas com e sem agentes de reciclagem. Na tabela de dados Figura 63 estão apresentados os valores médios de MR, bem como os seus respectivos p-valores resultantes do primeiro teste t de *Student*.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que somente a amostra MAR-BL10% não apresentou diferença significativa quanto à amostra de referência, pois seu p-valor foi de 0,1788. Aconteceu uma redução de rigidez das misturas asfálticas recicladas MAR-BL4%, MAR-BL6% e um aumento de rigidez para todas as misturas asfálticas contendo zeólita.

As misturas asfálticas mais rígidas são consideradas mais resistentes à deformação (KIM et al, 2018; SALEH, 2016; VALDES-VIDAL, 2018). No entanto, aumentar a rigidez da mistura torna a mistura mais frágil e, conseqüentemente, aumenta a sua susceptibilidade à fadiga (KIM et al, 2018; SALEH, 2016). Portanto, a redução dos valores de MR até certo ponto pode ajudar a mistura a ter um melhor desempenho frente ao trincamento por fadiga.

Ao contrário dos resultados de módulo de resiliência das misturas asfálticas recicladas com o uso de óleo de algodão, onde no geral verificou-se uma redução de rigidez, os valores de MR encontrados por Pradhan e Sahoo (2020) indicam que a rigidez das misturas asfálticas aumenta com o aumento do teor de RAP. No entanto, esses autores utilizaram um teor fixo de óleo de Muha (4%) como agente de reciclagem, independente do teor de RAP usado.

No estudo de Pradhan e Sahoo (2020) verificou-se que, no teor de 30% de RAP, o MR da mistura reciclada com o uso de 4% de óleo de Muha (4819 MPa) se aproximou ao MR da mistura totalmente virgem (4790 MPa). Com o aumento do teor de RAP na mistura, observou-se incrementos nos valores de MR, chegando à 6788 MPa na mistura asfáltica com 70% de RAP.

Tal observação ressalta a importância dos métodos de formulação de misturas asfálticas recicladas à quente, usados nessa pesquisa, que consideram a seleção do ligante a ser utilizado dependente da taxa de reciclagem, das características do RAP e das propriedades desejadas pelo o ligante final, como forma de garantir o desempenho satisfatório da mistura reciclada final, inclusive a redução da rigidez.

Partindo dessa premissa, verificou-se um decréscimo de valor semelhante na rigidez das amostras MAR-BL4%, MAR-BL6% (13,27% e 13,40%, respectivamente), mesmo com a utilização de taxas de reciclagem diferentes (15% e 25%, respectivamente). Na mistura MAR-BL10%, alternativa com maior teor de RAP, verificou-se um comportamento parecido com a mistura REF, talvez induzido pela presença de uma maior parcela de ligante envelhecido que fez com que o valor do MR fosse superior ao das misturas contendo menores teores de RAP.

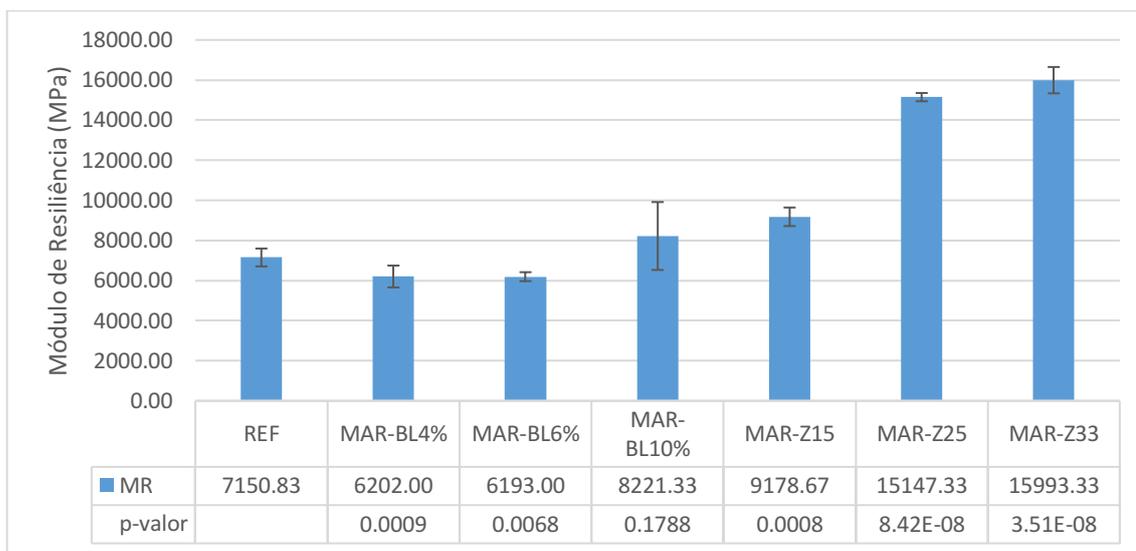
Os resultados de MR das MAR com óleo de algodão corroboram com as observações de Mirhosseini et al. (2019) que também constataram que a adição do óleo de semente de tâmara à mistura reciclada tinha o potencial de amenizar a sua rigidez, mas que em teores mais elevados de RAP (40%), mesmo usando o maior teor de óleo testado (10%), não foi suficiente para reduzir o módulo de rigidez a um valor inferior ao da mistura de controle. No entanto, observou-se comportamento semelhante quanto à rigidez da mistura asfáltica com 40% de RAP (aproximadamente 6400 MPa) comparado à essa mistura de controle (aproximadamente 6100MPa).

Tao e Malick (2009) e Hurley e Prowell (2005) constataram em seus estudos que a zeólita melhora a compactação, mas tem efeito pouco significativo no módulo de resiliência das misturas asfálticas. Por outro lado, Yousefi et al. (2020) verificaram um aumento de 84,21% no MR de misturas contendo 50% RAP +5% zeólita em comparação com uma mistura totalmente virgem. Wozuk e Franus (2016) constaram um aumento de cerca de 20% no módulo de resiliência de misturas sem RAP, mas contendo 0,4% de zeólita natural clinoptilolita.

Nesse estudo as misturas asfálticas recicladas utilizando zeólita em sua composição foram confeccionadas com o mesmo teor deste material (0,3%), variando o percentual de

RAP, onde verificou-se que o MR cresceu com o aumento do teor de RAP. Nesse cenário, confrontando com observações feitas pelos autores citados, pode-se inferir que a zeólita não apresentou potencial de redução de rigidez das misturas asfálticas recicladas. Conclui-se também que a tendência de crescimento dos valores obtidos pode estar associada a presença de maior quantidade de ligante envelhecido na composição das misturas, ao passo em que se aumentava o teor de RAP.

Figura 63 - Resultados de Módulo de Resiliência



A Tabela 33 mostra os resultados do teste t de *Student* para o módulo de resiliência das amostras com bioligante e com zeólita. Por meio da avaliação do p-valor percebe-se que, dentre as misturas recicladas com uso de óleo de algodão, houve uma diferença significativa de MR entre MAR-BL6% - MAR-BL10%. Todas as misturas asfálticas recicladas com uso de zeólita apresentaram diferenças significativas de MR entre si, comprovando a interferência do teor de RAP nas propriedades de rigidez das composições.

Tabela 33 - Comparativo do MR entre MAR

Misturas asfálticas comparadas	p-valor
MAR-BL4% - MAR-BL6%	0,9749
MAR-BL4% - MAR-BL10%	0,0194
MAR-BL6% - MAR-BL10%	0,0079
MAR-Z15 - MAR-Z25	3,39E-05
MAR-Z15 - MAR-Z33	1,53E-05
MAR-Z25 - MAR-Z33	0,0031

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

4.1.4 Desgaste Cântabro

A Figura 64 mostra o comparativo gráfico dos resultados do ensaio de desgaste cântabro da mistura asfáltica de referência com as misturas asfálticas recicladas com bioligante e com zeólita. Na tabela de dados da Figura 64 estão apresentados os valores médios de desgaste cantabro, bem como os seus respectivos p-valores resultantes do primeiro teste t de *Student*.

O desgaste máximo admitido deve ser de 25% para misturas asfálticas porosas (DNIT, 1999), e, embora não existam limites definidos em normas atualmente, sugere-se que para misturas asfálticas densas, o valor de desgaste não deve superar 10%. Dessa forma, apenas as composições com bioligante apresentaram comportamento adequado conforme esse limite sugerido.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que todas as amostras com bioligante apresentaram diferença significativa quanto à amostra de referência. O comportamento das amostras com zeólita foram semelhantes ao da amostra de referência.

A perda de massa das misturas asfálticas recicladas com o uso do bioligante corroboram com os estudos de Khan et al. (2021) e Al-saffar et al. (2020), que identificaram uma redução no desgaste das composições recicladas avaliadas quando inseriram aditivos oleosos.

Khan et al. (2021) analisaram misturas asfálticas com taxas de reciclagem de 30%, 50%, 70% e 100% com o uso de borracha triturada e óleo de motor residual. Os autores constataram que tais aditivos reduziram consideravelmente a perda de massa de todas as composições.

Al-Saffar et al. (2020) confeccionaram misturas asfálticas recicladas com taxa de reciclagem de 40% e adição de 12% de malteno, e realizaram uma comparação com três outras misturas: uma confeccionada com agregados e ligante virgem, uma confeccionada com 100% RAP e a última confeccionada com 40% de RAP, sem adição de agente rejuvenescedor. Os autores verificaram que a inclusão do RAP aumenta a perda de massa, pois enquanto o desgaste foi de 5,5% para a mistura virgem, para as misturas com 40% e 100% de RAP, sem agente rejuvenescedor, os resultados desse parâmetro foram de 8,4% e 13%, respectivamente.

Por outro lado, os autores observaram que a adição de malteno recuperou até certo ponto as propriedades originais das misturas contendo RAP, que exibiu um valor de perda de massa de 5,4%, semelhante à mistura virgem.

Correlacionando essas observações de Al-Saffar et al. (2020) com os resultados obtidos nesse estudo, aqui também se verificou que a perda de massa aumentou gradativamente com a inclusão de teores maiores de RAP. No entanto, comparando com a mistura de referência, os resultados encontrados ficaram abaixo desta nos teores de 15% e 25% de RAP e semelhantes no teor de 33%, indicando o potencial do óleo de algodão de reduzir o desgaste de misturas asfálticas recicladas.

Tal comportamento comprova a afirmação de Al-saffar et al. (2020) que afirma que a inclusão de componentes oleosos aumenta a propriedade de adesão e coesão das misturas asfálticas recicladas. O óleo amolece o asfalto envelhecido e diminui a sua viscosidade.

Conforme apresentado no item 3.2.3 o óleo de algodão proporcionou uma redução no volume de vazios da amostra de RAP, portanto, sabendo que o desgaste cântabro é diretamente proporcional ao aumento do percentual de vazios da mistura asfáltica, infere-se que o óleo de algodão pode amenizar o desgaste sofrido por misturas recicladas com elevadas taxas de RAP.

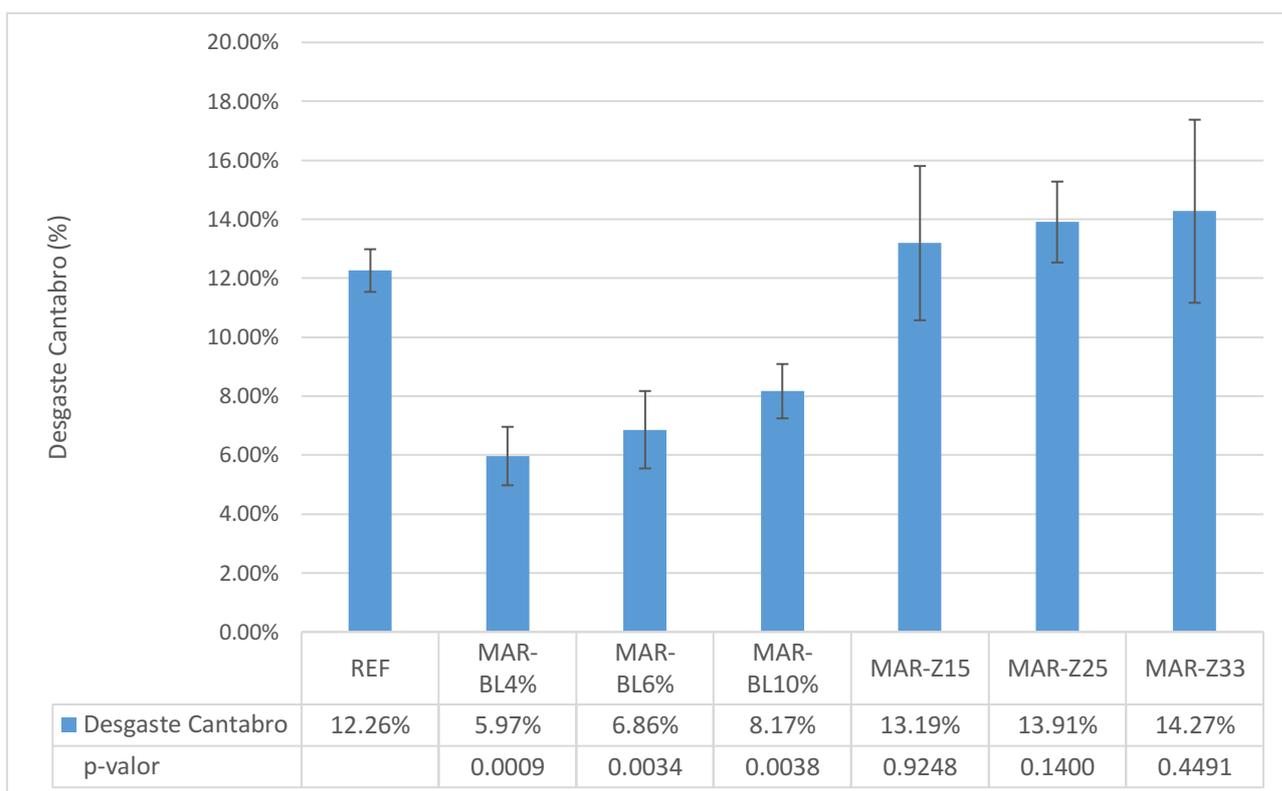
A perda de massa das misturas asfálticas recicladas com o uso de zeólita corroboram com os estudos de Otto (2009) e Tassir et al (2021).

Otto (2009) verificou que misturas asfálticas mornas com adição de zeólita clinopitilolita apresentaram comportamento similar ao da mistura de referência, ficando o desgaste médio dessas primeiras superior ao da mistura asfáltica de controle em torno de 1 a 2%.

Tassir et al. (2021) constatou um comportamento semelhante entre a mistura de referência, totalmente virgem, com as misturas contendo 20%, 40% de RAP com adição de 0,25% de zeólita, apesar de haver um leve incremento nos valores de perda de massa à medida que se aumentava o teor de RAP na mistura. Isso também foi observado aqui nesse estudo, onde não aconteceu diferença significativa entre o desgaste sofrido pela mistura de referência e o desgaste sofrido pelas misturas contendo 15%, 25% e 33% com a incorporação uso da zeólita. Ainda foi verificado um pequeno incremento nos valores de perda de massa à medida que a taxa de reciclagem aumentava, corroborando com as observações de Tassir et al. (2021).

Portanto, pode-se deduzir que a zeólita tem o efeito de recuperar a resistência à desagregação das misturas asfálticas contendo RAP, fazendo com que elas apresentem um comportamento próximo ao das misturas asfálticas confeccionadas com materiais virgens.

Figura 64 - Resultados de desgaste Cantabro



A Tabela 34 mostra os resultados do teste t de *Student* para o desgaste cântabro das amostras com bioligante e com zeólita. Por meio da avaliação do p-valor, percebe-se que houve uma diferença significativa de perda de massa entre as misturas asfálticas recicladas com bioligante MAR-BL4% - MAR-BL10% e com zeólita MAR-Z15 - MAR-Z25.

Cerdeira (2018) concluiu que o acréscimo de outros materiais como ligante virgem, aditivo surfactante, modificadores e agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas recicladas contribuem para a redução de perda de massa em relação às misturas sem incorporação de RAP.

Tabela 34 - Comparativo do desgaste cântabro entre MAR

Misturas asfálticas comparadas	p-valor
MAR-BL4% - MAR-BL6%	0,4003
MAR-BL4% - MAR-BL10%	0,0481
MAR-BL6% - MAR-BL10%	0,2311
MAR-Z15 - MAR-Z25	1,48E-01
MAR-Z15 - MAR-Z33	0,4372
MAR-Z25 - MAR-Z33	0,8260

4.1.5 Fadiga

A Figura 65 e Figura 66 mostram o comparativo gráfico entre os resultados do ensaio de fadiga da mistura asfáltica de referência com as misturas asfálticas recicladas com bioligante e com zeólita.

Para cada uma das curvas foi possível gerar as equações que melhor se adequaram as respectivas linhas de tendência de formato igual às expressões $N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{k_2}$ e $N = k_3 \left(\frac{1}{\Delta\epsilon_i}\right)^{k_4}$, com os seus respectivos coeficientes de determinação R^2 de cada linha de tendência, correspondente à qualidade do ajuste do modelo em relação aos pontos e os parâmetros k_1 , k_2 , k_3 e k_4 das equações. A Tabela 35 mostra um resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas estudadas.

Dentre as misturas recicladas, de acordo com os valores de k_2 mostrados na Tabela 35, verifica-se que a mistura MAR-BL6% é a mais resistente a fadiga a baixas tensões e as misturas MAR-Z15 e MAR-Z25 apresentaram maiores resistências a altas tensões.

Na Figura 66 são mostradas as curvas de vida de fadiga $\Delta\epsilon_i \times N$, onde a deformação resiliente pondera a interferência do módulo de resiliência inicial da mistura. Por meio do coeficiente de inclinação (k_4) das curvas, nota-se comportamento idêntico ao observado na análise das curvas $\Delta\sigma \times N$: para deformações resilientes baixas a mistura MAR-BL6% apresentou melhor desempenho, e para deformações resilientes altas a MAR-Z15 e MAR-Z25 foram as que suportaram maior número de aplicações de carga (N).

O comportamento da MAR-Z33 quanto ao número de aplicações de carga foi semelhante ao da REF. A MAR-Z33 apresentou um N inferior ao das misturas MAR-Z15 e MAR-Z25, o que já era previsto devido essa alternativa ter exibido o maior valor de MR conforme mostrado anteriormente.

Ao observar a Figura 65 é possível identificar que no teor de 4% e 6% de óleo de acontece uma redução da vida de fadiga da mistura reciclada. Costa (2022) também verificou uma redução da vida de fadiga de misturas asfálticas com 50% e 75% de RAP quando adicionou 12%, 15% e 18% de óleo residual de algodão.

Por outro lado, para a composição com adição de 10% de óleo de algodão a vida de fadiga se equipara a da mistura de referência. Por meio dos resultados de MR mostrados anteriormente, verificou-se que no teor de 10% de óleo de algodão a rigidez da mistura reciclada com 33% de RAP foi semelhante à da mistura de referência. Associando essa observação aos resultados de fadiga, para teores elevados de RAP, pode-se inferir que o óleo

de algodão apresenta potencial de restaurar as propriedades da mistura recicladas contra trincas por fadiga, diminuindo a sua rigidez e tornando a mistura menos frágil.

Pradhan e Sahoo (2020) e Melo Neto (2022) também observaram que a inclusão de rejuvenescedores (óleo de Mahua no teor de 4% e ácido graxo de borra de soja nos teores de 3% e 5%, respectivamente) melhorou a vida de fadiga das misturas recicladas com taxas de reciclagem acima de 25%, em comparação com misturas de referência.

Ao analisar o comportamento das composições com zeólita, observa-se que aconteceu um aumento da vida de fadiga para todas as composições analisadas. A composição MAR-Z15 foi a que apresentou a maior vida de fadiga quando comparado com a mistura de referência, reforçando o que afirma o senso comum de que o maior teor de RAP compromete a resistência à fadiga das misturas (MIRHOSSEINI et al., 2018; BANKOWSKI, 2018; DAI LU e SALEH, 2016; YOUSEFI et al, 2020).

Os resultados das misturas recicladas com o uso de zeólita corroboram com a pesquisa de Otto (2009) que analisou misturas asfálticas mornas com adição de zeólita natural clinoptilolita. Na análise de fadiga, as misturas asfálticas mornas com adição de zeólita demonstraram menor suscetibilidade a variações do número de aplicação de solicitações.

Sengoz et al (2016) também verificou que a adição de zeólita as misturas WMA sem RAP suportaram um maior número de ciclos de carregamento em comparação com a HMA de referência. No entanto, o uso gradativo de RAP promoveu uma queda na resistência à fadiga dessas misturas.

Com a análise das deformações pelo número de ciclos (Figura 66) é possível consolidar as suposições anteriormente levantadas, onde as misturas com óleo de algodão nos teores de 4 e 6%, além de apresentarem baixa vida de fadiga, também demonstram baixa capacidade de deformação. Em contrapartida, a composição MAR-BL10%, mistura que apresentou um leve aumento de vida de fadiga quando comparada a referência, exibiu ganhos significativos nas deformações desenvolvidas. Tal comportamento indica que a composição MAR-BL10% apresenta uma vida de fadiga próxima as misturas convencionais e com maior capacidade de deformação.

Ao analisar as composições aditivadas de zeólita observa-se ganhos de capacidade de deformação. Dessa forma, as amostras analisadas com zeólita apresentam melhoria na vida de fadiga mantendo as capacidades de deformação se comparadas as misturas convencionais.

Figura 65 - Número de ciclos versus diferença de tensões

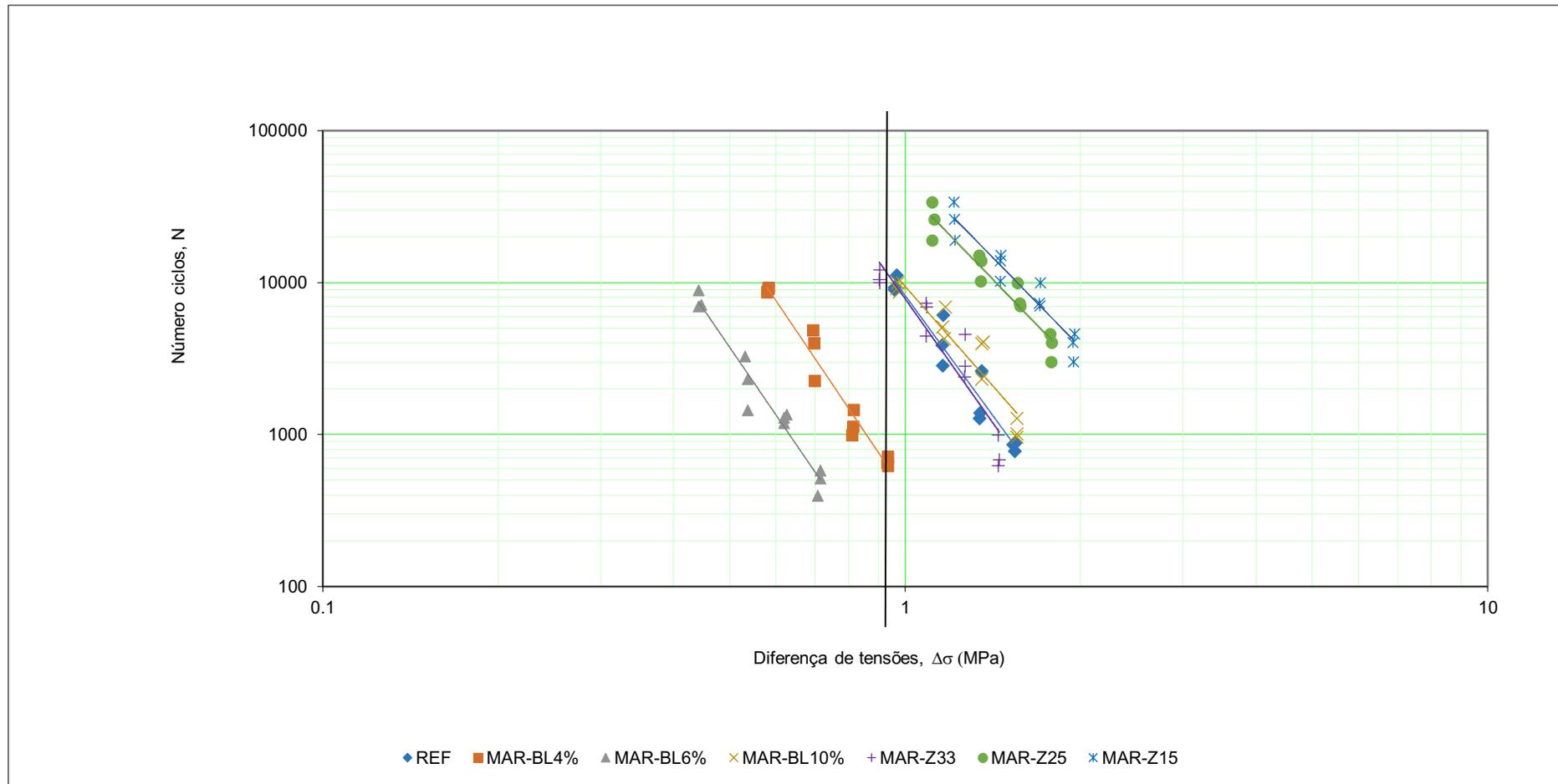


Figura 66 - Número de ciclos versus deformação resiliente inicial

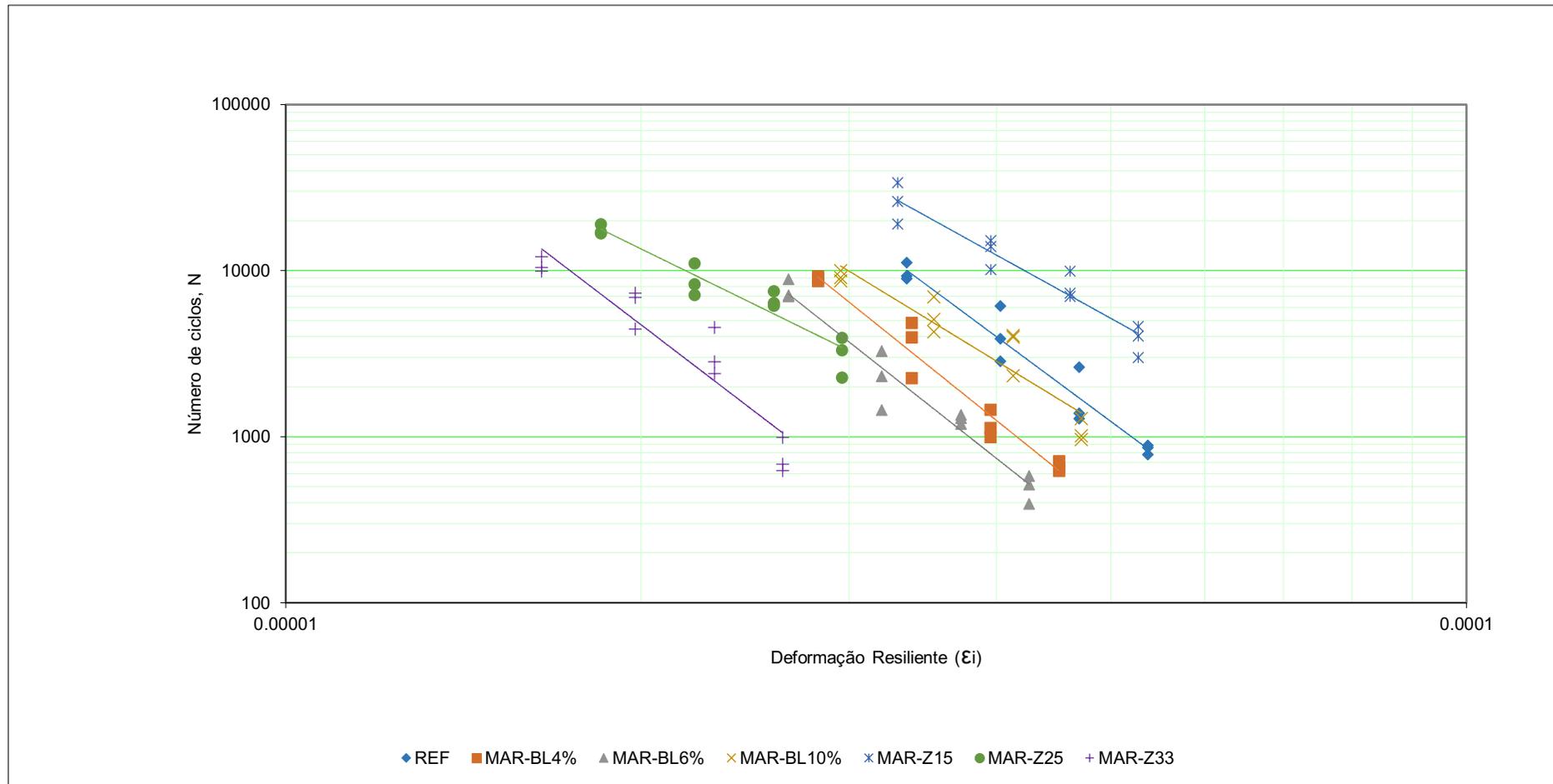


Tabela 35 - Resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas

Mistura asfálticas	R²	parâmetros	
REF	0,9233	$\Delta\sigma \times N$	
		k1	k2
	0,9255	$\Delta\sigma \times \epsilon_i$	
		k3	k4
	8202,6	0,9233	5,334
	1,00E-20		
MAR-BL4%	0,9563	$\Delta\sigma \times N$	
		k1	k2
	0,956	$\Delta\sigma \times \epsilon_i$	
		k3	k4
	417,28	5,68	5,717
	9,00E-23		
MAR-BL6%	0,9707	$\Delta\sigma \times N$	
		k1	k2
	0,9691	$\Delta\sigma \times \epsilon_i$	
		k3	k4
	75,011	5,749	5,824
	2,00E-23		
MAR-BL10%	0,8975	$\Delta\sigma \times N$	
		k1	k2
	0,8991	$\Delta\sigma \times \epsilon_i$	
		k3	k4
	9423,5	4,348	4,342
	2,00E-16		
MAR-Z15	0,9065	$\Delta\sigma \times N$	
		k1	k2
	0,9053	$\Delta\sigma \times \epsilon_i$	
		k3	k4
	52899	3,77	3,779
	3,00E-13		
MAR-Z25	0,9561	$\Delta\sigma \times N$	
		k1	k2
	0,9565	$\Delta\sigma \times \epsilon_i$	
		k3	k4
	27084	3,526	3,506
	5,00E-13		
MAR-Z33	0,8775	$\Delta\sigma \times N$	
		k1	k2
	0,8778	$\Delta\sigma \times \epsilon_i$	
		k3	k4
	7623,1	5,417	5,423
	2,00E-22		

4.1.6 Flow Number

A Figura 67 mostra o comparativo gráfico dos resultados do ensaio de *Flow Number* da mistura asfáltica de referência com as misturas asfálticas com e sem agentes de reciclagem. Na tabela de dados da Figura 67 estão apresentados os valores médios do *Flow Number* e das deformações no *flowpoint*, bem como os seus respectivos p-valores resultantes do primeiro teste t de *Student*.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que todas as amostras apresentaram resistência à deformação permanente superior à da amostra de referência. No entanto, a mistura MAR-BL4% apresentou um comportamento similar ao da REF, exibindo um p-valor de 0,0585.

Com base nos resultados obtidos é possível verificar que as deformações no *flowpoint* apresentaram pouca variação independente da composição analisada, apresentando valor médio de 12500 *microstrains*.

Os resultados do *Flow Number* mostram que o aumento dos teores de óleo de algodão, associado aos incrementos dos teores de RAP, elevaram a resistência à deformação permanente das composições.

Ao observar a constância das deformações, infere-se que essa maior resistência pode estar associada a utilização do RAP, que acarreta um aumento na proporção do ligante envelhecido da composição, contribuindo para o aumento da rigidez. Tal fato também pode ser observado em outros estudos (AL-QADI, 2015; CENTOFANTE, 2016; ARRUDA, 2021), que constataram um incremento na resistência à deformação permanente com o aumento do teor de RAP nas misturas analisadas.

Os resultados obtidos corroboram ainda com os dados de Jnr a 3.2 kPa dos ligantes asfálticos utilizados na produção dessas misturas asfálticas. O ligante do RAP apresentou um Jnr de 0,010 kPa⁻¹, comprovando sua rigidez e resistência à deformação permanente. Portanto, as misturas com maiores teores de RAP apresentaram maiores valores de resistência à deformação permanente.

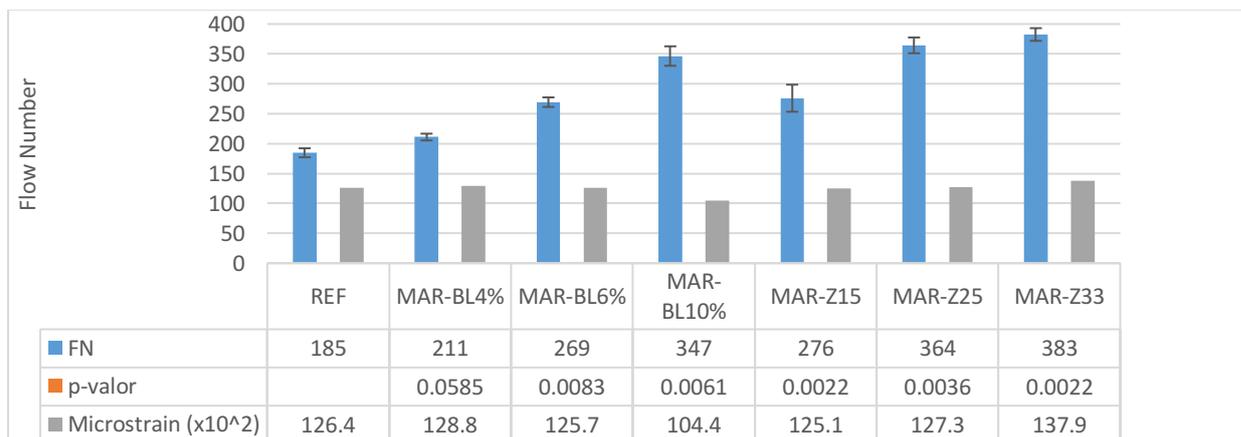
Sobre a utilização do óleo de algodão, os resultados corroboram com o estudo de Melo Neto (2022) que observou que a adição do RAP à mistura asfáltica a quente aumentou a resistência à deformação permanente em 558,9%, 411,3% e 384,8% nas misturas RAP40% e RAP40% mais 3% e 5% de ácido graxo da borra de soja, respectivamente.

A mistura MAR-BL4% que apresentou um comportamento semelhante ao da REF, mesmo utilizando 15% de RAP na sua composição, demonstra o efeito da incorporação do aditivo na redução do enrijecimento e, conseqüentemente, recuperação das propriedades originais da mistura.

As amostras com zeólita revelam a influência direta do RAP na resistência à deformação das misturas. Como o teor de zeólita foi o mesmo para todas as composições, conclui-se que o aumento da resistência à deformação está mais atrelado à presença do RAP nas composições do que ao uso do aditivo. No entanto, não se pode descartar o efeito do aditivo nessa redução, pois Wozzuk e Franus (2016) verificaram uma melhoria de 20 a 30% na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas mornas, sem a inserção de RAP, com a utilização de zeólitas naturais e sintéticas.

Yousefi et al. (2020) observaram que, com relação à mistura de HMA convencional, o RAP aumentou o valor de FN em 332,2%, enquanto para misturas de WMA contendo Sasobit, Zeolita, Kaowax (aditivo orgânico) e PAWMA (aditivo químico), a inserção do RAP aumentou os valores de FN em 19,2%, 269,9%, 49,0% e 15,3%, respectivamente. Os autores concluíram que os maiores incrementos nos valores de FN aconteceram devido à adição de RAP, fato também constatado nesse estudo.

Figura 67 - Resultados do ensaio de *Flow Number*



A Tabela 36 mostra os resultados do teste t de *Student* para o *Flow Number* das amostras com bioligante e com zeólita. Por meio da avaliação do p-valor, percebe-se que o aditivo e o teor de RAP promoveu diferença significativa entre todas as composições.

Tabela 36 - Comparativo do *Flow Number* entre MAR com bioligante

Misturas asfálticas comparadas	p-valor
MAR-BL4% - MAR-BL6%	0,014
MAR-BL4% - MAR-BL10%	0,008
MAR-BL6% - MAR-BL10%	0,027
MAR-Z15 - MAR-Z25	0,041
MAR-Z15 - MAR-Z33	0,026
MAR-Z25 - MAR-Z33	0,041

4.2 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Neste item serão mostrados os resultados do potencial de circularidade ICM_{MAR} e $(ICM_{MAR})'$ da análise do ciclo de vida e do custo do ciclo de vida das misturas asfálticas estudadas.

4.2.1 Análise de Circularidade das Misturas Asfálticas

Neste item é apresentada a estimativa do potencial de circularidade das misturas asfálticas estudadas, por meio do cálculo e comparativo do ICM_{MAR} e do $(ICM_{MAR})'$.

A Tabela 37 apresenta os valores das unidades funcionais consideradas no cálculo do fator de utilidade (χ e χ') de todas as misturas asfálticas.

A Tabela 38 apresenta todos os parâmetros de entrada para a determinação dos ICM_{MAR} e do $(ICM_{MAR})'$ das misturas asfálticas estudadas. As Figuras 68 e 69 apresentam o comparativo gráfico dos valores do Fator de Utilidade e as Figuras 70 e 71 mostram os resultados do Índice de Circularidade de Misturas Asfálticas estudadas.

Tabela 37 - Unidades funcionais consideradas no cálculo do fator de utilidade

Mistura asfáltica	Fadiga (Ciclos)		Deformação Permanente (Ciclos)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à tração retida (%)	Cântabro (%)
	30%	40%				
REF	4286	843	185	0,96	78,82%	12,26%
MAR-BL4%	3706	666	211	0,70	71,17%	5,97%
MAR-BL6%	2349	498	269	0,66	70,08%	6,86%
MAR-BL10%	5444	1087	347	0,97	78,86%	8,17%
MAR-Z15	13119	3889	276	1,21	86,74%	13,19%
MAR-Z25	8846	3183	364	1,22	79,30%	13,91%
MAR-Z33	6231	768	383	1,25	77,93%	14,27%

Tabela 38 - Quantificação do ICM_{MRA} das misturas asfálticas

Misturas asfálticas estudadas		REF	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-Z33	
Definição	Carga do ensaio de Fadiga (%RT)	Valores							
		Massa de matéria-prima virgem usada - V (kg)	1443750,00	1227187,50	1082812,50	967312,50	1227187,50	1082812,50	967312,50
Fração de matéria-prima derivada de fontes recicladas - P_{RAP}		0	0,15	0,25	0,33	0,15	0,25	0,33	
Massa total do produto final - G_{MAR} (kg)		1443750,00	1443750,00	1443750,00	1443750,00	1443750,00	1443750,00	1443750,00	
Fração do produto coletado para a reciclagem no final da vida útil do pavimento - F_{RAP}		0,00	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	
Quantidade de resíduos produzidos no fim da vida útil do pavimento (destinado para aterro ou para valorização energética) - W_{EOL} (kg)		1443750,00	433125,00	433125,00	433125,00	433125,00	433125,00	433125,00	
Resíduos gerados no processo de reciclagem - W_T (kg)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Resíduos gerados na produção da mistura asfáltica - W_P (kg)		0,00	4419,64	7366,07	9723,21	4419,64	7366,07	9723,21	
Eficiência do processo de reciclagem na fase I (tratamento do RAP) - E_T		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Eficiência do processo de reciclagem na fase 2 (produção de mistura asfáltica) - E_P		98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	
Quantidade total de resíduos - W(kg)		1443750,00	435334,82	436808,04	437986,61	435334,82	436808,04	437986,61	
Índice de fluxo linear - IFL		1,00	0,58	0,53	0,49	0,58	0,53	0,49	
Fator de utilidade	χ	30%	1,00	0,99	0,80	2,38	4,57	4,07	3,01
		40%	1,00	0,90	0,86	2,42	6,90	7,45	1,89
	χ'	30%	1,00	1,33	0,87	3,62	5,89	4,19	2,40
		40%	1,00	1,21	0,94	3,68	8,87	7,66	1,51
Fator de utilidade construído em função do fator de utilidade X das misturas asfálticas	$F(\chi)$	30%	0,90	0,91	1,13	0,38	0,20	0,22	0,30
		40%	0,90	1,00	1,04	0,37	0,13	0,12	0,48
	$F(\chi')$	30%	0,90	0,68	1,04	0,25	0,15	0,21	0,37
		40%	0,90	0,74	0,96	0,24	0,10	0,12	0,60
Indicador de circularidade do material	ICM^*_{MAR}	30%	0,10	0,48	0,41	0,82	0,89	0,88	0,85
		40%	0,10	0,43	0,45	0,82	0,92	0,94	0,77
	$(ICM^*_{MAR})'$	30%	0,10	0,61	0,46	0,88	0,91	0,89	0,82
		40%	0,10	0,57	0,49	0,88	0,94	0,94	0,71
Índice de circularidade de material em nível de produto	ICM_{MAR}	30%	0,10	0,48	0,41	0,82	0,89	0,88	0,85
		40%	0,10	0,43	0,45	0,82	0,92	0,94	0,77
	$(ICM_{MAR})'$	30%	0,10	0,61	0,46	0,88	0,91	0,89	0,82
		40%	0,10	0,57	0,49	0,88	0,94	0,94	0,71

Figura 68 - Resultados do Fator de Utilidade (χ) das misturas asfálticas (N_{fadiga} em 30% da RT)

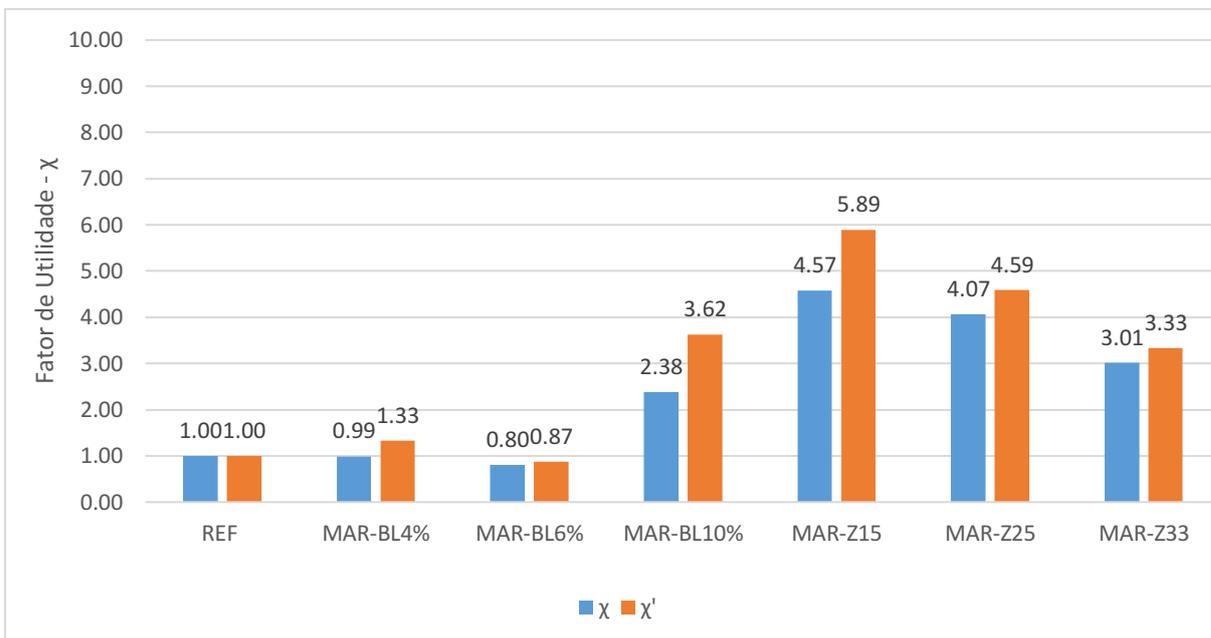


Figura 69 - Resultados do Fator de Utilidade (χ) das misturas asfálticas (N_{fadiga} em 40% da RT)

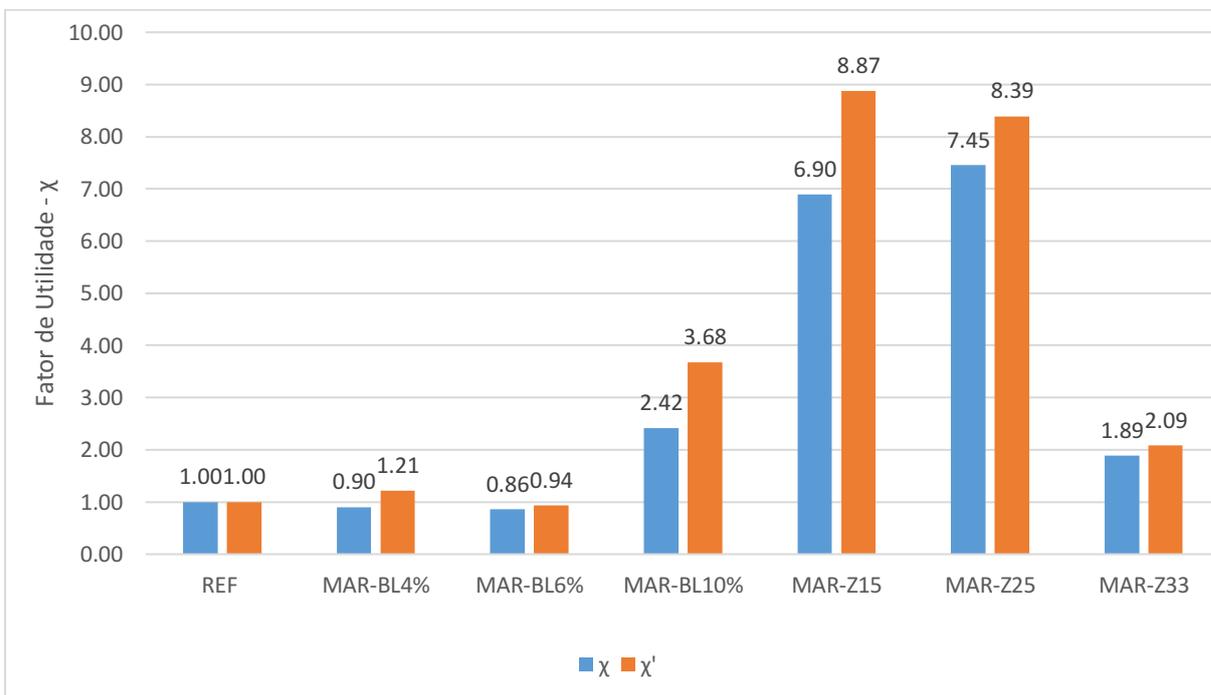


Figura 70 - Resultados do ICM_{MAR} das misturas asfálticas (Nfadiga em 30% da RT)

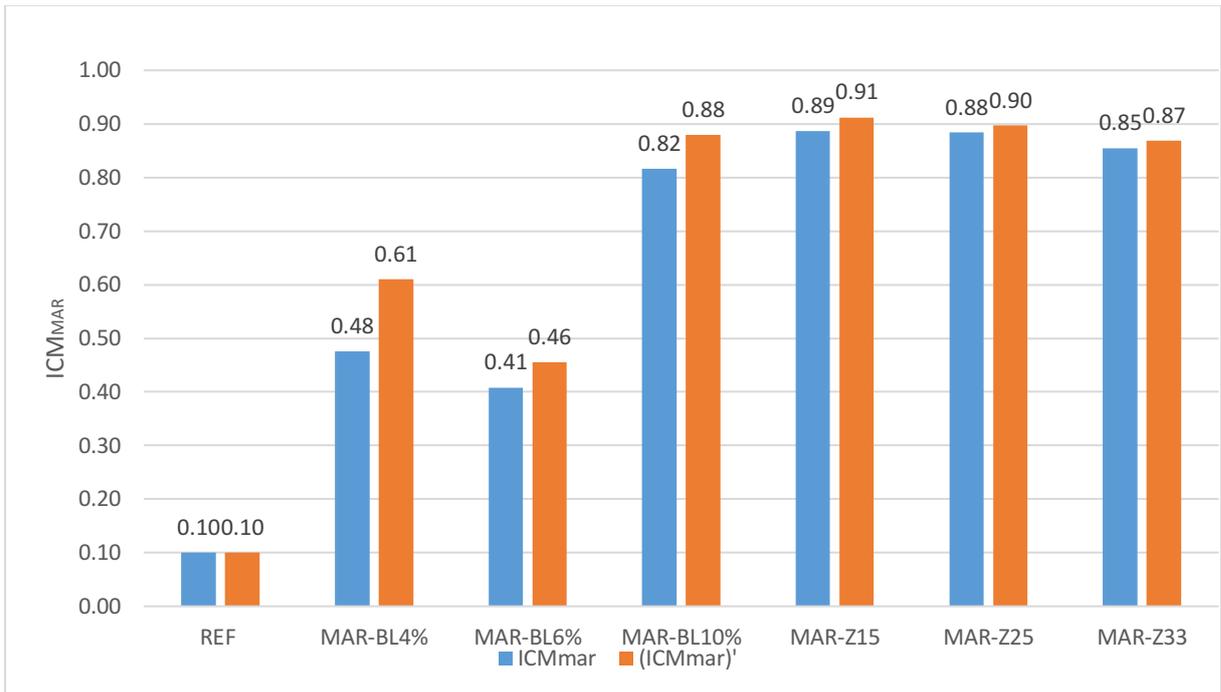
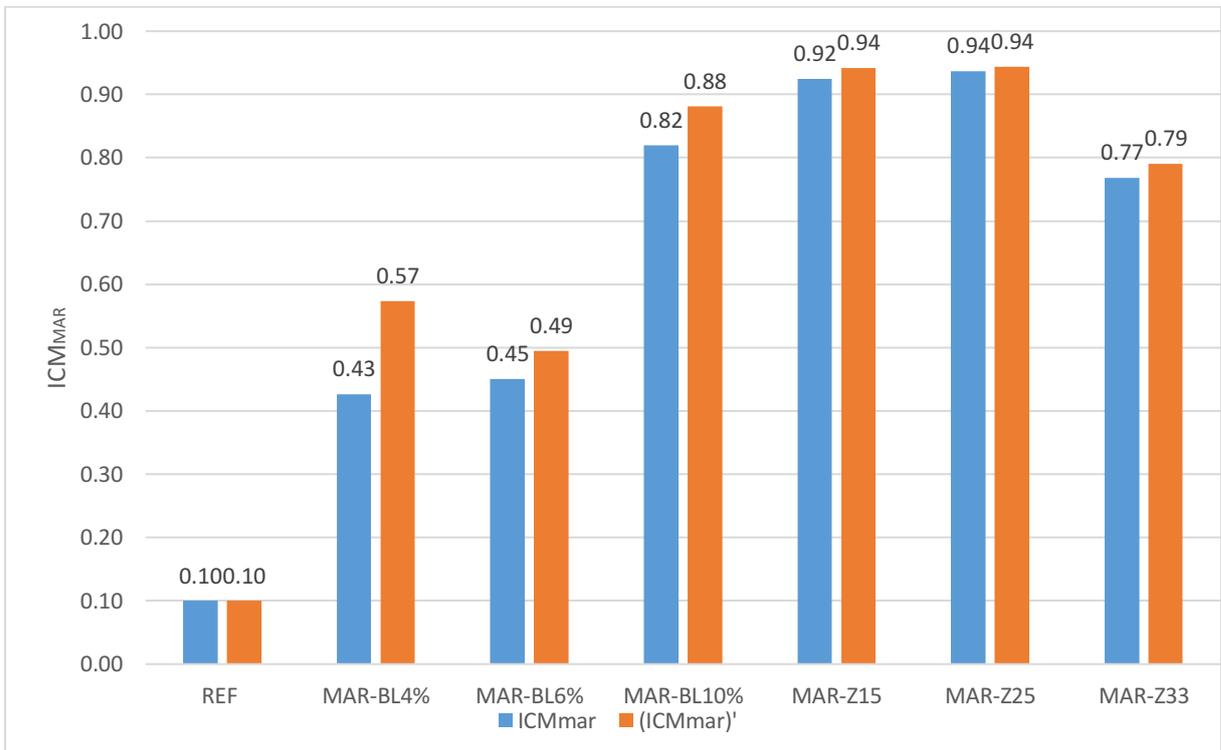


Figura 71 - Resultados do ICM_{MAR} das misturas asfálticas (Nfadiga em 40% da RT)



Inicialmente, observando os valores dos índices de fluxo linear (IFL) apresentados na Tabela 38, verifica-se que as misturas asfálticas MAR-BL10% e MAR-Z33 foram as que apresentaram o menor valor (0,49), dentre todas as alternativas avaliadas.

Como o IFL mede a proporção de material que flui de forma linear e que quanto mais próximo de zero este índice estiver, mais restaurador será o fluxo, conclui-se que as misturas asfálticas MAR-BL10% e MAR-Z33 são as que mais se afastam do modelo linear. Tal constatação já era esperada devido ao maior percentual nas suas composições de material oriundo de fontes recicladas.

Sobre o fator de utilidade, a componente de intensidade de uso $\frac{N_{MAR}}{N_{av}}$ reflete a intensidade em que um produto é usado em sua plena capacidade. Aumentar a intensidade de uso de um produto resulta em uma utilização mais eficiente de quaisquer recursos que seguem um caminho linear, acarretando menor geração de resíduos e menor utilização de materiais virgens usados por unidade de tempo pela porção linear do fluxo, devido a menor necessidade de reparos e manutenções ao longo da sua vida útil.

Conforme mostrado nas Figuras 68 e 69, no geral as misturas asfálticas recicladas aditivadas com zeólita foram as que exibiram maiores fatores de utilidade.

Seguindo a metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019) a mistura asfáltica que apresentou o maior fator de utilidade para o nível de tensão de 30% da RT no ensaio de fadiga foi a MAR-Z15. No nível de tensão de 40% da RT no ensaio de fadiga, a mistura com maior intensidade de uso foi a MAR-Z25.

Seguindo a metodologia adaptada, para ambos os níveis de tensão no ensaio de fadiga, a mistura asfáltica com maior fator de utilidade foi a MAR-Z15.

Como a metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019) inclui somente o comportamento das misturas frente à fadiga e à deformação permanente, no nível de tensão mais elevado o fator de utilidade não indicou a melhor alternativa de produto quanto a intensidade de uso, ou seja, não indicou a mistura asfáltica com melhor comportamento mecânico. Quando se considera uma análise de desempenho mais completa, a MAR-Z25 apresenta bom desempenho, entretanto, não é a melhor alternativa dentro do conjunto de misturas asfálticas avaliadas.

A mistura MAR-Z25 exibiu bom desempenho frente à deformação permanente e a fadiga, entretanto ainda não é a melhor alternativa quando se avalia o dano por umidade, o desgaste cântabro e até mesmo a fadiga no nível de tensão de 40% da RT.

A metodologia adaptada indicou com mais representatividade qual a mistura asfáltica que apresentará uma maior intensidade de uso e, conseqüentemente, uma maior economia de materiais ao longo do tempo. A MAR-Z15 foi a que apresentou maior resistência à tração retida (86,74%) e suportou uma maior quantidade de ciclos nos níveis de tensão de 30% e 40% (1311 e 3889, respectivamente). Quanto ao desgaste cântabro, se equiparou à mistura de referência (p-valor = 0,9248) e quanto à resistência a deformação permanente, apesar de não ter sido aquela de melhor desempenho ainda exibiu um desempenho melhor do que a mistura de referência, suportando uma maior quantidade de ciclos.

Ainda segundo o comparativo estabelecido nas Figuras 68 e 69, dentre as misturas asfálticas reciclada com óleo de algodão, tanto a metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019) quanto a metodologia adaptada apontaram que a mistura MAR-BL10% é a que apresenta a maior intensidade de uso nos dois níveis de tensão do ensaio de fadiga. A indicação da mesma alternativa pelas duas metodologias se deu pelo fato de que a MAR-BL10% exibiu o melhor desempenho nas duas unidades funcionais do método de Mantalovas e Di Mino (2019) e o melhor desempenho em quase todas as unidades funcionais adicionais do método adaptado, exceto o desgaste cântabro.

Por meio de um comparativo do fator de utilidade da MAR-BL10% calculado pelas duas metodologias, percebe-se uma diminuição dos valores quando se utilizou o método adaptado. Essa redução aconteceu devido ao maior desgaste cântabro sofrido por essa mistura, o que reflete uma queda na sua intensidade de uso ao longo da vida útil devido a menor resistência à desintegração por abrasão.

Portanto, mais uma vez percebe-se que a metodologia adaptada foi capaz de fornecer uma melhor previsibilidade da intensidade de uso das misturas asfálticas analisadas por abranger um conjunto maior de propriedades mecânicas.

Por meio da comparação dos ICM_{MAR} (Figura 70 e 71) percebe-se que no nível de tensão de 30% pela metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019) e pela metodologia adaptada a MAR-Z15 foi a mais circular.

No nível de tensão de 40% pela metodologia de Mantalovas e Di Mino (2019) a mistura MAR-Z25 exibiu maior circularidade e pela metodologia adaptada a circularidade da MAR-Z15 e MAR-Z25 foram as maiores.

O ICM_{MAR} é função de duas componentes: uma que mede a linearidade do fluxo e outra que mede a utilidade do produto ao longo da sua vida útil. Portanto, o produto tende a ser mais circular quando menor for sua linearidade (quando engloba uma parcela maior de

materiais reutilizados ou reciclados) e maior for a sua intensidade de uso (quando maior for sua durabilidade funcional em comparação com um produto médio da indústria).

Assim, por meio dos resultados de IFL apresentados na Tabela 38 e dos resultados de χ mostrado na Figura 68 e Figura 69, percebe-se o seguinte:

- Quando ao IFL:
MAR-BL10%= MAR-Z33 < MAR-BL6%= MAR-Z25 < MAR-BL4%= MAR-Z15 < REF
- Quanto ao χ (N_{fadiga} em 30% da RT) por Mantalovas e Di Mino (2019):
MAR-Z15 > MAR-Z25 > MAR-Z33 > MAR-BL10% > REF > MAR-BL4% > MAR-BL6%
- Quanto ao χ (N_{fadiga} em 30% da RT) por metodologia adaptada:
MAR-Z15 > MAR-Z25 > MAR-BL10% > MAR-Z33 > MAR-BL4% > MAR-BL6% > REF
- Quanto ao χ (N_{fadiga} em 40% da RT) por Mantalovas e Di Mino (2019):
MAR-Z25 > MAR-Z15 > MAR-BL10% > MAR-Z33 > REF > MAR-BL4% > MAR-BL6%
- Quanto ao χ (N_{fadiga} em 40% da RT) por metodologia adaptada:
MAR-Z15 > MAR-Z25 > MAR-BL10% > MAR-Z33 > MAR-BL4% > REF > MAR-BL6%

Quanto a linearidade, as misturas MAR-BL10%, MAR-Z33 e MAR-BL6% apresentam um maior potencial restaurador, no entanto não obtiveram os melhores resultados em termos de desempenho mecânico. Já as misturas MAR-Z15 e MAR-Z25 foram a que apresentaram menor linearidade e maior utilidade, sendo, portanto, consideradas mais circulares pelas duas metodologias, principalmente a MAR-Z15 em níveis de tensões intermediários (30% da RT).

Os resultados de ICM_{MAR} demonstraram ainda que esse índice foi mais afetado pelo fator de utilidade das misturas do que pelos Índices de Fluxo Linear. Isso indica que a circularidade das misturas avaliadas está mais atrelada ao seu potencial de serventia ao longo da vida útil, que reduz a obrigação de reparos e manutenções e diminui a necessidade do uso de materiais virgens, do que ao teor de RAP presente na sua composição.

Quanto às misturas com óleo de algodão, a mistura MAR-BL10% foi a mais circular pelas duas metodologias e nos dois cenários de N_{fadiga} . Isso aconteceu devido ao fato da

componente relacionada a utilidade (χ) das misturas de maior linearidade (MAR-BL4%; MAR-BL6%) ter apresentado valores semelhantes ao da mistura de referência. Como a MAR-BL10% é a alternativa de menor linearidade e maior intensidade de uso dentre as três opções de misturas com óleo de algodão, para os dois cenários N_{fadiga} independente da metodologia utilizada, é, então, considerada a mais circular.

4.2.2 Avaliação do ciclo de vida das misturas asfálticas

Neste item são discutidos os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida das alternativas de pavimentos estudadas.

4.2.2.4 Análise dos inventários do ciclo de vida (ICV)

Os dados coletados e organização dos fluxos de cada processo elementar utilizados para a posterior modelagem do ciclo de vida estão descritos a seguir:

a) Obtenção da matéria-prima

Os inventários da brita 19mm, brita 12,5mm (Tabela 39) e do pó de pedra (Tabela 40) foram subsidiados por informações obtidas no banco de dados Ecoinvent® (Silva, 2016) e na pesquisa de Ocharán e Lima (2019).

Nos inventários dos agregados graúdos e do pó de pedra, o conjunto de dados incluiu as atividades de extração, britagem e armazenamento, bem como a manutenção de equipamentos e a infraestrutura necessária para a produção dos agregados.

No quantitativo das entradas e saídas desse processo considerou-se a rocha natural sendo extraída por explosão e perfuração e os grandes blocos de rocha sendo transportados até o britador primário por caminhões para, em seguida, serem britados por meio de uma série de britadores de vários tipos e peneiras conectadas por correias transportadoras.

O armazenamento do material britado aconteceu em pilhas de acordo com o tamanho e inclui o carregamento dos caminhões para a entrega, mas não necessariamente a entrega. Inclui também o uso do solo considerando uma vida útil de 80 anos para a pedreira.

Nas emissões atmosféricas estão incluídos os quantitativos referentes às emissões de material particulado e dos gases dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, dióxido de enxofre, sulfato, NMVOC, amônia, ácido nitroso.

Nas emissões para a água foram quantificados o fosfato, nitrato, nitrogênio, cloro, sulfato, sódio, magnésio, cálcio, potássio, zinco, fósforo, ferro e nas emissões para o solo os óleos, zinco, cobre, ferro, boro, cádmio e chumbo.

As entradas e saídas do processo elementar de obtenção da brita 19mm ou da brita 12,5mm ou do pó de pedra estão descritas na Figura 72.

Figura 72- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (brita 19mm ou brita 12,5mm ou pó de pedra)

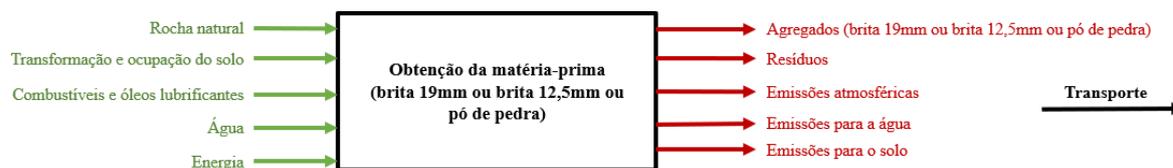


Tabela 39 - ICV da obtenção de 1kg de brita 19mm ou 1kg de brita 12,5mm

Entradas	Unidade	Quantidade
Desmonte por explosão	kg	3,7000E-04
Edificações	m2	4,1600E-09
Correia transportadora	m	3,9000E-09
Diesel, queimado na máquina de construção	MJ	2,7216E-02
Eletricidade	kWh	2,7400E-03
Granito	kg	1,0500E+00
Máquinas industriais	kg	5,8000E-06
Óleo lubrificante	kg	8,5600E-06
Ocupação do solo	m2*a	2,4560E-04
Aço	kg	3,1600E-05
Borracha sintética	kg	8,9100E-06
Transformação do solo	m2	6,1400E-06
Água	kg	2,0500E-02
Saídas	Unidade	Quantidade
Agregado (brita 19mm ou 12,5mm)	kg	1,0000E+00
Sucata de aço, para tratamento em aterros de materiais inertes	kg	3,1600E-05
Resíduos de óleo mineral, para mercado de óleo residual	kg	8,5600E-06
Resíduos de borracha, para mercado de resíduos	kg	8,9100E-06
Água	m3	2,0500E-05
Emissões atmosféricas	kg	1,9797E-03
Emissões para água	kg	1,6101E-05
Emissões para o solo	kg	3,0069E-07

Fonte: Adaptado de Ecoinvent® (Silva, 2016) e Ocharán e Lima 2019

Tabela 40 - ICV da obtenção de 1kg de pó de pedra

Entradas	Unidade	Quantidade
Desmonte por explosão	kg	7,4000E-06
Edificações	m ²	8,3200E-11
Correia transportadora	m	7,8000E-11
Diesel, queimado na máquina de construção	MJ	5,4432E-04
Eletricidade	kWh	5,4800E-05
Granito	kg	2,1000E-02
Máquinas industriais	kg	1,1600E-07
Óleo lubrificante	kg	1,7120E-07
Ocupação do solo	m ² *a	4,9121E-06
Aço	kg	6,3200E-07
Borracha sintética	kg	1,7820E-07
Transformação, não especificada	m ²	1,2280E-07
Água	kg	4,1000E-04
Saídas	Unidade	Quantidade
Agregado (pó de pedra)	kg	1,0000E+00
Sucata de aço, para tratamento em aterros de materiais inertes	kg	6,3200E-07
Resíduos de óleo mineral, para mercado de óleo residual	kg	1,7120E-07
Resíduos de borracha, para mercado de resíduos	kg	1,7820E-07
Água	m ³	4,1000E-07
Emissões atmosféricas	kg	3,9480E-02
Emissões para água	kg	3,2202E-04
Emissões para o solo	kg	6,0138E-06

Fonte: Adaptado de Ecoinvent® (Silva, 2016) e Ocharán e Lima 2019

O inventário da areia (Tabela 41) foi construído com base nos dados do Ecoinvent® (Moraga, 2015) e dos autores Ocharán e Lima, 2019. No inventário estão incluídas as atividades de mineração de areia natural de depósitos de leito de rio, o seu processamento e o seu armazenamento.

A extração de areia de jazidas de leito de rio representa 90% da produção (FERREIRA E JÚNIOR, 2009). As bombas dragam a lama, que consiste em areia, água, argila, lodo e cascalho, do leito do rio.

O conjunto de dados considerado inclui a extração de areia do leito do rio por dragagem, o processamento, o armazenamento, bem como a manutenção dos equipamentos. O processo termina com a areia em pilhas de armazenamento no terminal de distribuição.

Nas emissões atmosféricas, emissões para a água e emissões para o solo foram quantificados os mesmos fluxos do processo de obtenção dos agregados graúdos.

As entradas e saídas do processo elementar de obtenção da areia estão descritas na Figura 73.

Figura 73- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (areia)

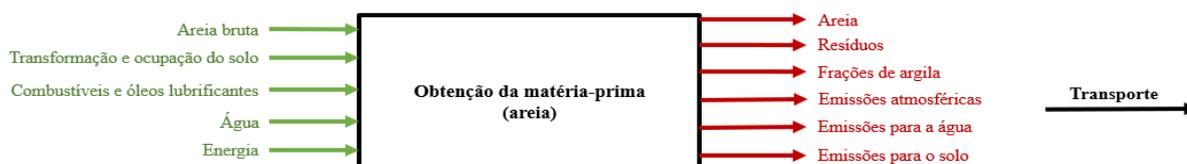


Tabela 41 - ICV da obtenção de 1kg de areia

Entradas	Unidade	Quantidade
Edificação	m2	1,1300E-07
Diesel, queimado em máquina de construção	MJ	4,9911E-02
Eletricidade	kWh	1,3000E-04
Ocupação do solo	m2*a	1,5476E-02
Areia	kg	1,1270E+00
Aço	kg	1,8000E-05
Borracha sintética	kg	3,4400E-06
Transformação do solo	m2	3,0952E-04
Água	m3	8,2000E-03
Óleo lubrificante	kg	1,8601E-05
Saídas	Unidade	Quantidade
Areia	kg	1,0000E+00
Sucata de aço, para tratamento em aterros de materiais inertes	kg	1,8000E-05
Resíduos de borracha, para mercado de resíduos	kg	3,4400E-06
Água	m3	8,1500E-03
Fração de argila	kg	1,2700E-07
Emissões atmosféricas	kg	3,5801E-03
Emissões para a água	kg	2,0117E-05
Emissões para o solo	kg	5,5277E-07

Fonte: Adaptado de Ecoinvent® (Moraga, 2015) e e Ocharán e Lima 2019

Os dados para o inventário da obtenção do asfalto (Tabela 42) foram extraídos no relatório “Life Cycle Assessment of Asphalt Binder” (Asphalt Institute, 2019) e incluiu o

fornecimento e extração do petróleo, transporte para refinarias, refino de petróleo bruto em asfalto e o transporte para o terminal de distribuição.

Nas emissões atmosféricas estão incluídos os quantitativos referentes a amônia, halogênio orgânico adsorvível, arsênico, cádmio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, cloro, cromo, cobalto, cobre, resíduos perigosos, ferro, mercúrio, metano, óxidos de nitrogênio, NMVOC, compostos orgânicos voláteis, material particulado, dióxido de enxofre, entre outros.

Nas emissões para a água foram quantificados amônia, arsênico, demanda biológica de oxigênio, demanda química de oxigênio, cádmio, cromo, cobre, sólidos dissolvidos, carbono orgânico dissolvido, ferro, mercúrio, níquel, nitrogênio, fósforo, água residual, entre outros.

As entradas e saídas do processo elementar de obtenção do asfalto estão descritas na Figura 74.

Figura 74 - DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (asfalto)

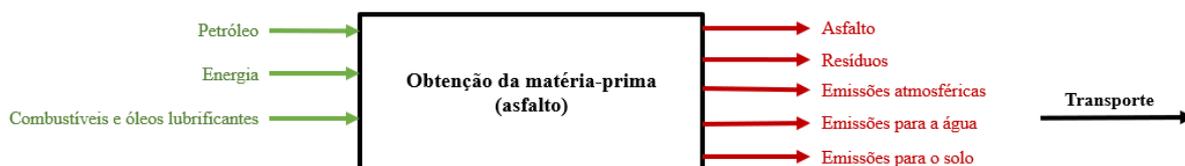


Tabela 42 - ICV da obtenção de 1kg de asfalto

Entradas	Unidade	Quantidade
Recursos do solo	kg	8,2634E-02
Recursos do ar	kg	1,0810E-02
Água	m ³	1,2901E-01
Água	kg	3,4070E+00
Energia	MJ	5,3366E+01
Saídas	Unidade	Quantidade
Asfalto	kg	1,0000E+00
Emissões atmosféricas	kg	4,5430E-03
Emissões para a água	kg	1,0601E+02
Emissões para a água	m ³	2,3100E+01
Emissões para o solo	kg	4,5800E-01
Resíduos perigosos (depositados)	kg	1,4000E-08

Fonte: “Life Cycle Assessment of Asphalt Binder” (Asphalt Institute, 2019)

O inventário da produção do óleo de algodão bruto (Tabela 43) foi feito com base nos dados do Ecoinvent® (Levova, 2012). A atividade começa com a recepção das sementes de algodão. O processamento das sementes em óleo acontece por meio da técnica de extração por

solvente. Nas emissões atmosféricas foram quantificados o dióxido de carbono e o hexano. A atividade finaliza com o óleo bruto de algodão pronto para o transporte.

As entradas e saídas do processo elementar de obtenção do óleo de algodão bruto estão descritas na Figura 75.

Figura 75- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (óleo de algodão)

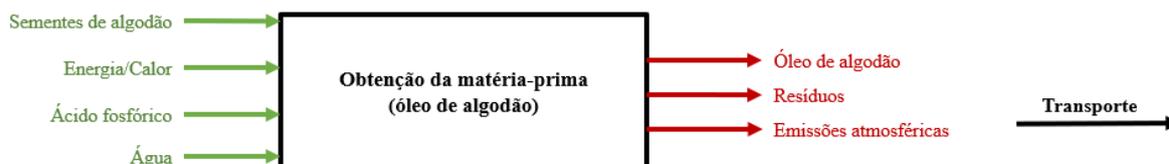


Tabela 43 - ICV da obtenção de 1kg de óleo bruto de algodão

Entradas	Unidade	Quantidade
Recursos do solo	kg	1,0398E-03
Recurso do ar	kg	2,3805E+00
Energia	kWh	1,5352E-01
Calor	MJ	3,1408E-01
Tanque de óleo	Item(s)	1,0101E-09
Ácido fosfórico, grau industrial, sem água,	kg	9,3405E-04
Água	kg	1,4085E-03
Extração das sementes de algodão	kg	5,0000E+00
Saídas	Unidade	Quantidade
Óleo de algodão	kg	1,0000E+00
Resíduos biológicos	kg	1,5000E+00
Emissões atmosféricas	kg	2,3989E+00
Efluente do óleo vegetal	kg	1,1972E-06
Água	m ³	2,1128E-07

Fonte: Ecoinvent® (Levova, 2012).

Os inventários da cal (Tabela 44) e da zeólita (Tabela 45) utilizaram as informações obtidas no baco de dados do Ecoinvent®, que considera as entradas e saídas desde a atividade de extração até a disponibilização em embalagens desses materiais em centros de distribuição.

Nas emissões atmosféricas, emissões para a água e emissões para o solo no processo de obtenção da zeólita foram quantificados os mesmos fluxos do processo de obtenção dos agregados graúdos.

As entradas e saídas do processo elementar de obtenção da cal e da zeólita estão descritas na Figura 76 e Figura 77, respectivamente.

Figura 76- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (cal)

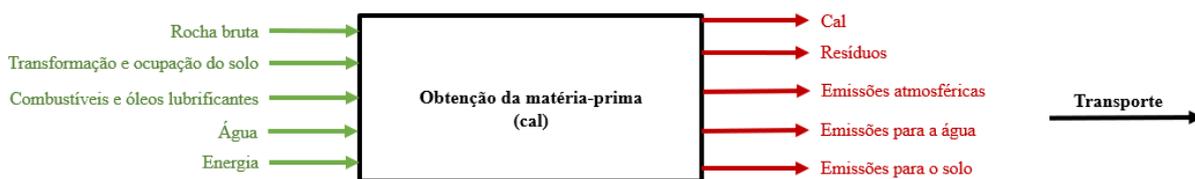


Tabela 44 - ICV da obtenção de 1kg de cal hidratada

Entradas	Unidade	Quantidade
Calor	MJ	1,4100E-03
Cal, hidratada	kg	1,0000E+00
Saída	Unidade	Quantidade
Cal embalada	kg	1,0000E+00
Emissões (atmosféricas, para o ar, para o solo)	kg	4,03E+00

Fonte: Ecoinvent®

Figura 77- DFV do processo elementar de obtenção da matéria prima (zeólita)

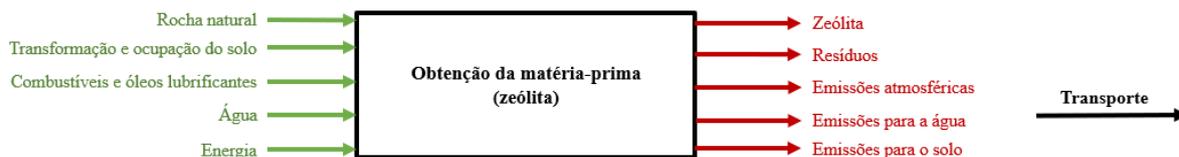


Tabela 45 - ICV da obtenção de 1kg de zeólita

Entradas	Unidades	Quantidade
Desmonte por explosão	kg	3,7000E-04
Edificações	m2	4,1600E-09
Correia transportadora	m	3,9000E-09
Diesel, queimado na máquina de construção	MJ	2,8216E-02
Eletricidade	kWh	3,0000E-03
Máquinas industriais	kg	6,0000E-06
Óleo lubrificante	kg	8,6000E-06
Ocupação do solo	m2*a	2,4992E-04
Aço	m2*a	2,4000E-04
Borracha sintética	kg	3,2000E-05
Transformação do solo	m2	6,1400E-06
Água	m2	2,9472E-06
Zeólita	kg	3,0000E-02
Saídas	kg	1,1000E+00
Zeólita	Unidades	Quantidade

Resíduos de óleo mineral, para mercado de óleo residual	kg	8,0000E-08
Resíduos de borracha, para mercado de resíduos	kg	8,5600E-06
Sucata de aço, para tratamento em aterros de materiais inertes	kg	8,9100E-06
Água	kg	3,1600E-05
Emissões atmosféricas	kg	1,9748E-03
Emissões para a água	kg	1,6026E-05
Emissões para o solo	kg	3,0070E-07

b) Transporte

O inventário do transporte de materiais (Tabela 46) incluiu uma adaptação de “transporte, frete, caminhão 16-32 tonelada métrica, EURO1” na África do Sul, conforme disponível na versão 3.6 do banco de dados Ecoinvent® para refletir a situação no Brasil. Representa o serviço de transporte de carga de 1 tkm em um caminhão da classe de tamanho 16-32 toneladas métricas de peso bruto e classe de emissões Euro 1.

Este inventário foi utilizado para contabilizar os impactos do transporte de matéria-prima até a usina, da mistura asfáltica até o canteiro de obras, e do RAP até a usina para a sua reciclagem (no ACV das alternativas de misturas recicladas) ou até o aterro sanitário (no ACV da alternativa de referência).

As entradas e saídas do processo elementar de transporte estão descritas na Figura 78.

Figura 78 - DFV do processo elementar de transporte



Tabela 46 - ICV do serviço de transporte de 1tkm

Entradas	Unidade	Quantidade
Diesel	kg	3,1574E-02
Biodiesel	kg	4,3056E-03
Caminhão, 16 toneladas	Item(s)	2,3879E-07
Manutenção	Item(s)	2,3879E-07
Entradas	Unidade	Quantidade
Transporte	tkm	1,0000E+00
Emissões atmosféricas	kg	1,1285E-01

Fonte: Ecoinvent®

b) Produção

O inventário dessa atividade da fronteira do ACV considerou os seguintes subprocessos:

- Usina: inventariada conforme estudo de Vidal et al. (2013). Esses autores consideraram uma usina com vida útil de 50 anos, produção média anual de cerca de 114.000 toneladas e layout subdividido em duas diferentes tecnologias: usinagem gravimétrica (por batelada) e usinagem de mistura contínua. A usinagem de mistura contínua cobriria 64,3% da produção total de mistura asfáltica, enquanto a usinagem gravimétrica cobriria os 35,7% restantes. O inventário de 1 unidade da usina asfalto (layout contínua+gravimétrica) está mostrado na Tabela 47.

Tabela 47 - ICV de 1 usina de asfalto contínua+batelada

Entradas	Unidade	Quantidade
Edificações	m2	1,8700E+03
Edificações	m3	3,0700E+03
Correia transportadora	m	1,5000E+02
Máquinas industriais	kg	4,1000E+05
Ocupação do solo	m2*a	1,4950E+06
Transformação do solo	m2	2,9880E+04
Saída	Unidade	Quantidade
Usina de asfalto contínua+batelada	Item(s)	1,0000E+00

Fonte: Vidal et al. (2013)

- Atividades de produção da mistura: inventariadas conforme estudo de Vidal et al (2013), que considerou o peneiramento, secagem, mistura e armazenamento como as principais atividades necessárias para a confecção de misturas asfálticas numa usina. O inventário da produção de 1kg de mistura asfáltica está mostrado na Tabela 48.

As entradas e saídas do processo elementar de produção da mistura asfáltica estão descritas na Figura 79.

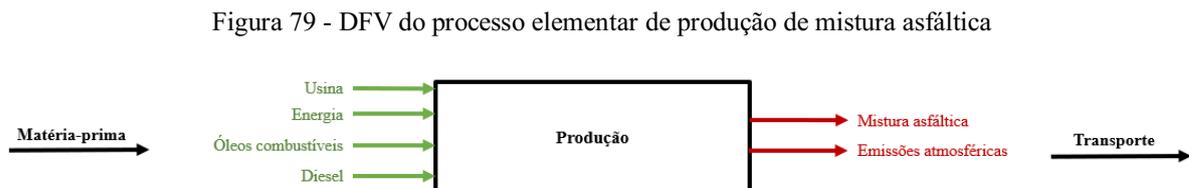


Tabela 48 - ICV da produção de 1kg de mistura asfáltica

Entrada	Unidade	Quantidade
Diesel	MJ	5,1800E-03
Eletricidade	kWh	3,2800E-03
Óleo combustível	kg	6,9790E-03
Usina de asfalto (contínua+ gravimétrica)	Item(s)	1,7500E-10
Saída	Unidade	Quantidade
Produção de mistura asfáltica	kg	1,0000E+00
Dióxido de carbono	kg	1,7700E-02
Monóxido de carbono	kg	2,1700E-03
Oxido Nítrico	kg	8,7000E-05
NMVOG	kg	1,5400E-05
Partículas (PM2.5)	kg	1,9900E-05
Dióxido de enxofre	kg	1,2400E-05
desperdício de calor	MJ	1,1800E-02

Fonte: Vidal et al. (2013)

c) Construção

Esse estudo focou apenas nos processos de pavimentação asfáltica dentre os necessários para a construção de uma rodovia. Os impactos ambientais associados à fase de construção e consideradas no inventário foram as decorrentes do consumo de combustível e emissões atmosféricas das máquinas de pavimentação, emissões atmosféricas e lixiviados do pavimento asfáltico e transformação do solo (VIDAL et al, 2013). Os respectivos inventários estão mostrados na Tabela 50, Tabela 51 e Tabela 52.

O conjunto de maquinários de pavimentação considerado é composto de um rolo compactador de pneus autopropelido de 85 kW, um rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 82 kW e uma vibroacabadora de asfalto sobre esteiras 82 kW.

O consumo de combustível e as emissões atmosféricas das máquinas de pavimentação foram inventariados em função do consumo de energia (CE, em kWh), calculado por meio da Equação 28:

$$CE = \left(\frac{P}{FR}\right) \left(\frac{L}{v}\right) \left(\frac{W}{W_E}\right) (N) \quad \text{Eq. 28}$$

Onde:

P: potência da máquina (kW)

FR: fator de redução de potência

L: comprimento do trecho (km)

v: velocidade da máquina (km/h)

W: largura da pista (m)

W_E : largura efetiva (m)

N: número de passadas

As entradas e saídas do processo elementar de construção do revestimento do pavimento estão descritas na Figura 80.

Figura 80 - DFV do processo elementar de construção do pavimento (revestimento)

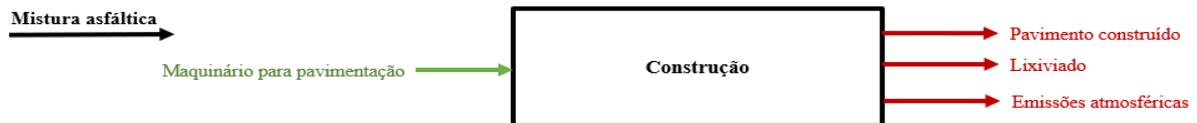


Tabela 49 - ICV do conjunto para maquinários de pavimentação de 1km

Entradas	Unidade	Quantidade
Diesel	g	2,6000E+02
Saídas	Unidade	Quantidade
Conjunto de maquinário para a pavimentação	kWh	1,0000E+00
Emissões atmosféricas	g	1,6287E+01

Fonte: Vidal et al. (2013)

Tabela 50 - ICV das emissões atmosféricas para 1kg de pavimento construído

Alternativas de pavimento		REF	Pavimento com 15% de RAP	Pavimento com 25% de RAP	Pavimento com 33% de RAP
Saídas	Unid.	Quant.	Quant.	Quant.	Quant.
PAH, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	g	7,1500E-10	1,7600E-09	3,3800E-09	4,0300E-09
VOC, compostos orgânicos voláteis	mg	9,3000E-02	1,4700E-01	1,4200E-01	1,5900E-01

Fonte: Vidal et al. (2013)

Tabela 51 - ICV dos lixiviados para 1kg de pavimento construído

		REF	Pavimento com 15% de RAP	Pavimento com 25% de RAP	Pavimento com 33% de RAP
Saídas	Unid.	Quant.	Quant.	Quant.	Quant.
Lixiviados	g	1,0000E+00	1,0000E+00	1,0000E+00	1,0000E+00
Cádmio	mg	0,0000E+00	7,5500E-07	4,7200E-07	4,7200E-07
Cloro	g	0,0000E+00	4,2400E-01	3,7700E-01	3,7700E-01
Cromo	g	0,0000E+00	2,3600E-06	3,7700E-06	3,7700E-06
Cobre	g	0,0000E+00	9,4300E-06	9,9000E-06	9,9000E-06
Fluoranteno	g	0,0000E+00	1,6500E-08	1,6500E-08	1,6500E-08
Hidrocarbonetos	kg	1,0000E+00	5,6600E-05	6,1300E-05	6,1300E-05
Níquel	g	0,0000E+00	5,1900E-06	5,1900E-06	5,1900E-06
Sulfato	mg	0,0000E+00	7,0700E-01	0,0000E+00	0,0000E+00
Zinco	g	4,1800E+01	1,1800E-04	1,4900E-04	1,4900E-04

Fonte: Vidal et al. (2013)

d) Uso

Para contabilizar esse ônus, as seguintes questões foram inventariadas: a área transformada e a natureza da transformação (Tabela 52) e o fluxo de veículos ao longo da vida útil do projeto (Tabela 53)

Segundo Vidal, et al. (2013) o solo transformado pode ser determinado como o espaço ocupado pela nova infraestrutura viária. A natureza da transformação leva em consideração a diminuição da qualidade do terreno transformado, comparando os tipos de uso do solo antes e depois da construção.

O uso do solo é classificado como área de tráfego após a conclusão da construção da estrada, enquanto o tipo de uso inicial do solo depende do local onde a estrada é construída.

Quatro tipos de uso inicial do solo com diferentes qualidades do solo foram considerados: floresta, agricultura, terra arável e pastagem.

Quanto ao tráfego, dois tipos de veículos foram considerados na modelagem: um veículo médio leve (90% da frota) e um veículo médio pesado (10% da frota). Os dados de entradas e saídas para a operação de um veículo.km foram baseados no estudo de Vidal, et al. (2013).

As entradas e saídas do processo elementar de uso do pavimento estão descritas na Figura 81.

Figura 81 - DFV do processo elementar de uso do pavimento



Tabela 52 - ICV do uso do solo (m² de pavimento/ano)

Entradas	Unidade	Quantidade
Agricultura	m ² *a	2,5000E-01
Arável	m ² *a	2,5000E-01
Floresta	m ² *a	2,5000E-01
Pastagem	m ² *a	2,5000E-01
Saídas	Unidade	Quantidade
Ocupação, área de tráfego	m ² *a	1,0000E+00
Área de tráfego	m ² *a	1,0000E+00
Transformação, área de tráfego	m ²	1,0000E+00
Uso do solo pelo pavimento (por ano)	m ² *a	1,0000E+00

Fonte: Adaptado de Vidal et al. (2013)

Tabela 53 - ICVI da operação de um veículo.kilômetro

Entradas	Unidade	veículo leve	veículo pesado
		Quantidade	Quantidade
Diesel	g	3,0300E+01	1,4500E-05
Gasolina	g	3,2300E+01	1,8000E+02
Saídas	Unidade	Quantidade	Quantidade
Veículo leve. km	Items*km	1,0000E+00	1,0000E+00
Amônia	mg	2,4800E+01	3,0000E+00
Cádmio	mg	1,0000E-02	1,0000E-02
Dióxido de carbono	kg	1,9800E-01	5,9800E-01
Monóxido de carbono	g	2,4700E+00	1,1700E+00
Cromo	mg	5,0000E-02	5,0000E-02
Cobre	mg	1,7000E+00	1,7000E+00
Dioxinas (não especificadas)	g	5,7500E-12	3,0000E-12
Fluoranteno	g	1,1800E-11	7,9000E-12
Metano	mg	1,1700E+01	4,5200E+01
Níquel	mg	7,0000E-02	7,0000E-02
Óxido nítrico	mg	1,3500E+00	5,9000E+00
óxido nitroso	g	4,3500E+00	1,3100E+01
NMVOG	g	1,9000E-01	2,2100E-01

PAH, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	g	6,3900E-08	2,4200E-10
Particulados (PM2.5)	g	5,2000E-02	1,7500E-01
Selenio	mg	1,0000E-02	1,0000E-02
Zinco	mg	1,0000E+00	1,0000E+00

Fonte: Adaptado de Vidal et al. (2013)

e) Fim da vida útil

Os impactos ambientais associadas ao fim da vida útil dos projetos inseridas no inventário foram as decorrentes do consumo de combustível e emissões atmosféricas da fresadora, do transporte do RAP para a usina (no ACV das alternativas recicladas) e da consideração do RAP como um resíduo sólido a ser levado para aterro sanitário (no ACV das alternativas de referência).

Nesse estudo, considerou-se o uso de uma fresadora de 410 kW de potência, sendo o seu consumo de combustível e suas emissões atmosféricas também inventariados em função do consumo de energia (CE, em kWh). Considerou-se ainda uma geração de RAP destinado para reciclagem e para aterro na ordem de 70% do volume do pavimento construído no final da sua vida útil.

Após fresagem, na ACV das alternativas recicladas o RAP entra novamente na cadeia produtiva, e o inventário desse material foi composto pelas entradas e saídas decorrentes da fresagem e do transporte até a usina.

Após fresagem, na ACV da alternativa REF o RAP é levado para aterro sanitário, e o inventário desse material foi composto pelas entradas e saídas decorrentes da fresagem e do transporte até o aterro e da ocupação do solo e emissões decorrentes da sua disposição em aterro de material inerte, representado pelos fluxos “Volume ocupado por resíduos de baixa atividade” e “Resíduos em aterro inerte” do Ecoinvent®.

As entradas e saídas do processo elementar de fim de vida útil do pavimento das alternativas recicladas e de referência estão mostradas nas Figura 82 e Figura 83, respectivamente.

Figura 82 - DFV do processo elementar de fim da vida do pavimento (alternativas recicladas)



Figura 83 - DFV do processo elementar de fim da vida do pavimento (alternativa de referência)

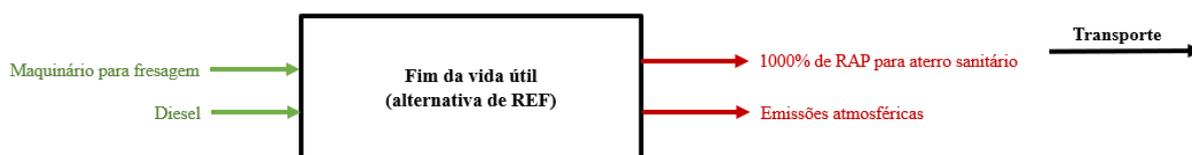


Tabela 54 - ICV do maquinário para a fresagem

Entradas	Unidade	Quantidade
Diesel	g	2,5400E+02
Maquinário para a fresagem	kWh	1,0000E+00
Entradas	Unidade	Quantidade
Emissões atmosféricas	g	1,6127E+01

Fonte: Adaptado de Vidal et al. (2013)

4.2.2.5 Impactos na qualidade dos ecossistemas, na saúde humana e na disponibilidade de recursos

As Figuras 84, 85 e 86 a seguir apresentam os resultados dos danos à qualidade dos ecossistemas (QE) à saúde humana (SH) e à disponibilidade de recursos (R), conforme abordagem *endpoint* utilizada.

Para todas essas três categorias de impacto ambiental (*endpoints*) observa-se que a alternativa de mistura asfáltica composta por materiais totalmente virgens (REF) foi a que ocasionou o maior impacto ambiental.

a) Qualidade dos ecossistemas

Na avaliação da qualidade do ecossistema (Figura 84) parte-se do pressuposto de que a qualidade dos ecossistemas é representada pela biodiversidade e nesse caso é tão melhor, quanto maior for a diversidade de espécies. Com base nesse raciocínio, o resultado da modelagem no nível *endpoint* para essa categoria representa a perda de espécies durante um determinado período de tempo (ano) em uma determinada área, apoiada por indicadores *endpoint*.

Em comparação com a REF, o conjunto de alternativas produzidas com RAP e com óleo de algodão e o conjunto de alternativas produzidas com RAP e zeólita proporcionaram uma redução nos danos ao ecossistema na ordem de 65,63% e 69,47%, respectivamente.

Resultado similar foi encontrado por Farina et al. (2017) num comparativo entre uma mistura asfáltica densa padrão, uma mistura gap-grade contendo asfalto borracha e uma mistura gap-grade contendo asfalto borracha e 10% de RAP. Os autores observaram a alternativa de mistura contendo RAP proporcionou uma redução nos danos ambientais na categoria de qualidade dos ecossistemas.

A Tabela 55 mostra os p-valores resultantes do teste t de *Student* realizado entre as alternativas analisadas para o dano ambiental sobre a QE. Percebe-se que não houve diferença significativa entre as alternativas com óleo de algodão e entre as alternativas com zeólita, pois todos os p-valores foram maiores do que a significância de 5%.

Portanto, pode-se inferir que as misturas recicladas promovem uma considerável redução do ônus ambiental em termos de impacto aos ecossistemas, entretanto, a modificação da composição dessas misturas por meio da variação de percentuais de RAP e da introdução de diferentes aditivos, em teores também variados, não ocasionou alterações significativas nos efeitos líquidos desse tipo de impacto ambiental.

Figura 84 - Avaliação de impacto ambiental final - Dano à qualidade dos ecossistemas

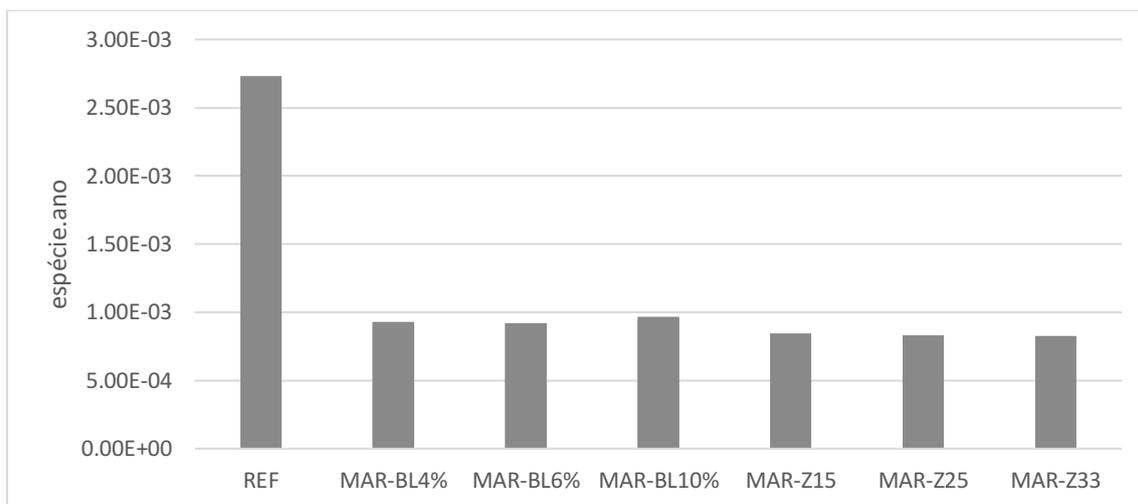


Tabela 55 - Comparativo do dano à QE entre as MAR

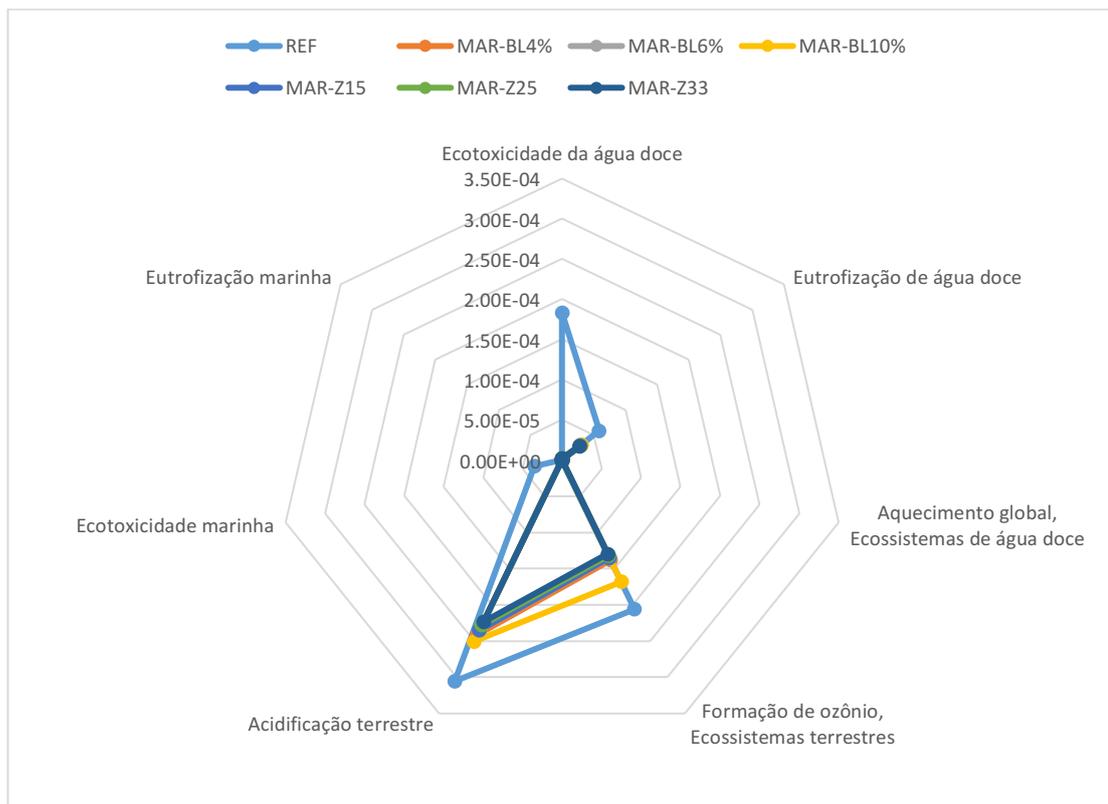
Misturas asfálticas comparadas	p-valor
MAR-BL4% - MAR-BL6%	0,9883
MAR-BL4% - MAR-BL10%	0,9769
MAR-BL6% - MAR-BL10%	0,9652
MAR-Z15 - MAR-Z25	0,9862
MAR-Z15 - MAR-Z33	0,9760
MAR-Z25 - MAR-Z33	0,9897

De acordo com os valores individuais dos indicadores *endpoints* que compõem os danos ambientais à categoria de danos ambientais à QE, o aquecimento global terrestre foi o que mais contribuiu para o dano aos ecossistemas, em todas as alternativas avaliadas. Este indicador teve participação de 71,13%, 55,63%, 56,25%, 53,41%, 52,53%, 53,15%, 53,54%. nas alternativas REF, MAR-BL4%, MAR-BL6%, MAR-BL10%, MAR-Z15, MAR-Z25 e MAR-Z33, respectivamente.

Apesar de ser o indicador que mais impacta essa categoria, percebe-se uma redução no seu valor nas alternativas recicladas. Tais benefícios ambientais derivam do dano evitado pela prática da reciclagem, corroborando também com o estudo de Farina et al (2017) e Hasan et al. (2022). Hasan et al. (2022) identificaram que o uso de 10% de RAP na camada de base, na camada de ligação e na camada de revestimento diminui o potencial de aquecimento global em 3%.

O gráfico da Figura 85 mostra a contribuição de cada indicador *endpoint* na categoria de dano ambiental à qualidade dos ecossistemas. Por representar mais da metade da contribuição nessa categoria de impacto, para todas as alternativas estudadas, o aquecimento global no ecossistema terrestre foi excluído do gráfico para evitar mascarar a participação de outros indicadores de valores menores, mas que variaram de uma alternativa para outra.

Figura 85 - Indicadores *endpoints* do dano ambiental à QE (espécie.ano)



Por meio do gráfico da Figura 85 nota-se que, além do aquecimento global terrestre, outros três indicadores *endpoint* de destaque no dano à QE promovido por todas as alternativas são a acidificação terrestre, a formação de ozônio e a ecotoxicidade da água doce. Constatou-se ainda que esses indicadores apresentaram maior expressividade na alternativa REF e valores menores nas alternativas recicladas. Para esses indicadores, não houve diferença significativa entre as alternativas recicladas, comprovada pela sobreposição das curvas referentes a cada uma delas.

Os valores de acidificação representam uma elevada deposição atmosférica de substâncias inorgânicas, como sulfatos, nitratos e fosfatos, capazes de provocar uma alteração na acidez do solo e, conseqüentemente, mudanças na ocorrência de determinadas espécies de plantas.

As principais emissões acidificantes inventariadas foram NO_x, NH₃ ou SO₂, que possuem um primeiro destino para a atmosfera antes de serem depositadas no solo. Posteriormente, por meio da lixiviação, essas substâncias alteram a concentração de H⁺ do solo, modificando a sua acidez, afetando assim a sobrevivência das espécies vegetais.

A formação do ozônio pode ter um impacto negativo na vegetação, incluindo redução do crescimento e produção de sementes, aceleração da senescência foliar e redução da capacidade de resistir a estressores (ASHMORE 2005 e GEROSA et al. 2015).

O ozônio não é emitido diretamente para a atmosfera, mas depende das condições meteorológicas sendo formado como resultado de reações fotoquímicas de NO_x e Compostos Orgânicos Voláteis Não Metano (NMVOCs), que se intensifica no verão.

Por meio da análise do quantitativo dessas substâncias, para cada alternativa avaliada constatou-se que o tráfego de veículos leves, as atividades de explosão de rochas para a obtenção de agregados, a produção de combustíveis e a disposição final de resíduos de pavimento em aterros (considerada no ACV da REF) são os principais causadores dos elevados valores de acidificação do solo e de formação do ozônio.

Sobre a ecotoxicidade da água doce, que compreende um importante habitat ambiental para diversas espécies animais e vegetais e também é essencial para a vida humana, por meio da análise das cargas ambientais decorrentes das alternativas de misturas asfálticas avaliadas nesse estudo, verificou-se que a geração de resíduos sólidos é a prática de maior impacto no valor deste indicador. Como esse processo está incluído somente na ACV da alternativa de referência, essa observação justifica o maior valor do dano ao ecossistema promovido por esse indicador para essa alternativa.

O processo elementar da produção e uso de energia elétrica e combustíveis resultou numa maior contribuição da ecotoxicidade no impacto geral dos ecossistemas, verificada no ACV de todas as alternativas de misturas asfálticas recicladas. Isso tem relação com a poluição causada pela atividade das hidrelétricas e das refinarias.

A respeito do aquecimento global, indicador de maior impacto na categoria, os maiores danos foram oriundos das atividades de disposição de resíduos em aterros ($1,32 \cdot 10^{-3}$ espécie.ano), produção e uso de combustíveis ($1,02 \cdot 10^{-4}$ espécie.ano) e de eletricidade ($4,611,32 \cdot 10^{-5}$ espécie.ano) e produção da cal ($1,13 \cdot 10^{-5}$ espécie.ano).

Quanto às alternativas com óleo de algodão e às alternativas com zeólita, os processos de produção e uso de combustíveis ($1,48 \cdot 10^{-4}$ espécie.ano e $1,42 \cdot 10^{-4}$ espécie.ano) e de eletricidade ($4,84 \cdot 10^{-5}$ espécie.ano e $4,47 \cdot 10^{-5}$ espécie.ano) e da produção da cal ($1,18 \cdot 10^{-5}$ espécie.ano e $1,02 \cdot 10^{-5}$ espécie.ano) se destacaram no quantitativo do dano proporcionado pelo aquecimento global sobre os ecossistemas terrestres.

Os resultados da contribuição total do aquecimento global terrestre particionada nas diferentes fases do ciclo de vida de todas as alternativas estão mostrados na Figura 86. A fase de fim de vida foi a mais impactada por esse indicador na avaliação da alternativa de referência. Para evitar a camuflagem das outras fases do ciclo de vida, decidiu-se por excluir a fase de fim da vida do gráfico.

Dentre as fases apresentadas no gráfico, o “uso” é a de maior impacto para todas as alternativas avaliadas. Este resultado foi esperado, uma vez que o impacto desta etapa inclui o consumo de combustíveis e às emissões atmosféricas do tráfego de milhares de veículos ao longo de toda a sua vida útil. Como as condições de tráfego foram iguais para todos os casos estudados, o valor do indicador de aquecimento global terrestre para esta fase foi o mesmo.

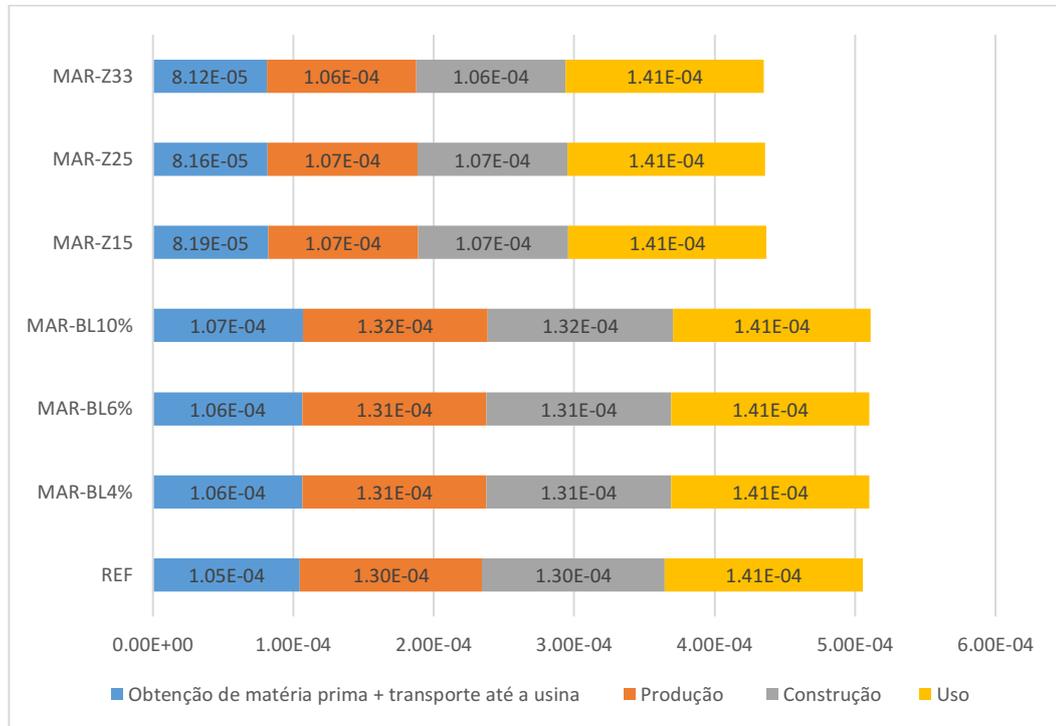
As fases de produção e construção apresentaram valores de contribuições de aquecimento global terrestre iguais. As alternativas de misturas recicladas com zeólita apresentaram valores mais baixos em comparação com a REF devido a inclusão do RAP e do aditivo em substituição a uma parcela da cal usada como filler.

Yang et al. (2015) e Pratico et al. (2020) também identificaram que dentre os principais contribuintes para o aquecimento global, estão as operações da usina na fase de produção das misturas asfálticas.

Mesmo com a adição de RAP, as alternativas de misturas recicladas com óleo de algodão apresentaram valores semelhantes à REF devido às emissões atmosféricas resultantes

do processo de obtenção do óleo. A similaridade com a REF observada na fase de obtenção e transporte de matéria-prima corrobora com essa afirmativa.

Figura 86 - Aquecimento Global (espécie.ano) – Contribuição de cada processo



No nível de avaliação de impacto *midpoint*, quanto ao aquecimento global, as emissões de CO₂eq estão apresentadas na Tabela 56. O CO₂eq é uma medida internacionalmente aceita que expressa a quantidade de gases do efeito estufa (GEE) em termos equivalentes da quantidade de CO₂. A equivalência leva em conta o potencial de aquecimento global dos gases envolvidos e calcula quanto de CO₂ seria emitido se todos os GEEs fossem emitidos como esse gás, medidos em um período de tempo especificado (geralmente cem anos).

Por meio de um comparativo da contribuição de cada processo do ACV, constatou-se que a redução das emissões de GEEs das misturas recicladas, em comparação com a de referência, é decorrente da prática do reaproveitamento do RAP, pois o processo que mais impactou no aumento de emissões desses gases na análise da alternativa REF foi a disposição dos resíduos do pavimento em aterros.

As variações nas emissões de GEEs das misturas com óleo de algodão foram devidas a redução do uso de combustíveis e eletricidade. Essa redução possivelmente está relacionada

ao processo de obtenção do óleo de algodão, pois os menores valores estão atrelados às alternativas de menores teores de óleo.

Por meio de um comparativo entre as alternativas de misturas recicladas com zeólita e com óleo de algodão, percebe-se uma diminuição das emissões de GEEs destas primeiras devido a redução do uso de combustíveis, de eletricidade e da cal. Esse resultado é justificado pelo fato de o teor de zeólita utilizado nessas misturas ter sido descontado do percentual de fíler (cal).

Tabela 56 - Emissões de CO₂eq

Misturas asfálticas comparadas	kg CO ₂ eq
REF	6,935E+05
MAR-BL4%	1,844E+05
MAR-BL6%	1,844E+05
MAR-BL10%	1,849E+05
MAR-Z15	1,583E+05
MAR-Z25	1,580E+05
MAR-Z33	1,576E+05

b) Qualidade na saúde humana

Para a avaliação do dano ambiental causado à saúde humana (Figura 87) utilizou-se do conceito de anos de vida ajustados por incapacidade (DALY), relatados para uma ampla gama de doenças, incluindo vários tipos de câncer, doenças transmitidas por vetores e doenças não transmissíveis (FRISCHKNECHT et al. 2000; GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 1999; MURRAY e LOPEZ, 1996).

Em comparação com a REF, o conjunto de alternativas produzidas com RAP e com óleo de algodão e o conjunto de alternativas produzidas com RAP e zeólita proporcionaram uma redução de danos nessa categoria na ordem de 76,78% e 78,87%, respectivamente. Farina et al (2017) também identificaram que uma mistura gap-grade contendo asfalto borracha e 10% de RAP promoveu um menor impacto à saúde humana em comparação com uma mistura asfáltica densa padrão.

A Tabela 57 mostra os p-valores resultantes do teste t de *Student* realizado entre as alternativas analisadas, para os valores finais do dano à SH. Percebe-se que não houve

diferença significativa entre as alternativas com óleo de algodão e entre as alternativas com zeólita, pois todos os p-valores foram maiores do que a significância de 5%.

A mesma inferência feita na avaliação do impacto à QE também pode ser aplicada ao impacto causado à SH. A redução de quase 80% dos impactos causados à saúde humana é justificada, predominantemente, pela introdução de RAP nas misturas. Os valores apresentados pelas alternativas de misturas recicladas indicam que a modificação da composição dessas misturas por meio da variação das taxas de reciclagem e da introdução de diferentes aditivos, em teores também variados, não acarretou alterações significativas nos efeitos líquidos do impacto ambiental à SH entre elas.

Esses resultados corroboram com o estudo de Gianini et al (2015) que comparou uma alternativa de mistura asfáltica virgem com duas alternativas combinando o uso da tecnologia WMA e uso de RAP (10-30%) e identificou que os valores dos impactos ambientais à QE e à SH não foram afetados pelo uso de tecnologias mais sustentáveis ambientalmente.

Figura 87 - Avaliação de impacto ambiental final - Dano à saúde humana

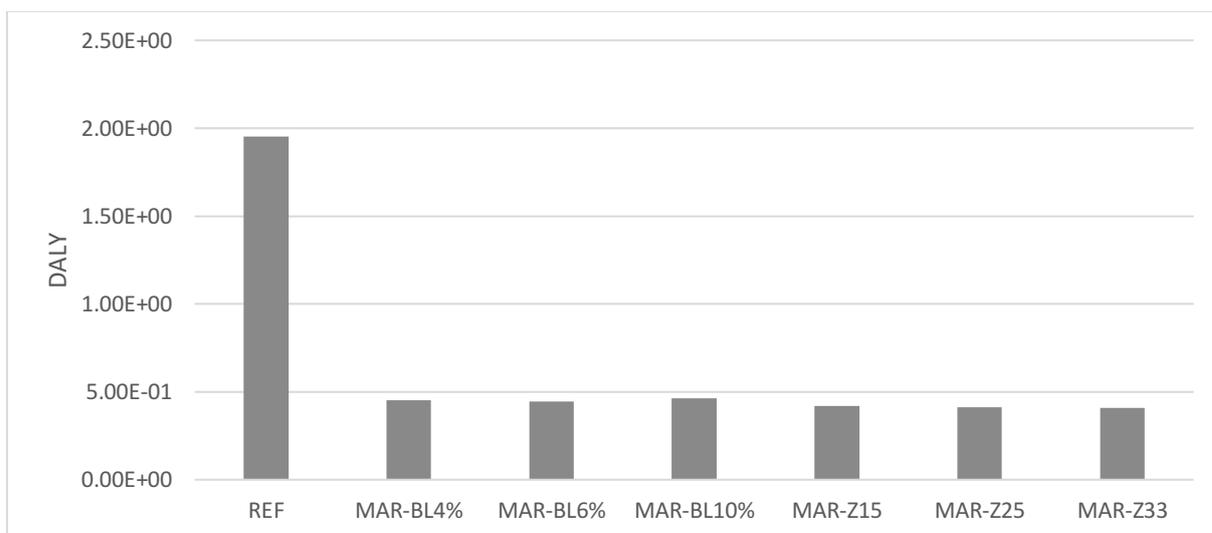


Tabela 57 - Comparativo do dano à QE entre as MAR

Misturas asfálticas comparadas	p-valor
MAR-BL4% - MAR-BL6%	0,9883
MAR-BL4% - MAR-BL10%	0,9769
MAR-BL6% - MAR-BL10%	0,9652
MAR-Z15 - MAR-Z25	0,9862
MAR-Z15 - MAR-Z33	0,9760
MAR-Z25 - MAR-Z33	0,9897

O gráfico da Figura 88 mostra a contribuição de cada indicador *endpoint* na categoria de dano ambiental à saúde humana. Verifica-se que a toxicidade humana não-cancerígena e a formação de partículas finas foram os indicadores que mais contribuíram para essa categoria na ACV das alternativas REF e recicladas, respectivamente. A toxicidade humana não cancerígena teve participação de 37,54% na alternativa de referência e a formação de partículas finas teve participação de 52,04%, 51,43%, 52,87%, 54,46%, 53,89% e 53,51% nas alternativas MAR-BL4%, MAR-BL6%, MAR-BL10%, MAR-Z15, MAR-Z25 e MAR-Z33, respectivamente.

Apesar da formação de material particulado ser um dos indicadores que mais impacta essa categoria na avaliação das alternativas recicladas, percebe-se que o seu valor ainda é menor em cerca de 20 a 30% em comparação com a alternativa REF.

Bressi et al (2019), comparando uma mistura reciclada contendo 40% de RAP com uma mistura asfáltica virgem, também identificou uma redução de impacto na formação de material particulado (6,22%).

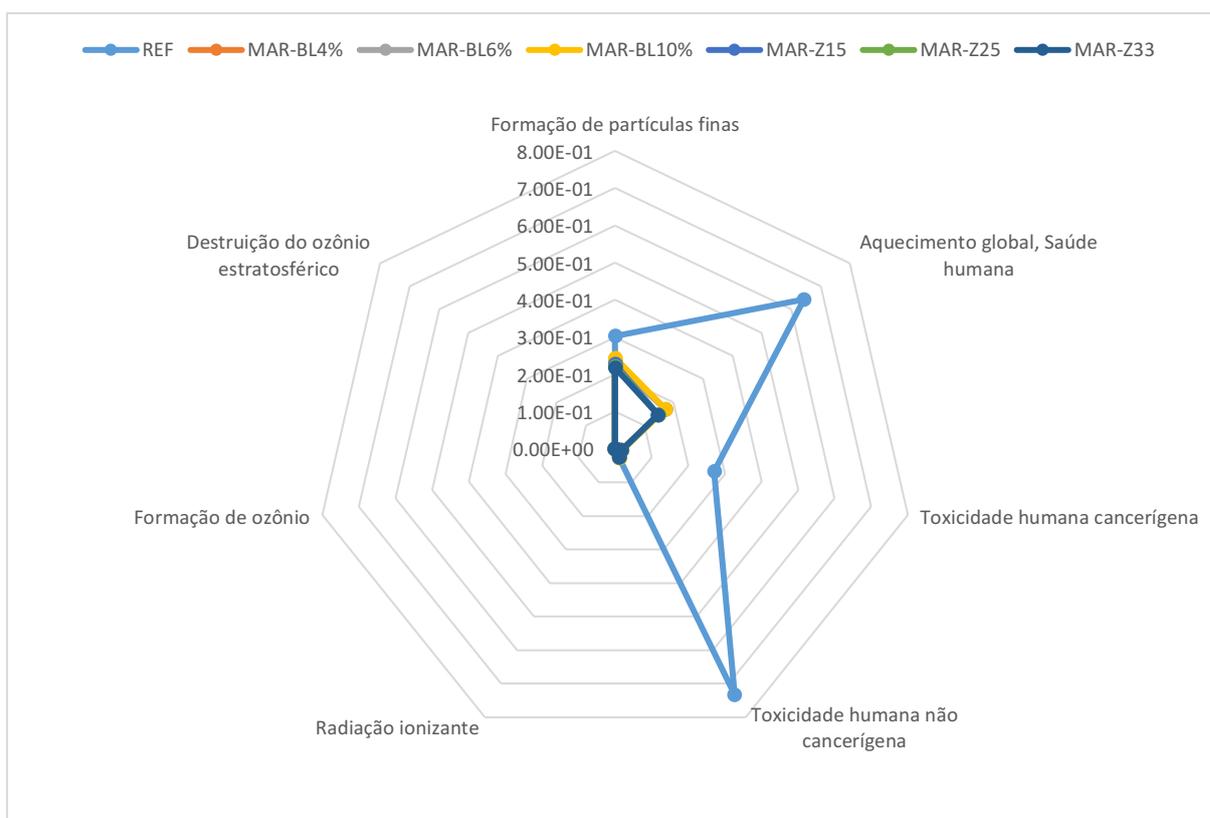
No caso da alternativa de referência, os maiores danos da toxicidade humana não-cancerígena sobre à saúde humana foram oriundos dos processos de disposição de resíduos em aterros (0,70 DALY), produção e uso de eletricidade ($6,68 \cdot 10^{-3}$ DALY), transporte ($4,40 \cdot 10^{-3}$ DALY) e produção e uso de combustíveis ($3,13 \cdot 10^{-3}$ DALY).

Quanto às alternativas com óleo de algodão e às alternativas com zeólita, os processos de produção e uso de eletricidade ($7,0 \cdot 10^{-3}$ DALY e $6,16 \cdot 10^{-3}$ DALY), transporte ($4,75 \cdot 10^{-3}$ DALY e $5,16 \cdot 10^{-3}$ DALY) e a produção e uso de combustíveis ($3,13 \cdot 10^{-3}$, para ambos os conjuntos) se destacaram no quantitativo do dano à saúde proporcionado pela formação de partículas finas.

Por meio do gráfico da Figura 88 nota-se ainda que, além da toxicidade humana não cancerígena e da formação de partículas finas, tem destaque no dano à SH outro indicador *endpoint* da ACV tanto das alternativas de referência como das recicladas: o aquecimento global.

Dentre as misturas recicladas com óleo de algodão, a MAR-BL10% apresentou um maior valor para este indicador, justificado pela maior quantidade de emissões atmosféricas decorrentes da obtenção de um montante maior de óleo necessário para a sua composição. Entretanto, o valor deste indicador para essa mistura reciclada ainda foi inferior ao da REF.

Figura 88 - Indicadores endpoints do dano ambiental à SH (DALY)



c) Disponibilidade de recursos

O risco de que a humanidade fique sem recursos para as gerações futuras é frequentemente citado como uma questão importante. No ambiente de negócios, o esgotamento de recursos e as mudanças na demanda de materiais tendem a impactar nos preços de mercado, o que também pode afetar negativamente a capacidade de manter e expandir a indústria de determinado produto.

Na avaliação da escassez de recursos (Figura 89) o dano ao meio ambiente é expresso em dólar americano por quilo de material extraído. Dentre as três categorias *endpoint* avaliadas, a da disponibilidade de recursos é a que apresentou o maior valor de impacto, e isso reflete o fato de que o consumo de recursos fósseis tem maior influência na avaliação geral dos danos finais. A mesma observação foi feita por Vidal et al. (2013), Giani et al. (2015) e Farina et al. (2017).

Observa-se que o conjunto de alternativas produzidas com RAP e com óleo de algodão e o conjunto de alternativas produzidas com RAP e zeólita proporcionaram uma redução nos impactos à disponibilidade de recursos na ordem de 1,86% e 3,99%, respectivamente. Vidal et al. (2013) também verificou redução similar com a adição de 15%RAP e zeólita.

A Tabela 58 mostra os p-valores resultantes do teste t de Student realizado entre as alternativas analisadas para o dano ambiental sobre a disponibilidade de recursos. Percebe-se que não houve diferença significativa entre as alternativas com óleo de algodão e entre as alternativas com zeólita, pois todos os p-valores foram maiores do que a significância de 5%.

Nas misturas recicladas, a redução do uso de materiais virgens, devido a substituição parcial pelo RAP, permitiu que houvesse um decréscimo do valor inerente a essa categoria. Entretanto, esse decréscimo não foi tão expressivo devido a introdução de aditivos nas misturas, que também contribuíram no montante deste impacto. A tendência de aumento no valor do dano aos recursos das misturas asfálticas recicladas que acompanha o aumento do teor dos aditivos utilizados nessas misturas corrobora com essa afirmação.

Figura 89 - Avaliação de impacto ambiental final - Dano aos recursos

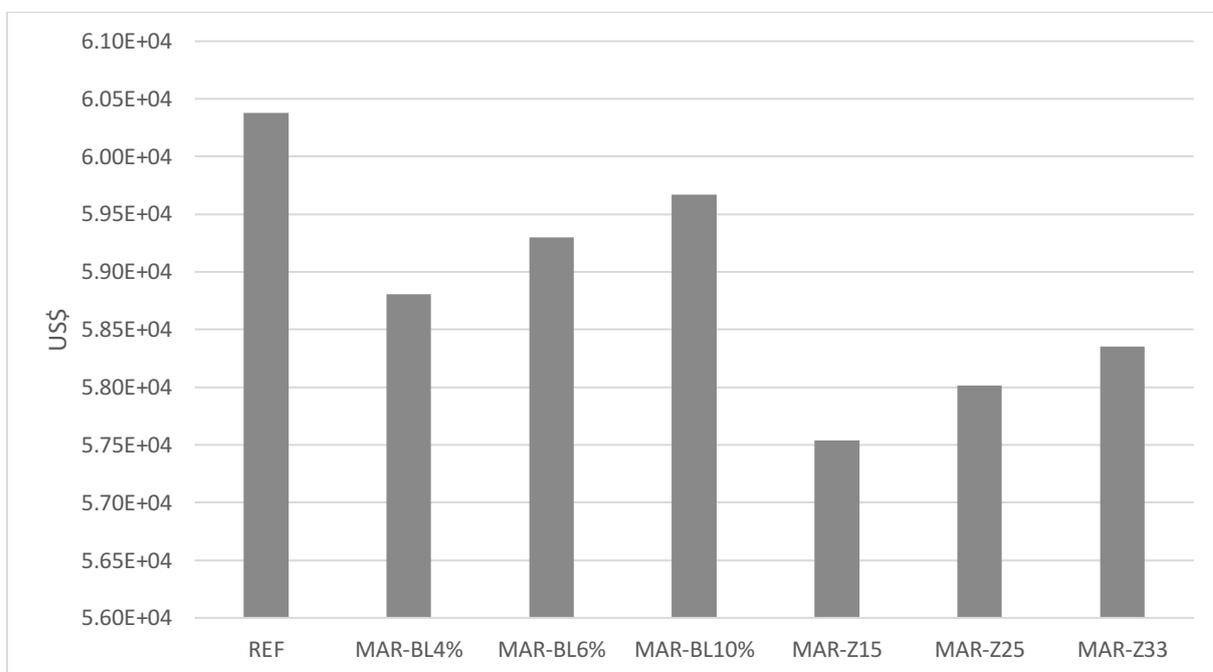


Tabela 58 - Comparativo do dano aos R entre as MAR

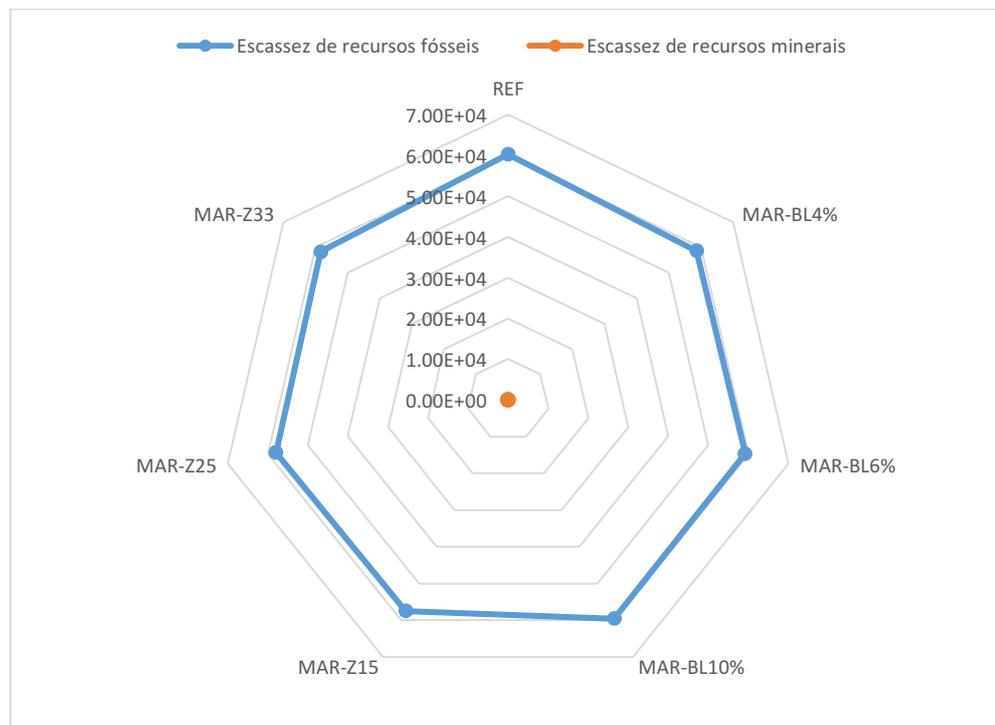
Misturas asfálticas comparadas	p-valor
MAR-BL4% - MAR-BL6%	0,9893
MAR-BL4% - MAR-BL10%	0,9565
MAR-BL6% - MAR-BL10%	0,9459
MAR-Z15 - MAR-Z25	0,9959
MAR-Z15 - MAR-Z33	0,9930
MAR-Z25 - MAR-Z33	0,9971

De acordo com os valores individuais dos indicadores *endpoints* (Figura 90) que compõem os danos ambientais aos recursos, a escassez de recursos fósseis foi o que mais contribuiu para essa categoria, em todas as alternativas avaliadas. Este indicador teve participação de 90,8% e 80,5% nas alternativas REF e misturas recicladas, respectivamente.

No caso da alternativa de referência, os maiores danos de escassez de recursos fósseis foram oriundos dos processos de produção e uso de combustíveis ($4,95 \cdot 10^4$ US\$).

Quanto às alternativas com óleo de algodão e às alternativas com zeólita, verificou-se que também os processos de produção e uso de combustíveis ($4,5 \cdot 10^4$ US\$ e $4,23 \cdot 10^4$ espécie.ano) se destacaram no quantitativo do dano proporcionado pela escassez de recursos fósseis.

Figura 90 - Indicadores *endpoints* do dano ambiental aos recursos (US\$)



4.2.2.6 Comparativo geral dos impactos ambientais

A pontuação única final, após normalização e ponderação dos indicadores, permitiu uma comparação conjunta dos resultados das três categorias de impacto e dos resultados relacionados a cada etapa do ciclo de vida de todas as alternativas de misturas avaliadas.

De acordo com a Figura 91 a categoria que tem maior peso nos impactos de todas as alternativas de misturas avaliadas é a da disponibilidade de recursos. Entretanto, verifica-se

uma redução da pontuação dessa categoria para as alternativas de misturas recicladas em comparação com a de referência. Isso indica que o uso do RAP contribui para a redução do risco de esgotamento de recursos devido a diminuição da demanda de materiais virgens, mesmo havendo a necessidade da introdução de mais um elemento na composição dessas misturas (óleo de algodão ou zeólita).

Quanto as categorias de dano aos ecossistemas e danos à saúde humana, percebe-se que a alternativa de mistura de referência proporciona um maior impacto ao meio ambiente, devido, principalmente, a maior quantidade de gases do efeito estufa emitidos.

Conforme mostrado na Figura 92, para todas as alternativas, as fases do ciclo de vida de maior impacto são as de obtenção da matéria-prima + transporte e fim da vida útil. Vidal et al. (2013) também identificaram que as diferenças mais significativas nos impactos entre as alternativas de pavimentos asfálticos contendo RAP e zeólita foram principalmente atribuíveis a fase de obtenção de materiais e aos estágios de fim de vida.

Giani et al. (2015), comparando um pavimento com materiais virgens com um pavimento em que se combinam o uso da tecnologia WMA e uso de RAP (10%, 20% ou 30%), verificaram que a extração e processamento de materiais foi a etapa com maiores impactos (40% do total) no ciclo de vida e que esse percentual foi menor para a alternativa contendo RAP nas camadas de revestimento (10%), ligação (20%) e base (30%), que implica em menor produção de materiais virgens.

Em comparação com a REF, os impactos da etapa de obtenção de matéria prima + transporte até a usina foram reduzidos em 4,7%, 4,5%, 4,3%, 5,3%, 5,1%, 4,9% para as alternativas MAR-BL4%, MAR-BL6%, MAR-BL10%, MAR-Z15, MAR-Z25 E MAR-Z33.

Da mesma forma, em comparação com a REF, os impactos de fim de vida foram reduzidos em cerca de 4,0 % para todas as misturas avaliadas.

Figura 91 - Normalização dos resultados das três categorias de impacto *endpoint*

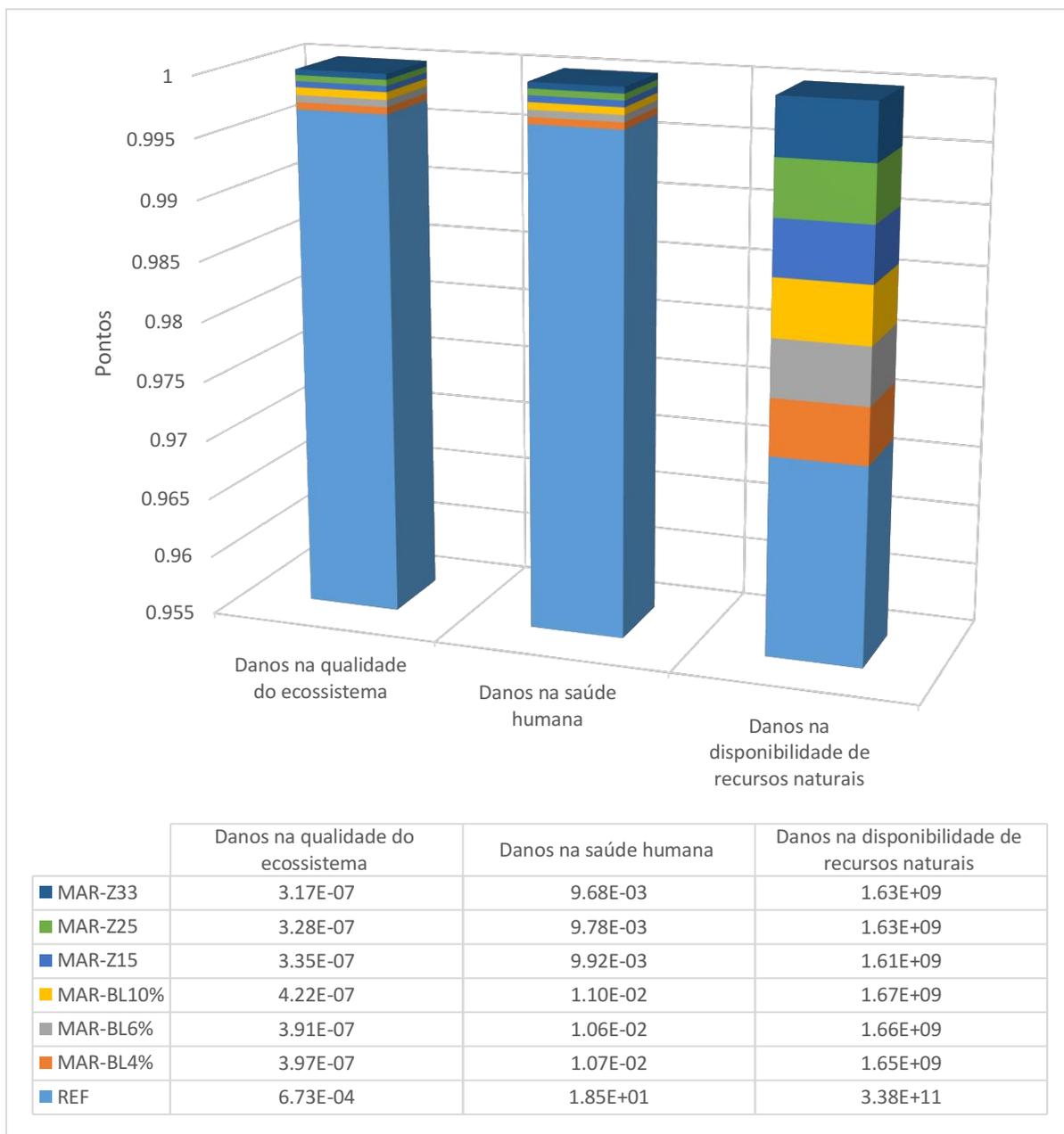
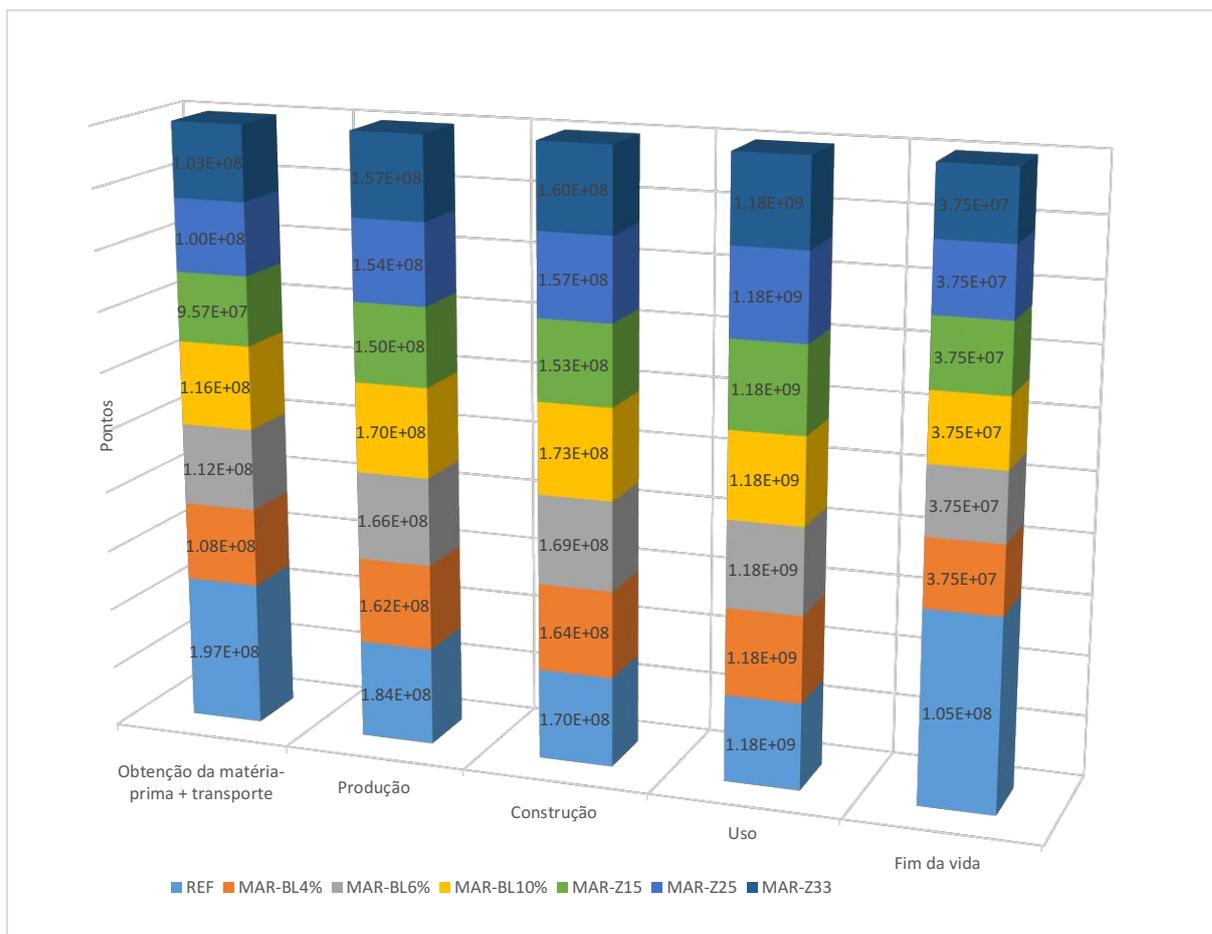


Figura 92 - Normalização dos resultados dos impactos *endpoint* para cada fase do ACV



4.2.3 Avaliação do Custo do Ciclo de Vida das Misturas Asfálticas

Neste item são discutidos os resultados da Avaliação do Custo do Ciclo de Vida das alternativas de pavimentos estudadas.

4.2.3.7 Estimativa dos custos e investimentos iniciais

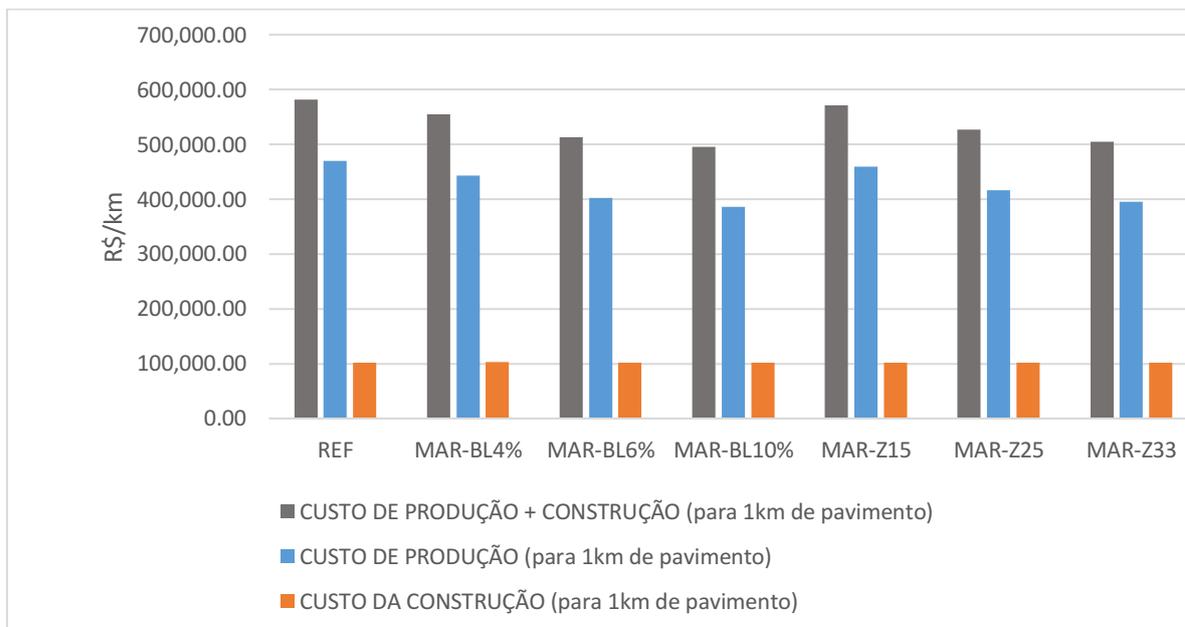
Os Apêndices A e B mostram a composição de custo da fase de produção (usinagem) de uma tonelada das misturas asfálticas de referência e recicladas, respectivamente. Os Apêndices C e D mostram a composição de custo da fase de construção de 1 tonelada de camada de revestimento, incluindo os custos derivados da usinagem utilizando, respectivamente, a mistura asfáltica de referência e as misturas asfálticas recicladas.

O Apêndice E mostra a composição de custo da fase de fim de vida de 1m³ de revestimento, para todas as alternativas de pavimento estudadas, compreendendo as atividades de fresagem e de transporte do RAP.

A Figura 93 apresenta os investimentos para a produção das sete alternativas de misturas asfálticas e para a construção da camada de revestimento, com base na unidade funcional de 1km de rodovia com 7,5cm de espessura. Para todas as alternativas, percebe-se que os maiores custos estão associados a etapa de produção.

Não houve diferença nos investimentos necessários à etapa de construção, pois os custos horários de equipamentos e de mão de obra, o fator de influência de chuvas, o tempo fixo e o momento de transporte foram os mesmos para todas as alternativas avaliadas.

Figura 93 - Investimentos para a produção e construção de 1km de rodovia



De acordo com os dados apresentados na Figura 93, observa-se que a mistura asfáltica reciclada MAR-BL10% foi a que apresentou uma redução de custo mais expressiva no conjunto produção + construção, em comparação com a mistura asfáltica de referência (redução de 14,78%), seguida da MAR-Z33 (redução de 13,09%) e da MAR-BL6% (redução de 11,85%).

A substituição de agregados virgens por RAP promoveu uma diminuição nos investimentos para a produção da unidade funcional, independentemente do tipo de aditivo utilizado.

Quiao et al. (2019) identificaram que na fase de produção, os investimentos podem reduzir de 15% a 25% quando 40% de RAP é utilizado. Rafiq et al. (2021) comparou os custos de uma mistura asfáltica com taxa de reciclagem de 20% sem a presença de aditivos com os custos de uma mistura asfáltica composta de materiais virgens, concentrando-se principalmente nas fases de usinagem e construção do pavimento, e identificaram que a utilização do RAP proporcionou uma redução de 14% nos investimentos. Tais estudos corroboram com os resultados encontrados nesta pesquisa.

A alternativa MAR-Z15 apresentou um custo semelhante ao da referência, tendo uma redução de apenas 1,75%.

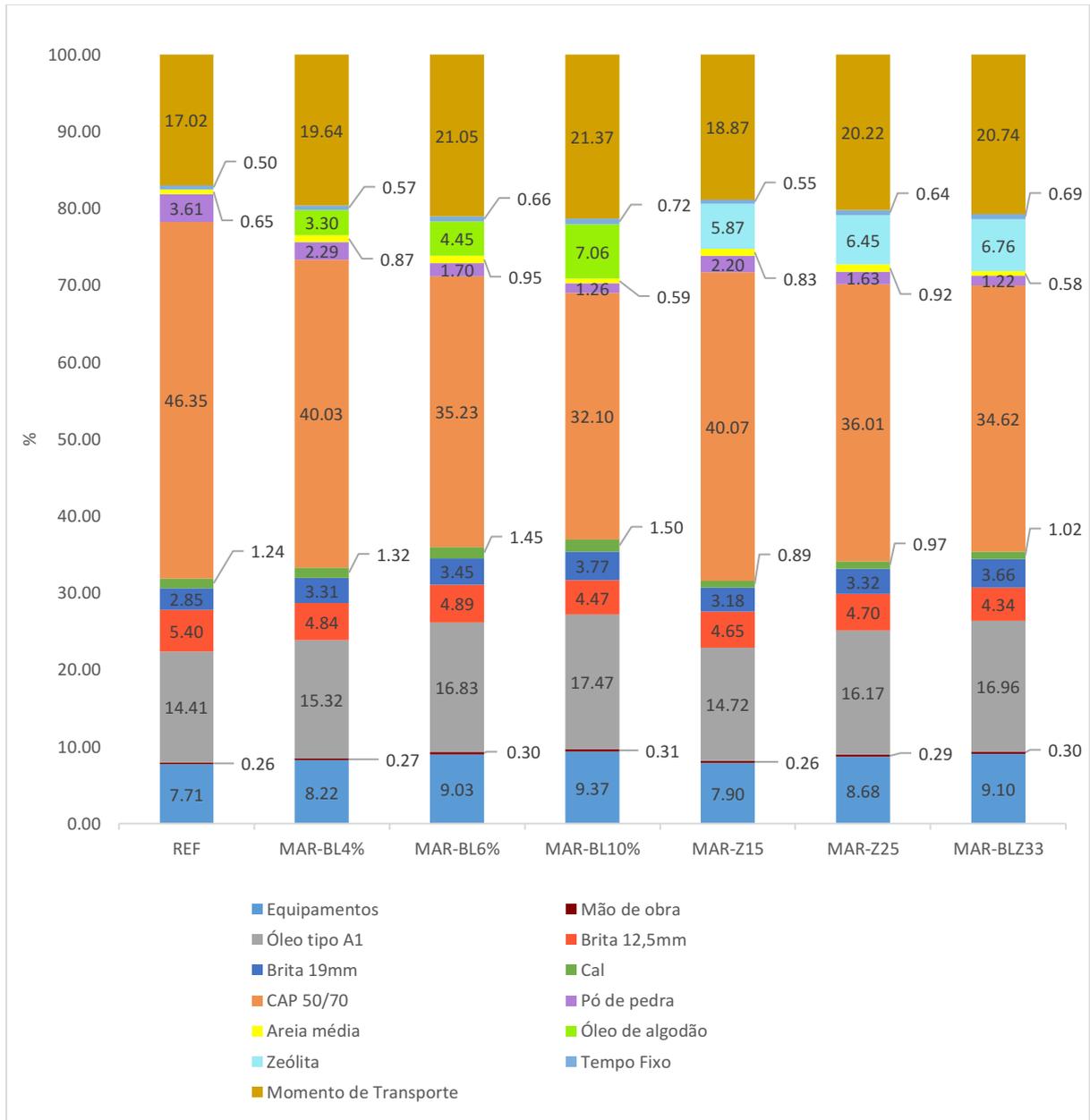
A Tabela 59 e a Figura 94 apresenta a contribuição (em R\$ e em percentual, respectivamente) de cada item considerado nas composições de custo no somatório de investimentos de produção e construção da unidade funcional.

O Quadro 17 mostra o ranking das contribuições dos itens nos investimentos de cada alternativa. As células coloridas ilustram a explicação que será feita adiante sobre o impacto nos custos causado pelo uso de aditivos e pela consequente diminuição do consumo de agregados devido a incorporação de RAP. O RAP não foi inserido nessa análise por apresentar custo zero.

Tabela 59 - Contribuição (R\$) de cada item das composições de custo no somatório investimentos de produção e construção

Itens	REF	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33
Equipamentos	36229,82	36457,27	36312,02	36166,78	36312,02	36166,78	36021,53
Mão de obra	1212,47	1217,32	1212,47	1207,62	1212,47	1207,62	1202,77
Óleo tipo A1	67686,15	67956,89	67686,15	67415,41	67686,15	67415,41	67144,66
Brita 12,5mm	25343,70	21473,16	19656,82	17238,66	21387,61	19578,20	17169,43
Brita 19mm	13397,59	14674,02	13884,78	14557,09	14615,56	13829,24	14498,63
Cal	5826,19	5849,49	5826,19	5802,88	4078,33	4062,02	4045,70
CAP 50/70	217672,46	177524,28	141654,54	123827,16	184184,39	150093,53	137033,18
RAP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pó de pedra	16943,77	10156,15	6828,09	4848,70	10115,68	6800,77	4829,23
Areia média	3066,82	3848,86	3833,53	2290,92	3833,53	3818,19	2281,72
Óleo de algodão	0,00	14646,50	17903,64	27243,37	0,00	0,00	0,00
Zeólita	0,00	0,00	0,00	0,00	26971,88	26863,99	26756,10
Tempo Fixo	2343,18	2546,50	2671,12	2760,22	2536,35	2660,44	2749,13
Momento de Transporte	79924,69	87096,69	84633,94	82434,53	86749,69	84295,40	82103,47

Figura 94 - Contribuição (%) de cada item das composições de custo no somatório de investimentos de produção e construção



Quadro 17 - Ranking das contribuições dos itens nos investimentos

Ranking	REF	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33
1ª	CAP 50/70						
2ª	Momento de Transp.						
3ª	Óleo tipo A1						
4ª	Equipamentos						
5ª	Brita 12,5mm	Brita 12,5mm	Brita 12,5mm	Óleo de algodão	Zeólita	Zeólita	Zeólita
6ª	Pó de pedra	Brita 19mm	Óleo de algodão	Brita 12,5mm	Brita 12,5mm	Brita 12,5mm	Brita 12,5mm
7ª	Brita 19mm	Óleo de algodão	Brita 19mm				
8ª	Cal	Pó de pedra	Pó de pedra	Cal	Pó de pedra	Pó de pedra	Pó de pedra
9ª	Areia média	Cal	Cal	Pó de pedra	Cal	Cal	Cal
10ª	Tempo Fixo	Areia média	Areia média	Tempo Fixo	Areia média	Areia média	Tempo Fixo
11ª	Mão de obra	Tempo Fixo	Tempo Fixo	Areia média	Tempo Fixo	Tempo Fixo	Areia média
12ª		Mão de obra					

Por meio dos dados apresentados no Quadro 17 verifica-se que o CAP 50/70 é o insumo que promove o maior impacto nos investimentos de todas as alternativas de projeto, correspondendo à quase metade dos custos de produção da mistura de referência. Entretanto, em comparação com a REF, observa-se uma redução de custos relativos a esse insumo em todas as alternativas de misturas recicladas.

O uso do RAP justifica essa diminuição de consumo de CAP 50/70. Durante a etapa de dosagem, considerou-se a participação do ligante presente no RAP, corrigido pelo valor do DoA' de 91,2%, no teor de ligante de projeto de todas as misturas recicladas. Ou seja, mesmo considerando uma disponibilidade parcial do ligante envelhecido, essa contribuição ainda foi capaz de promover uma redução de custos de até 14,25% na alternativa MAR-BL10% e de 11,73% na alternativa MAR-Z33. Sendo assim, essa dedução tende a ser cada vez maior quanto maior for a taxa de reciclagem na mistura.

Conforme mostrado no Quadro 17, após o CAP 50/70 os itens momento de transporte, óleo tipo A1 e os equipamentos, nessa ordem, foram os que incorporaram maiores custos à produção de todas as misturas asfálticas avaliadas.

Em comparação com a mistura de referência, o Quadro 17 também revela que a contribuição do óleo de algodão como aditivo ocupa a posição da brita 19mm, do pó de pedra e da brita 12,5mm no ranking de custos das alternativas MAR-BL4%, MAR-BL6% e MAR-BL10%, respectivamente.

Em seguida, percebe-se novamente a contribuição do RAP na redução do consumo de matérias-primas virgens. Quanto maior o teor de RAP nas misturas, menor o consumo de agregados, principalmente da brita 12,5mm e do pó de pedra.

As Figuras 95 e 96 apresentam os incrementos ou reduções nos custos de cada item que compõe o investimento de produção das alternativas com óleo de algodão e com zeólita, respectivamente, após uma comparação com os investimentos da alternativa REF.

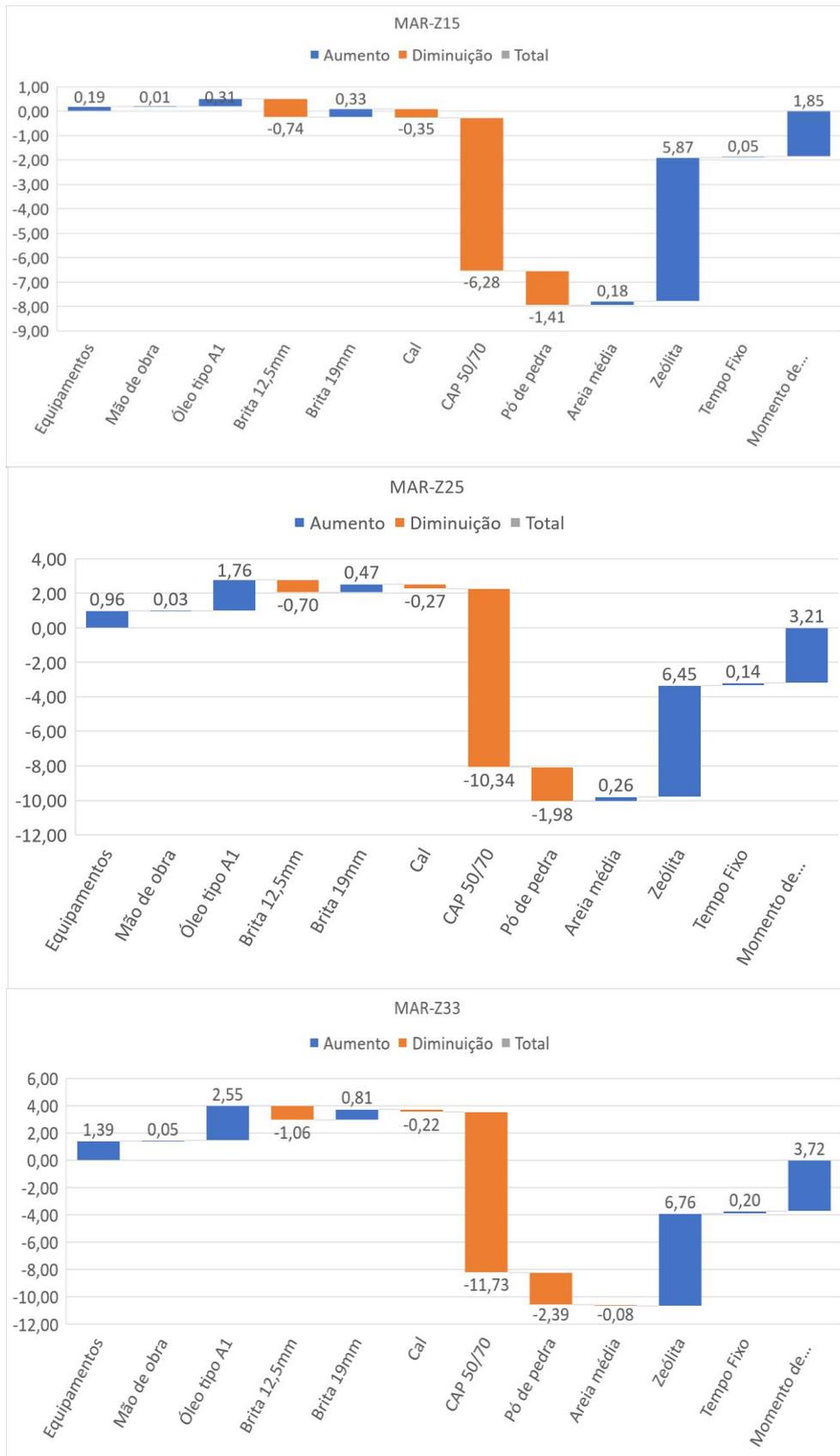
Para todas as alternativas de misturas recicladas com óleo de algodão e com zeólita, verificou-se um aumento nos custos de equipamentos, óleo tipo A1, areia média e brita 19mm, além da ampliação de custos devido à introdução dos aditivos na composição dessas misturas, decorrente da sua obtenção e do seu transporte. Entretanto, constatou-se que a introdução de RAP compensou o acréscimo de investimentos nesses itens citados, pois promoveu a dedução de custos devido à necessidade de uma menor quantidade de agregados e ligante asfáltico.

Mesmo com o aumento nos custos de alguns itens dos investimentos das misturas asfálticas recicladas, o valor total do investimento de produção de cada uma delas ainda foi inferior ao da REF, conforme já apresentado na Figura 93.

Figura 95 – Incrementos ou reduções nos custos de cada item do investimento de produção das alternativas com óleo de algodão



Figura 96 – Incrementos ou reduções nos custos de cada item do investimento de produção das alternativas com zeólita



4.2.3.8 Avaliação econômica das alternativas

As Tabelas 60, 61, 62, 63, 64, 65 e 66 apresentam os resultados do fluxo de caixa das misturas asfálticas no horizonte de planejamento de 10 anos, equivalente à vida útil considerada para a camada de revestimento, com taxa de desconto de 8,5%.

Os custos de recuperação de R\$ 90.000,00/km previstos para acontecer anualmente, foram reajustados por meio do índice de reajuste de manutenção e conservação de 13,481%. O investimento no final da vida útil dos pavimentos, referente aos custos do serviço de fresagem da camada de revestimento, também foi reajustado por meio do índice de reajuste de 18,401%.

Tabela 60 - Fluxo de caixa da alternativa REF

REF											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENTRADAS											
Receita (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Residual (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SAÍDAS											
Investimento (custo) inicial de construção (R\$)	- 581482,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	- 90000,00	- 89999,87	- 89999,73	- 89999,60	- 89999,46	- 89999,33	- 89999,19	- 89999,06	- 89998,92	0,00
Custos de final da vida útil (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 57173,13
Fluxo de Caixa (R\$)	- 581482,28	- 90000,00	- 89999,87	- 89999,73	- 89999,60	- 89999,46	- 89999,33	- 89999,19	- 89999,06	- 89998,92	- 57173,13
VPL (R\$)	-R\$ 1.157.481,90										

Tabela 61 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-BL4%

MAR-BL4%											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENTRADAS											
Receita (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Residual (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SAÍDAS											
Investimento (custo) inicial de construção (R\$)	- 555168,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	- 90000,00	- 89999,00	- 89998,00	- 89997,00	- 89996,00	- 89995,00	- 89994,00	- 89993,00	- 89992,00	0,00
Custos de no final da vida útil (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 57171,31
Fluxo de Caixa (R\$)	- 555168,35	- 90000,00	- 89999,00	- 89998,00	- 89997,00	- 89996,00	- 89995,00	- 89994,00	- 89993,00	- 89992,00	- 57171,31
VPL (R\$)	-R\$ 1.131.148,85										

Tabela 62 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-BL6%

MAR-BL6%											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENTRADAS											
Receita (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Residual (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SAÍDAS											
Investimento (custo) inicial de construção (R\$)	- 512587,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	0,00
Custos de no final da vida útil (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 57171,31
Fluxo de Caixa (R\$)	512587,85	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	57171,31
VPL (R\$)	-R\$ 1.088.568,35										

Tabela 63 - Fluxo de caixa da alternativa MAR- BL10%

MAR-BL10%											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENTRADAS											
Receita (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Residual (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SAÍDAS											
Investimento (custo) inicial de construção (R\$)	- 495541,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	0,00
Custos de no final da vida útil (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 57171,31
Fluxo de Caixa (R\$)	495541,94	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	57171,31
VPL (R\$)	-R\$ 1.071.522,44										

Tabela 64 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-Z15

MAR-Z15											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENTRADAS											
Receita (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Residual (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SAÍDAS											
Investimento (custo) inicial de construção (R\$)	- 571319,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	0,00
Custos de no final da vida útil (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 57171,31
Fluxo de Caixa (R\$)	571319,83	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	57171,31
VPL (R\$)	-R\$ 1.147.300,33										

Tabela 65 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-Z25

MAR-Z25											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENTRADAS											
Receita (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Residual (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SAÍDAS											
Investimento (custo) inicial de construção (R\$)	- 527160,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	0,00
Custos de no final da vida útil (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 57171,31
Fluxo de Caixa (R\$)	527160,14	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	57171,31
VPL (R\$)	-R\$ 1.103.140,64										

Tabela 66 - Fluxo de caixa da alternativa MAR-Z25

MAR-Z33											
ITEM	Período (Anos)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENTRADAS											
Receita (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor Residual (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SAÍDAS											
Investimento (custo) inicial de construção (R\$)	- 505375,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custos de Recuperação (R\$)	0,00	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	0,00
Custos de no final da vida útil (R\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	- 57171,31
Fluxo de Caixa (R\$)	505375,22	90000,00	89999,00	89998,00	89997,00	89996,00	89995,00	89994,00	89993,00	89992,00	57171,31
VPL (R\$)	-R\$ 1.081.355,72										

A Figura 97 mostra que o valor presente líquido do fluxo de caixa de todas as misturas asfálticas recicladas no período de 10 anos foi inferior ao obtido para a mistura asfáltica de referência.

A Figura 97 mostra que o valor presente líquido do fluxo de caixa de todas as misturas asfálticas recicladas no período de 10 anos foi inferior ao obtido para a mistura asfáltica de referência.

Como os custos de construção e de fim de vida foram os mesmos para todas as misturas asfálticas avaliadas e os custos de recuperação foram semelhantes, percebe-se que o maior impacto na avaliação decisória é decorrente dos investimentos iniciais, resultantes do somatório dos custos das fases de produção das misturas e construção da camada de revestimento.

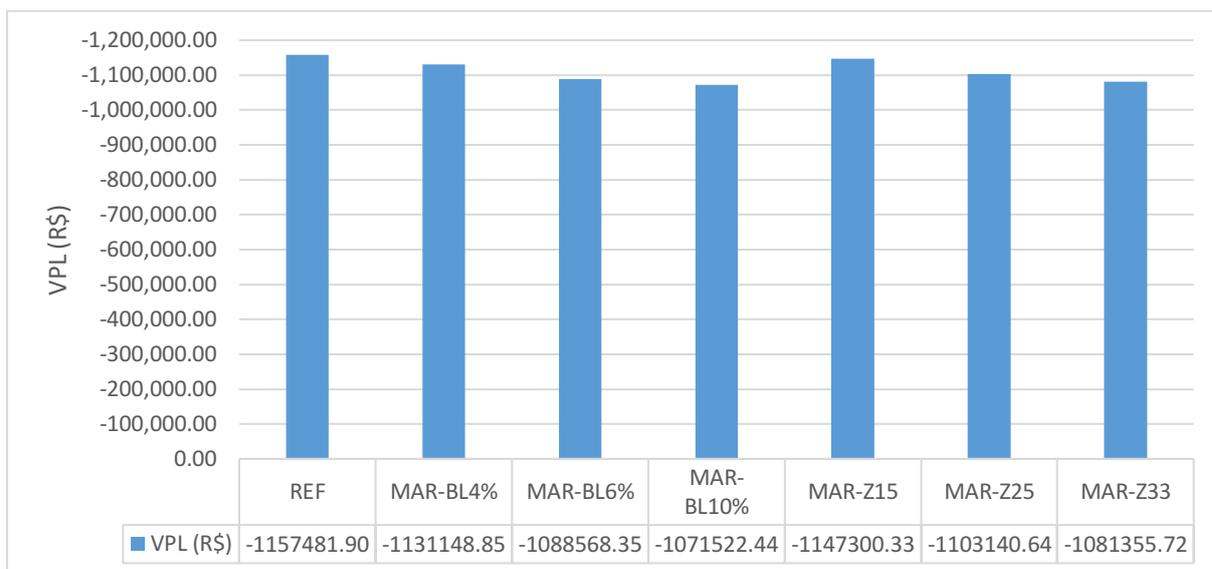
Segundo Alaloul et al. (2021) o custo da fase de manutenção geralmente custa menos porque esses serviços de rotina devem ser realizados para sustentar a capacidade de sobrevivência do pavimento.

Portanto, conforme discutido no tópico anterior, mesmo com a adição de um novo material na composição das misturas asfálticas recicladas, essas não apresentaram VPLs superiores ao da mistura de referência, demonstrando serem mais vantajosas economicamente.

A MAR-Z15 foi a que mais se aproximou do VPL da mistura de referência, apresentando uma diferença de R\$10181,57. Por outro lado, as alternativas MAR-BL10%, MAR-BL6% e MAR-Z33 foram as que apresentaram os menores VPLs diferindo, respectivamente, em 7,43% e 6,57%. Isso corrobora com a afirmação de que a introdução de taxas cada vez mais elevadas de RAP tendem a reduzir o custo das misturas asfálticas, mesmo com a utilização de aditivos.

Quiao et al. (2019) analisando os custos do ciclo de vida de pavimentos reciclados sob condições climáticas futuras, identificaram também uma redução (de 18,3%) no VPL de uma alternativa de pavimento contendo 40% de RAP, numa ACCV sem a consideração da fase de uso.

Figura 97 – VPL das alternativas avaliadas (valores absolutos)



4.2.4 Avaliação integrada do desempenho mecânico, econômico e ambiental

O gráfico da Figura 98 apresenta o ranking das alternativas de misturas asfálticas por parâmetro analisado, relativos às dimensões mecânica, ambiental e econômica, permitindo uma avaliação integrada e um processo decisório mais coerente com o conceito de sustentabilidade.

O ranking foi feito mediante o desempenho verificado em cada critério, variando de 1 (alternativa de melhor desempenho) a 7 (alternativa de pior desempenho).

Salienta-se que na dimensão do comportamento mecânico, todas as misturas apresentaram desempenho satisfatório em relação à critérios mínimos normatizados e em relação à alternativa de referência. Portanto, nesta dimensão a pontuação indica apenas um ordenamento com base no critério de desempenhos mecânico e, neste caso, a posição 7 não é um indicativo de prejuízo.

Na dimensão mecânica, o fator de utilidade (χ) engloba o produtório de razões entre o desempenho das misturas recicladas e o das misturas de referência, quanto a deformação permanente e a fadiga. O χ' , além das citadas, ainda engloba as razões quanto à resistência à tração, resistência à tração retida e cântabro. Para esses critérios, a MAR-Z15 ocupou a primeira posição, seguida da MAR-Z25. Dentre as alternativas com óleo de algodão, se sobressaiu a MAR-BL10%.

A MAR-Z25 ainda se destacou na análise individual da resistência à tração retida e da resistência à fadiga em 40% da RT, representada indiretamente pelo F/F'_{av} .

A posição 4 ocupada pela MAR-BL10% no critério MR não indica que houve aumento de rigidez em comparação com a de referência, que ficou na posição 3, pois pela análise estatística realizada, identificou-se que não houve diferença significativa entre essas duas alternativas. A alternativa MAR-BL10% também ocupou a primeira posição na resistência à fadiga em 30% da RT.

As alternativas MAR-BL6% e MAR-BL4% ocuparam as últimas posições no critério RT, RRT e vida de fadiga representada indiretamente pelo F/F'_{av} , indicando um comprometimento de desempenho em comparação com as outras alternativas, corroborado pelas análises estatísticas realizadas. O RT e RRT dessas alternativas ficaram próximos do limite mínimo de 0,65MPa e 70% respectivamente, e o F/F'_{av} foi inferior à unidade indicando resistência à fadiga inferior à da REF. Ou seja, podem apresentar problemas de resistência à tração de resistência à ação deletéria da umidade e de resistência à fadiga, principalmente sobre elevadas tensões, ao longo da sua vida útil.

Na dimensão ambiental, a alternativa MAR-Z15 foi classificada como a mais circular, ou seja, aquela que apresentou uma maior redução do fluxo linear e maximização do fluxo restaurador e maior intensidade de uso. A segunda alternativa mais circular foi a MAR-Z25. Tais observações que corroboram com a classificação obtida na dimensão mecânica.

Dentre as alternativas com óleo de algodão, a MAR-BL10% é a mais circular. A maior quantidade de RAP presente na sua composição associada ao melhor desempenho na dimensão ambiental dentro do grupo de misturas recicladas com óleo de algodão, justificam essa classificação.

Na avaliação do ciclo de vida, a mistura MAR-Z33 foi a que apresentou o menor dano ambiental na categoria de qualidade do ecossistema e saúde humana. A MAR-Z25 ocupou a segunda posição nas três categoriais avaliadas.

Dentre as alternativas com óleo de algodão, a MAR-BL6% é a que causa o menor impacto ao meio ambiente, seguida da MAR-BL4%.

Na avaliação do custo do ciclo de vida, a MAR-BL10% e a MAR-Z33 foram as melhores alternativas em termos de valor presente líquido. Na sequência, estão as MAR-BL6% e a MAR-Z25. Percebe-se que na dimensão econômica as melhores alternativas foram aquelas com maior quantidade de RAP na composição, pois a inclusão desse material promove uma redução expressiva de custos nos itens de maior impacto nos investimentos: matéria-prima e ligante asfáltico.

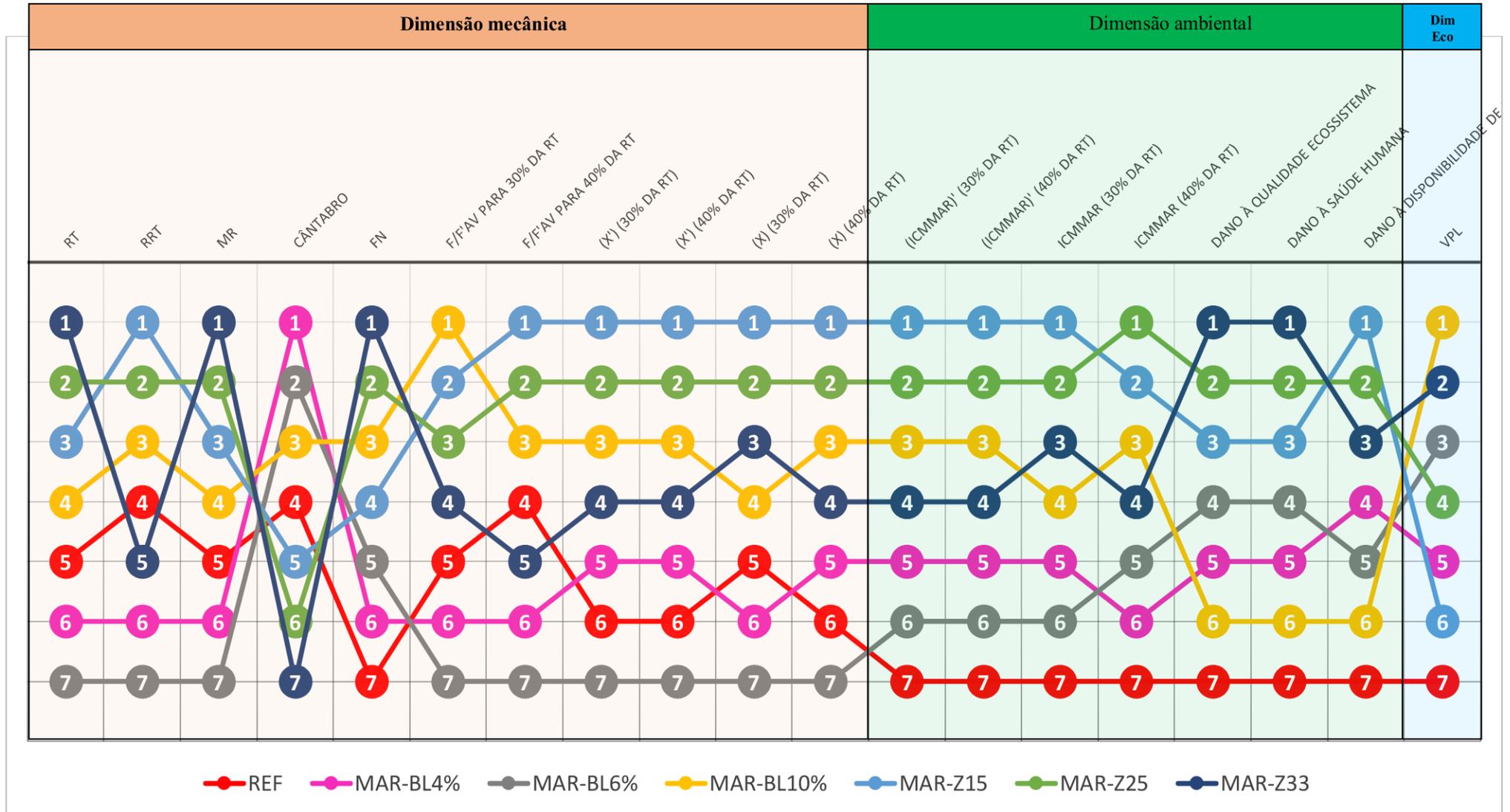
Diante do exposto, num processo decisório para atendimento do conceito de sustentabilidade, a alternativa MAR-Z25 é a mais vantajosa, pois atendeu aos critérios mecânicos, apresentou bom desempenho ambiental e é a segunda com maiores redução de custo, implicando em melhores resultados econômicos.

No conjunto das misturas com zeólita, a MAR-Z15 foi a que apresentou o melhor desempenho mecânico e foi classificada como a mais circular, no entanto exibiu o maior custo dentre todas as alternativas avaliadas, se aproximando do custo de uma mistura totalmente virgem, mesmo com a adição de RAP na sua composição.

No conjunto de misturas recicladas com óleo de algodão, a MAR-BL10% é a mais vantajosa, mesmo sendo a alternativa que apresentou um maior dano ambiental.

As alternativas MAR-BL6% e MAR-BL4%, mesmo apresentando um impacto ambiental menor quanto aos danos aos ecossistemas, à saúde humana e aos recursos, são mais propensas à problemas relacionados ao desempenho mecânico. A degradação precoce que poderá ocorrer nos pavimentos que contenham essas misturas na camada de revestimento obrigará regimes de manutenção mais frequentes. Consequentemente, isso acarretará uma necessidade de um montante de matéria-prima e recursos financeiros, comprometendo ainda mais a circularidade desses produtos, podendo também agregar pontos nas categorias de impacto ambiental avaliadas no ACV.

Figura 98 - Análise integrada - dimensões mecânica, ambiental e econômica



4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sobre a avaliação do DoA':

- Para o RAP estudado, a temperatura de 140°C foi a que promoveu uma maior ativação do ligante envelhecido, que refletiu em valores menores de volume de vazios, maior resistência à tração e maior módulo de resiliência, com menor dispersão dos resultados, indicando assim uma maior homogeneidade no arranjo compactado dos componentes do RAP.

Sobre a avaliação do cenário 100% RAP + aditivo:

- A temperatura e o teor de óleo de algodão influenciaram na redução do volume de vazios, sendo mais expressiva na temperatura de 140°C e 160°C e em maiores teores de óleo. Nas amostras com zeólita, a redução do volume de vazios aconteceu somente na temperatura de 160°C, independente do teor desse aditivo. Essa redução pode ter sido auxiliada pela maior quantidade de ligante RAP ativo nessas temperaturas, conforme valores de DoA'.
- Tanto o óleo de algodão como a zeólita promovem uma redução na resistência à tração do RAP.
- O óleo de algodão tem o potencial de reduzir a rigidez do RAP, entretanto em temperaturas de condicionamento mais elevadas (160°C), mesmo com a utilização de 2% e 4% de óleo, a mistura apresentou rigidez semelhante à do RAP sem aditivo. O envelhecimento adicional devido ao incremento de temperatura talvez tenha ocasionado esse aumento na rigidez do RAP.
- O teor de 0,3% de zeólita parece ser o mais promissor para a redução da rigidez do RAP em temperaturas mais baixas (140°C), independente do tempo de condicionamento.

Sobre a avaliação mecânica das misturas recicladas:

- Todas as misturas recicladas, independentemente do tipo de aditivo, apresentaram desempenho mecânico satisfatório em todos os ensaios realizados. Entretanto, as

misturas MAR-BL6% e MAR-BL4% estão sujeitas a problemas referentes a resistência à tração e dano por umidade induzida e a fadiga quando sujeitas a elevadas tensões.

- A MAR-BL6% e MAR-BL4% apresentaram o melhor desempenho frente ao desgaste cântabro e rigidez inferior à da mistura de referência, indicando uma interferência do óleo nessa redução. Porém, o MR da MAR-BL10% foi superior ao dessas duas, se assemelhando ao da REF. Isso indica a predominância da rigidez do RAP na mistura, devido seu teor mais elevado.
- No conjunto de misturas com zeólita, a MAR-Z15 foi a que apresentou a maior vida de fadiga quando comparada com a mistura de referência, reforçando o que afirma o senso comum de que o maior teor de RAP compromete a resistência à fadiga das misturas

Sobre a o índice de circularidade:

- Todas as misturas asfálticas recicladas apresentaram ICM_{MAR} superiores aos da mistura de referência, indicando que as alternativas recicladas são capazes de minimizar o fluxo linear e maximizar a circularidade de materiais.
- Os ICM_{MAR} também indicaram um aumento na intensidade de uso das misturas recicladas, o que pode conduzir a uma utilização mais eficiente de recursos, acarretando menor geração de resíduos e menor utilização de materiais virgens usados por unidade de tempo pela porção linear do fluxo, devido a menor necessidade de reparos e manutenções ao longo da sua vida útil.

Sobre os resultados da ACV:

- O aquecimento global terrestre foi o indicador que mais contribuiu para o dano aos ecossistemas, em todas as alternativas avaliadas.
- A toxicidade humana não-cancerígena e a formação de partículas finas foram os indicadores que mais contribuíram na categoria dano à saúde humana das alternativas REF e recicladas, respectivamente.
- A MAR-BL10% apresentou um maior valor de dano à saúde humana justificado pela maior quantidade de emissões atmosféricas decorrentes da obtenção de um montante maior de óleo necessário para a sua composição. Entretanto, o valor deste indicador para essa mistura reciclada ainda foi inferior ao da REF.

- A categoria de disponibilidade de recursos foi a que apresentou o maior valor de impacto, e isso reflete o fato de que o consumo de recursos fósseis tem maior influência na avaliação geral dos danos finais.

Sobre os resultados da ACCV

- As alternativas recicladas proporcionaram uma redução de custos, traduzido pelo VPL, em comparação com a mistura de referência, independentemente do tipo de aditivo utilizado.
- A MAR-Z15 foi a que mais se aproximou do VPL da mistura de referência, indicando custos similares ao de uma mistura composta por materiais totalmente virgens.
- A MAR-BL10%, MAR-BL6% e MAR-Z33 foram as que apresentaram os menores VPLs, indicando que a introdução de taxas cada vez mais elevadas de RAP tendem a reduzir o custo das misturas asfálticas, mesmo com a utilização de aditivos.

Sobre a análise integrada

- A alternativa de mistura asfáltica reciclada contendo 0,3% de zeólita e 25% de RAP é a mais vantajosa, pois atendeu aos critérios mecânicos, apresentou bom desempenho ambiental e é a segunda de menor investimento financeiro.
- No conjunto de misturas recicladas com óleo de algodão, a alternativa com 10% de óleo de algodão e 33% de RAP é a mais vantajosa, mesmo sendo a alternativa que apresentou um maior dano ambiental.
- As misturas MAR-BL4% e MAR-BL6%, apesar de exibirem um melhor desempenho ambiental, podem apresentar um comprometimento de desempenho mecânico que incorrerá em manutenções precoces acarretando, conseqüentemente, um maior consumo de matéria-prima.

5 CONCLUSÕES

- Os resultados do DoA' calculados por meio do volume de vazios e do módulo de resiliência demonstraram coerência com os resultados obtidos pela metodologia já existente na literatura, que faz uso do RT como ensaio padrão para a determinação desse grau de ativação relativo do ligante RAP, pois todos eles indicaram a temperatura de 140°C como aquela que promove a maior ativação do ligante envelhecido.
- Ambos os aditivos trouxeram benefícios na interação com o RAP. No uso do óleo de algodão, a temperatura de 140°C parece ser promissora pois além de proporcionar uma maior ativação do ligante envelhecido, também promoveu bons resultados de RT, MR e Vv. Nesta temperatura, o teor de 4% e 6% de óleo de algodão poderia ser utilizado sem prejuízos à resistência e a rigidez da mistura, no entanto para uma maior redução do Vv indica-se o teor de 10%. Na temperatura de 140°C, em termos de RT e MR o teor de 0,3% de zeólita é o mais indicado, independente do tempo de condicionamento, entretanto uma redução do Vv da mistura só aconteceu com o aumento da temperatura.
- Por meio nos *blendings charts* identificou-se que os teores de óleo de algodão de 4%, 6% e 10% permitem uma adição de 15%, 25% e 33% de RAP, respectivamente.
- Todas as misturas recicladas, independentemente do tipo de aditivo, apresentaram desempenho mecânico satisfatório em todos os ensaios realizados. Entretanto, as misturas MAR-BL6% e MAR-BL4% estão sujeitas a problemas referentes a resistência à tração e dano por umidade induzida e a fadiga quando sujeitas a elevadas tensões. A MAR-Z15 foi a que apresentou a maior vida de fadiga quando comparada com a mistura de referência, reforçando o que afirma o senso comum de que o maior teor de RAP compromete a resistência à fadiga das misturas. Entretanto, a MAR-Z25 e MAR-Z33 também apresentou desempenho frente à fadiga superior ao da REF.
- A metodologia adaptada para o cálculo do ICM_{MAR} pode trazer reflexões mais assertivas sobre qual a mistura asfáltica que apresentará uma maior intensidade de uso e, conseqüentemente, uma maior economia de materiais ao longo do tempo. Na avaliação dos resultados do ICM_{MAR} e $(ICM_{MAR})'$ notou-se que o indicador Fator de Utilidade é o que mais interfere no valor desses índices. Adverte-se, portanto, que o aspecto de utilidade apresenta um peso maior na avaliação do potencial de

circularidade proposta por meio desses índices. Percebeu-se também que aumentar a quantidade de RAP proporciona uma interferência maior da componente do índice do fluxo linear e, conseqüentemente, no resultado final do ICM_{MAR} e $(ICM_{MAR})'$.

- As alternativas recicladas proporcionaram uma redução nos danos ao ecossistema, à saúde humana e aos recursos em comparação com a mistura de referência, independentemente do tipo de aditivo utilizado. A modificação da composição das misturas recicladas por meio da variação de percentuais de RAP e da introdução de diferentes aditivos, em teores também variados, não ocasionou alterações significativas nos efeitos líquidos dos danos ao meio ambiente. Mas a tendência é que teores cada vez mais elevados de RAP proporcionem uma gradativa diminuição dos impactos ambientais, pois foi visto que as etapas do ciclo de vida das misturas asfálticas que sofrem maiores impactos são a de obtenção da matéria-prima + transporte e fim da vida útil. Notou-se ainda que a variável “distância média de transporte” é uma das que mais repercutem nos resultados da ACV de misturas asfálticas. Portanto, para situações específicas, deve ser feita a inserção das reais distâncias médias de transporte ou uma avaliação da variação para validar os resultados da ACV. A redução do uso de materiais virgens, devido a substituição parcial pelo RAP, permitiu que houvesse um decréscimo do valor inerente a categoria de dano aos recursos. Entretanto, esse decréscimo não foi tão expressivo devido a introdução de aditivos na composição das misturas.
- A inserção de taxas cada vez mais elevadas de RAP em misturas asfálticas promove uma redução gradativa de custos, pois foi visto que as misturas recicladas com menor VPL são àquelas com maior percentual de RAP. Entretanto, por meio da ACCV é que o projetista poderá analisar se essa redução irá se sobrepor ao acréscimo de custo devido à inserção de um aditivo ou agente de reciclagem, para assim determinar se a alternativa será, de fato, viável economicamente.
- A análise integrada das dimensões mecânicas, ambientais e econômicas refletiu a importância da conexão entre esses aspectos no processo de decisão por alternativas de projetos de misturas asfálticas recicladas, pois foi visto que nem sempre as alternativas com maiores taxas de reciclagem serão as mais sustentáveis.
- Esse estudo apontou a necessidade da ponderação entre os ganhos e prejuízos mecânicos, ambientais e econômicos quando o projeto de misturas asfálticas envolve a introdução de RAP e algum aditivo de origem residual ou não.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência da vida de fadiga e do *flow number* para os cenários 100%RAP + aditivo;
- Realizar um estudo do desempenho ambiental, mecânico e econômico de misturas asfálticas contendo na sua composição tanto o bioligante como a zeólita;
- Realizar o mesmo comparativo feito nesse estudo, por meio do ICM_{MAR} e do $(ICM_{MAR})'$, para outras misturas asfálticas com taxas de reciclagem maiores e contendo outros aditivos;
- Adicionar uma quantidade maior de indicadores no cálculo do ICM_{MAR} que reflitam mais fortemente a contribuição da reciclagem no potencial de circularidade das misturas asfálticas;
- Realizar ACVs variando a DMT para as diferentes situações de transporte necessárias dentro da fronteira considerada;
- Usar dados primários em todas as avaliações executadas nesse estudo para outros cenários de reciclagem de misturas asfálticas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, Adibe Luiz; SILVA FILHO, José Cleto da; GODOI, Antonio Roberto de; CARMO, Carolina de Almeida; EDUARDO, José Luiz de Paula. Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Piracicaba, v. 37, n. 1, p. 260-258, jan. 2008.

ABED, Ahmed; THOM, Nick; LOPRESTI, Davide. Design considerations of high RAP-content asphalt produced at reduced temperatures. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 51, n. 4, p. 1-16, 3 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1220-1>. Acesso em: 10 ago. 2020.

AKENTUNA, Moses; MOHAMMAD, Louay; DALY, William. H.; ALI, Hesham, A.; HADDADID, Farshad; BALAMURUGAN, Sreelatha; NEGULESCU, Ioan.; COOPER, Samuel; COOPER, Samuel B. G.; BAUMGARDNER, Gaylon. L. **Investigation of the Performance of 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures: Molecular, Chemical, and Mechanical Characterization**. In: 95th Annual Meeting and Technical Sessions, 2020.

AKISETTY, Chandra K.; LEE, Soon-Jae; AMIRKHANIAN, Serji N.. High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 565-573, jan. 2009. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.010>.

ALALOUL, Wesam Salah; ALTAF, Muhammad; MUSARAT, Muhammad Ali; JAVED, Muhammad Faisal; MOSAVI, Amir. Systematic Review of Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for Pavement and a Case Study. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 8, p. 4377, 14 abr. 2021. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su13084377>.

AL-QADI, Imad L.; AURANGZEB, Qazi; CARPENTER, Samuel H; PINE, William J.; TREPANIER, James. (2012). **Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures**. Springfield: Illinois Center for Transportation, Research Report FHWA-ICT-12-002.

AL-QADI, Imad L.; CARPENTER, Samuel H; ROBERTS, Geoff; OZER, Hasan; AURANGZEB, Qazi; ELSEIFI, Mostafa; TREPANIER, James. (2009). **Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP**. Springfield: Illinois Center for Transportation, Research Report ICT-09-031.

AL-QADI, Imad L.; ELSEIFI, Mostafa; CARPENTER, Samuel H. (2007). **Reclaimed Asphalt Pavement - A Literature Review**. Springfield: Illinois Center for Transportation, Research Report FHWA-ICT-07-001.

AL-QADI, Imad L.; OZER, Hasan; LAMBROS, John; EL KHATIB, Ahmad; SINGHVI, Punit.; KHAN, Tamim; RIVERA_PEREZ, José; DOLL, Berangere. (2015). **Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS**. Springfield: Illinois Center for Transportation, Research Report No. FHWA-ICT-15-017.

AL-SAFFAR, Zaid Hazim; YAACOB, Haryati; SATAR, Mohd Khairul Idham Mohd; JAYA, Ramadhansyah Putra. The tailored traits of reclaimed asphalt pavement incorporating maltene: performance analyses. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 1800-1813, 23 set. 2020. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2020.1824294>.

AMBROZOVA, Pavlina; KYNICKY, Jindrich; URUBEK, Tomas; NGUYEN, Vinh. Synthesis and Modification of Clinoptilolite. **Molecules**, [S.L.], v. 22, n. 7, p. 1107-1120, 4 jul. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules22071107>. Acesso em: 29 jun. 2020.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 323**: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Washington, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO R 35**: Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures. Washington, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 164**: Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, 2018.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 209**: Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (G_{mm}) and Density of Asphalt Mixtures. Washington, 2020.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 308**: Standard Method of Test for Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method. Washington, 2018.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 84**: Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. Washington, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 85**: Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. Washington, 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Washington, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **AASHTM D36/D36M – 14**: Standard Test Method For Softening Point Of Bitumen (Ring-And-Ball Apparatus). West Conshohocken, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2172**: Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252/17**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4791-19**: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5821/13**: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1856-09**: Standard Test Method for Recovery of Asphalt From Solution by Abson Method. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2172**: Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4402**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4887**: Standard Practice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Asphalt Materials. West Conshohocken, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5/D5M**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials Section 9 Instructional Video. West Conshohocken, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5404**: Standard Practice for Recovery of Asphalt Binder from Solution Using the Rotary Evaporator. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5404**: Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6373**: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. West Conshohocken, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7405**: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7906**: Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using Toluene and the Rotary Evaporator. West Conshohocken, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D8254**: Standard Test Method for Flash and Fire Points of Asphalt by Cleveland Open Cup Tester. West Conshohocken, 2019.

AMONI, Bruno de Castro; FREITAS, Armando Diego Lima de; LOIOLA, Adonay Rodrigues; SOARES, Jorge Barbosa; SOARES, Sandra de Aguiar. A method for NaA zeolite synthesis from coal fly ash and its application in warm mix asphalt. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 558-567, 1 jul. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2019.1633766>. Acesso em: 17 jul. 2020.

ANDERSON, M. et al. (2010). MSCR: a better tool for characterizing high-temperature performance properties. *Asphalt – The magazine of the Asphalt Institute*. Lexington, KY, v.25, p. 15-16. 18.21-23. ISSN 0004-4594.

ARÁMBULA-MERCADO, Edith; CHAVARRO-MUÑOZ, Santiago J.; HU, Sheng; EPPS, Jon; PARK, Eun Sug; MARTIN, Amy Epps. 2018. **High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Asphalt Mixes For Low Volume Roads**. Tallahassee: Illinois Center for Transportation, BE194 Final Report.

ARMBRUSTER, Thomas. Clinoptilolite-heulandite: applications and basic research. **Studies In Surface Science And Catalysis**, [S.L.], p. 13-27, 2001. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-2991\(01\)81183-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-2991(01)81183-6). Acesso em: 29 jun. 2020.

ARRUDA, Sonaly Mendes. **Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas**. 2021. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

ARSHAD, Muhammad; AHMED, Muhammad Farooq. Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 151, p. 83-97, out. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.028>. Acesso em: 02 nov. 2020.

ASHMORE, M.R. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. **Plant Cell Environ** [S.L.], v. 28, p. 949-964, 2005. Disponível em: <http://10.1111/j.1365-3040.2005.01341.x>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

Associação Brasileira de Produtores de Algodão (ABRAPA). Disponível em: <https://www.abrapa.com.br/>. Acesso em: 07 jun. 2022.

AUSTROADS. (2015). Maximising the re-use of reclaimed asphalt pavement outcomes of year two: RAP mix design. Austroads. Retrieved from www.austroads.com.au

AYRES. Encontro de Asfalto, 18., 2006, [S.L.]. **Produção e caracterização mecânica de misturas asfálticas obtidas a temperaturas intermediárias pela adição de zeólitas**. [S.L.]: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - Ibp, 2006. 8 p.

BAERLOCHER, Ch.; MCCUSKER, Lynne B.; OLSON, D.H. **Atlas of Zeolite Framework Types**. 6. ed. Amsterdã: Elsevier Science, 2007. 404 p.

BAÑKOWSKI, Wojciech. Evaluation of Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 469-483, 19 mar. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app8030469>. Acesso em: 23 jul. 2020.

BAPTISTA, António Miguel Costa. **Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central**: contribuição para o seu estudo e aplicação. 2006. 340 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.

BEHNOOD A., A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties, *J. Clean. Prod.* 259 (2020) 120817

BELL, C. A., WIEDER, A. J., & FELLIN, M. J. (1994). **Laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures: Field validation**. SHRP Report A-390. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council.

BENNING, Liane G.; WILKIN, Richard T.; BARNES, Hubert L.. Solubility and stability of zeolites in aqueous solution: ii. calcic clinoptilolite and mordenite. **American Mineralogist**, [S.L.], v. 85, n. 3-4, p. 495-508, mar. 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2138/am-2000-0411>. Acesso em: 21 jun. 2020.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 4ªed. Rio de Janeiro: Petrobras – Asfalto/ABEDA, 2022. 475p.

BEUREN, F.H., Ferreira, M. G. G; Miguel, P. A. C. Product-service systems: a literature review on integrated products and services. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, pp. 222-231, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.028>.

BOEIRA, Fernando Dekeper. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. 2018. 286 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BOHN, Kátia Aline Aline; SPECHT, Luciano Pivoto; BRONDANI, Chaveli; CORREA, Bethania Machado; PINHEIRO, Gustavo dos A; EIDT, Karlla Gabriella; BARBOZA JUNIOR, Valdir dos Santos; BOEIRA, Fernando Dekeper; PEREIRA, Deividi da Silva. Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero. **Transportes**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 18-32, 30 abr. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v27i4.1740>. Acesso em: 07 maio 2020.

BONAQUIST, R. **Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt**. NCHRP Report 69, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC, 2011.

BOTARO, Vagner Roberto; CASTRO, Samuel Rodrigues; RODRIGUES JUNIOR, Fausto; CERANTOLA, Andrea E.. Obtenção e caracterização de blendas de asfalto CAP 20, modificado com poliestireno reciclado, resíduos de pneu e lignina organossolve. **Metalurgia & Materiais**, Ouro Preto, v. 1, n. 59, p. 117-122, mar. 2006.

BOWERS, Benjamin F.; HUANG, Baoshan; SHU, Xiang; MILLER, Brad C.. Investigation of Reclaimed Asphalt Pavement blending efficiency through GPC and FTIR. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 50, p. 517-523, out. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.003>. Acesso em: 08 set. 2018.

BRESSI, Sara; SANTOS, Joao; ORELKOVIĆ, Marko; LOSA, Massimo. A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 524-538, 10 jun. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2019.1623404>.

BRINGEL, Raquel Moraes. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

BROSSEAUD, Yves. **Reciclagem de misturas asfálticas: evolução após 20 anos e a situação atual na França**. In: Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 7., 2011, Foz do Iguaçu. Foz do Iguaçu: Abcr, 2011. p. 1-17.

BROWN, E. R., P. S. KANDHAL, F. L. ROBERTS, Y. R. KIM, L. DAH-YINN, e T. W. KENNEDY, **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction**. National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, 2009.

BROWN, S. F.; SCHOLZ, T. V. (2000). **Development of laboratory protocols for the ageing of asphalt mixtures**. In Proceedings of 2nd Euroasphalt and Eurobitume Conference. p. 83–90. Barcelona, Spain, Book 1.

CAMARGO, Ingrid Gabrielle Nascimento. **Potencial do emprego de misturas de bioligante e agregados usinadas a quente para revestimentos e bases de pavimentos**. 2018. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

CARRIÓN, A. Jiménez del Barco; LOPRESTI, D.; AIREY, G.D. Binder design of high RAP content hot and warm asphalt mixture wearing courses. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 460-474, 14 abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2015.1029707>. Acesso em: 09 out. 2018.

CARRIÓN, Ana Jiménez del Barco; LOPRESTI, Davide; POUGET, Simon; AIREY, Gordon; CHAILLEUX, Emmanuel. Linear viscoelastic properties of high reclaimed asphalt content mixes with biobinders. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 241-251, 27 mar. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1304253>. Acesso em: 03 fev. 2019.

CARRIÓN, Ana Jiménez del Barco; LOPRESTI, Davide; POUGET, Simon; AIREY, Gordon; CHAILLEUX, Emmanuel. Linear viscoelastic properties of high reclaimed asphalt content mixes with biobinders. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 241-251, 27 mar. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2017.1304253>.

CARVALHO, P. G. M.; BARCELLOS, F. C. Mensurando a sustentabilidade. In: MAY, H. P. (org.). *Economia do Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. Cap. 5. p. 99-132.

CAVALLI, Maria Chiara; PARTL, Manfred N.; POULIKAKOS, Lily D. Measuring the binder film residues on black rock in mixtures with high amounts of reclaimed asphalt. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 149, p. 665-672, abr. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.055>. Acesso em: 10 ago. 2020.

CENTOFANTE, Roberta; SPECHT, Luciano Pivoto; ALMEIDA JUNIOR, Pedro Orlando Borges de; PINHEIRO, Rinaldo José Barbosa; PEREIRA, Deividi da Silva. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 1-19, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0512>.

CERDEIRA, Joselle Ferraz. **Estudo de misturas asfálticas recicladas a quente contendo 100% de material fresado para execução de tapa-buracos**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CHEN, Meizhu; XIAO, Feipeng; PUTMAN, Bradley; LENG, Bingbing; WU, Shaopeng. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking

and cotton seed oils. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 59, p. 10-16, maio 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032>. Acesso em: 10 set. 2020.

CHEN, Meizhu; XIAO, Feipeng; PUTMAN, Bradley; LENG, Bingbing; WU, Shaopeng. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 59, p. 10-16, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032>.

COPELAND, A. 2011. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. McLean: Federal Highway Administration, Research Report No. FHWA-HRT-11-021.

CORONA B, SHEN L; REIKE D, CARREÓN JR, WORRELL E (2019) Towards sustainable development through the circular economy-a review and critical assessment on current circularity metrics. *Resour Conserv Recy* 151:104498. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498>

COSTA, Daniel Beserra. **Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade à presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem**. 2022. 239 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

CSANYI, L.H., Foamed asphalt in bituminous paving mixes. **Highway Res. Board Bull.** 10 p. 108–122, 1957.

D'ANGELO; John; HARM; Eric; BARTOSZEK, John; BAUMGARDNER, Gaylon; CORRIGAN, Matthew; COWSERT, Jack; HARMAN, Thomas; JAMSHIDI, Mostafa; JONES, Wayne; NEWCOMB, Dave; PROWELL, Brian; SINES, Ron; YEATON, Bruce. (2008). **Warm-Mix Asphalt: European Practice. Federal Highway Administration**, Report No. FHWA-PL-08-007.

DAI LU, Xuan; SALEH, Mofreh. Evaluation of Warm Mix Asphalt Performance Incorporating High RAP Content. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 43, nº 4, abril de 2016, p. 343–50. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0454>.

DAL BOSCO, S. M., JIMENEZ, R. S., CARVALHO W. A. Aplicação da Zeólita Natural Escolocita na Remoção de Metais Pesados de Efluentes Industriais: Competição entre os Cátions e Processo de Dessorção. **Eclética Química**, [S.L.], v. 29, n. 1, 2004.

DAVIS, Michael John; FORT, Jean-Paul; DELCROIX, Thierry. **Binder modified with glycerol for making asphalt mixes with a hcontent of recycled bitumnous materials**. US n. US 2014/0130712 A1. Depósito: 14 nov. 2012. Concessão: 15 maio 2014.

DE VISSCHER, Joëlle; VERVAECKE, Frederik; VANELSTRAETE, Ann; SOENEN, Hilde; TANGHE, Tine; REDELIUS, Per. Asphalt Production at Reduced Temperatures using Zeolites and the Impact on Asphalt Performance. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 65-81, jan. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2010.9690260>. Acesso em: 18 ago. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031-EM**. Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico. Brasília, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 035-EM**. Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Brasília, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 053-ME**. Misturas betuminosas - percentagem de betume. Brasília, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 083-ME**. Agregados - análise granulométrica. Brasília, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135-ME**. Pavimentação asfáltica - misturas asfálticas - determinação do módulo de resiliência. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136-ME**. Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 180-ME**. Misturas asfálticas - determinação do dano por umidade induzida Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 183-ME**. Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 184-ME**. Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 195-ME**. Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Brasília, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 383-ME**. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cantabro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 411-ME**. Pavimentação asfáltica - misturas asfálticas - massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfáltica. Brasília, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 416-ME**. Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo dinâmico. Brasília, 2019.

EAPA (European Asphalt Pavement Association). **Position statement on the use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures**. Bruxelas, Bélgica, 2017.

ELKASHEF, Mohamed; PODOLSKY, Joseph; WILLIAMS, R. Christopher; COCHRAN, Eric. Preliminary examination of soybean oil derived material as a potential rejuvenator through Superpave criteria and asphalt bitumen rheology. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 149, p. 826-836, set. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.195>. Acesso em: 15 set. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition; Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK, 2015; pp. 4–20. Available online: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation-9-Dec-2015.pdf

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the Circular Economy; Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK, 2013; Volume 1, pp. 1–96.

ELTWATÌ, Ahmed; ENIEB, Mahmoud; AHMEED, Saleh; AL-SAFFAR, Zaid; MOHAMED, Azman. Effects of waste engine oil and crumb rubber rejuvenator on the performance of 100% RAP binder. **Journal Of Innovative Transportation**, [S.L.], p. 8-15, 5 abr. 2022. Suleyman Demirel University. <http://dx.doi.org/10.53635/jit.1072888>.

EN 12697-3. (2018). Bituminous mixtures. Test methods Bitumen recovery. Rotary evaporator. BSI Standards Limited.

EN 13108-1. (2016). Bituminous mixtures – material specifications – part 1: Asphalt concrete (p. 52). BSI Standards Limited.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA). **Guidance document for preparing product category rules (pcr) and environmental product declarations (EPD) for asphalt mixtures**. Brussels, Bélgica, 2017.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA). **The use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures**. p. 9. Position Paper, 2017.

FANG, Ying; ZHANG, Zhengqi; YANG, Jianhua; LI, Xinjun. Comprehensive review on the application of bio-rejuvenator in the regeneration of waste asphalt materials. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 295, p. 123631, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123631>.

FARINA, Angela; ZANETTI, Maria Chiara; SANTAGATA, Ezio; BLENGINI, Gian Andrea. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 117, p. 204-212, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>.

FERREIRA, Gilson Ezequiel; FONSECA JUNIOR, Carlos Alberto Felix. MERCADO DE AGREGADOS NO BRASIL. In: **Manual de Agregados para Construção Civil**, 2. ed. S.L.: Cetem, 2009. p. 1-33.

FERRET, Lizete Senandes. **Zeólita de cinzas de carvão: síntese e uso**. 2014. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

FRISCHKNECHT, R.; BRAUNSCHWEIG, A.; HOFSTETTER, P.; SUTER, P. (2000). **Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment**. *Environmental Impact Assessment Review* 20(2):159–189.

GALLEZOT, P. Preparation of Metal Clusters in Zeolites. **Molecular Sieves**, v. 3., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p. 257–305, 2002.

GANDHI, Tejash; AKISETTY, Chandrakiran; AMIRKHANIAN, Serji. Laboratory evaluation of warm asphalt binder aging characteristics. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 353-359, out. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10298430802342724>. Acesso em: 16 jul. 2020.

GAO, Jie; SHA, Aimin; WANG, Zhenjun; TONG, Zheng; LIU, Zhuangzhuang. Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. **Journal Of Cleaner**

Production, [S.L.], v. 152, p. 429-442, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.113>.

GASPAR, Matheus de Souza. **Mecanismo de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. 2019. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GEDIK, Abdulgazi. An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 300, p. 123980, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123980>.

GENNESSEAUX, Manuela de Mesquita Lopes. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. 2015. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GEORGIU, Panos; LOIZOS, Andreas. Characterization of Sustainable Asphalt Mixtures Containing High Reclaimed Asphalt and Steel Slag. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 17, p. 4938, 30 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14174938>.

GEROSA, G.; FUSARO, L.; MONGA, R.; FINCO, A.; FARES, S.; MANES, F.; MARZUOLI, R. A flux-based assessment of above and below ground biomass of holm oak (*Quercus Ilex l.*) seedlings after one season of exposure to high ozone concentrations. **Atmospheric Environment**, v. 113, julho de 2015, p. 41–49. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.066>.

GIANI, Martina Irene; DOTELLI, Giovanni; BRANDINI, Nicolò; ZAMPORI, Luca. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 104, p. 224-238, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>.

GLOVER, C. J., DAVISON, R. R., DOMKE, C. H., RUAN, Y., JURISTYARINI, P., KNORR, D. B. JUNG, S. H. (2005). **Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation**. Report No. FHWA/TX-03/1972-2. College Station, TX: Texas Transportation Institute.

GOEDKOOP MJ; SPRIENSMA R. 1999. **The eco-indicator '99: A damage-oriented method for life-cycle impact assessment**. The Hague (the Netherlands): Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment.

GOTTUMUKKALA, Bharath; KUSAM, Sudhakar Reddy; TANDON, Vivek; MUPPIREDDY, Amaranatha Reddy. Estimation of Blending of Rap Binder in a Recycled Asphalt Pavement Mix. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 30, n. 8, p. 1-8, ago. 2018. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002403](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002403). Acesso em: 27 fev. 2020.

GRILLI, Andrea; BOCCI, Maurizio; CARDONE, Fabrizio; CONTI, Carla; GIORGINI, Elisabetta. Laboratory and In Plant Validation of Hot Mix Recycling Using a Rejuvenator. **International Journal Of Pavement Research And Technology**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 364-371, jul. 2013. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6\(4\).364](http://dx.doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(4).364). Acesso em: 06 ago. 2020.

GUIMARÃES JÚNIOR, Roberto. Subprodutos da agroindústria na alimentação de bovinos: caroço de algodão. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrado, 2008.

HARRIGAN, E. T. **Simulating the effects of hot mix asphalt aging for performance testing and pavement structural design**. Research Results Digest 324. Washington, DC: Transportation Research Board, 2007.

HASAN, Aisha; HASAN, Umair; WHYTE, Andrew; JASSMI, Hamad Al. Lifecycle Analysis of Recycled Asphalt Pavements: case study scenario analyses of an urban highway section. **Civileng**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 242-262, 25 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/civileng3020015>.

HELANDER H, Petit-Boix A, LEIPOLD S, Bringezu S (2019) How to monitor environmental pressures of a circular economy. An assessment of indicators. *J Industr Ecol* 23:1278–1291. <https://doi.org/10.1111/jiec.12924>.

HILDEBRANDO, E. A. **Síntese de zeólita do tipo faujasita utilizando rejeito de caulim da Amazônia como fonte de silício e alumínio: Aplicação como adsorvente**. 2012. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

HILL, Brian; BEHNIA, Behzad; BUTTLAR, William G.; REIS, Henrique. Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement through Mechanical Performance Tests and an Acoustic Emission Approach. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 25, n. 12, p. 1887-1897, dez.2013. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000757](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000757). Acesso em: 16 jan. 2020.

HU, Wei; SHU, Xiang; HUANG, Baoshan. Sustainability innovations in transportation infrastructure: an overview of the special volume on sustainable road paving. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 235, p. 369-377, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.258>.

HUANG, Baoshan; LI, Guoqiang; VUKOSAVLJEVIC, Dragan; SHU, Xiang; EGAN, B. K.. Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Recycled Asphalt Pavement. **Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board**, [S.L.], n. 1929, p. 37-45, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/1929-05>. Acesso em: 02 fev. 2019.

HUANG, Shin-Che; TURNER, Thomas F. Aging Characteristics of RAP Blend Binders: rheological properties. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 26, n. 5, p. 966-973, maio 2014. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000898](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000898). Acesso em: 10 ago. 2020.

HUNKELER, D.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. **Environmental life cycle costing**. SETAC-Europe. V. Title, 2007.

HURLEY, Graham C.; PROWELL, Brian D. Evaluation of aspha-min® zeolite for use in warm mix asphalt. **Asphalt Pavements**, [S.L.], p. 1-30, jun. 2005. NCAT Report 05-04.

IAH, J.H.; KOH, S.C.L.; STONE, D.. A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 168, p. 846-866, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.187>.

INGRASSIA, T., et al. Process parameters influence in additive manufacturing”. Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing. **Springer International Publishing**, p. 261–70, 2017. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_27.

IZIDORO, Juliana de Carvalho. **Síntese e caracterização de zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão**. 2013 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013.

JACKSON, N.; PUCCINELLI, J.; MAHONEY, J. Strategic Highway Research Program Renewal Focus Area, et al. Guide to Using Existing Pavement in Place and Achieving Long Life. **Transportation Research Board**, 2014. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.17226/22270>.

JAHANBAKHSH, Hamid; KARIMI, Mohammad M.; NASERI, Hamed; NEJAD, Fereidoon Moghadas. Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: performance assessment, cost analysis, and environmental impact. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 244, p. 118837, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118837>.

JOHN, Isooba; BANGI, Mugume Rodgers; LAWRENCE, Muhwezi. Effect of Filler and Binder Contents on Air Voids in Hot-Mix Asphalt for Road Pavement Construction. **Open**

Journal Of Civil Engineering, [S.L.], v. 11, n. 03, p. 255-289, 2021. Scientific Research Publishing, Inc.. <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2021.113016>.

JUDYCKI, J.; STIENSS, M. **Badania Mieszanek Mineralno-Asfaltowych o Obniżonej Temperaturze Otaczania**; Gdansk University of Technology: Gdańsk, Poland, 2011.

KARLSSON, Robert; ISACSSON, Ulf. Material-Related Aspects of Asphalt Recycling—State-of-the-Art. **Journal of materials in civil engineering**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 81-92, fev. 2006. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:1\(81\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:1(81)). Acesso em: 16 jan. 2020.

KASEER, Fawaz; CUCALON, Lorena Garcia; ARÁMBULA-MERCADO, Edith; MARTIN, Amy Epps; EPPS, Jon. Practical Tools for Optimizing Recycled Materials Content and Recycling Agent Dosage for Improved Short- and Long-Term Performance and Rejuvenated Binder Blends and Mixtures. **Asphalt Paving Technology**, [S.L.], p. 1-38, 25 fev. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12783/aapt2018/33816>. Acesso em: 16 ago. 2020.

KATO, Ricardo Bentes. **Estudo da influência do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado nas propriedades do concreto asfáltico**. 2016. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

KHAN, Md Zahid Hossain; KOTING, Suhana; KATMAN, Herda Yati Binti; IBRAHIM, Mohd Rasdan; BABALGHAITH, Ali Mohammed; ASQOOL, Obada. Performance of High Content Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Asphaltic Mix with Crumb Rubber Modifier and Waste Engine Oil as Rejuvenator. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 11, p. 5226, 4 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11115226>.

KHOSLA, N.P., HARIKRISHNAN, K.I., 2007. Tensile Strength A Design and Evaluation Tool for Superpave Mixtures. FHWA/NC/ 2006-24. Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh.

KIM, Sungho; SHOLAR, Gregory A.; BYRON, Thomas; KIM, Jaeseung. Performance of Polymer-Modified Asphalt Mixture with Reclaimed Asphalt Pavement. **Transportation**

Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 2126, n. 1, p. 109-114, jan. 2009. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2126-13>.

KORHONEN, Jouni; HONKASALO, Antero; SEPPÄLÄ, Jyri. Circular Economy: the concept and its limitations. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 143, p. 37-46, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.

LEE, Eul-Bum; THOMAS, David; ALLEMAN, Douglas. Incorporating Road User Costs into Integrated Life-Cycle Cost Analyses for Infrastructure Sustainability: a case study on sr-91 corridor improvement project (ca). **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 179, 12 jan. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su10010179>.

LEE, Soon-Jae; KIM, Hakseo; AKISETTY, Chandra K.; AMIRKHANIAN, Serji N. Laboratory characterization of recycled crumb-rubber-modified asphalt mixture after extended aging. **Canadian Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 35, n. 11, p. 1308-1317, nov. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1139/108-079>. Acesso em: 26 jan. 2020.

LI, Jin; XIAO, Feipeng; ZHANG, Lanfang; AMIRKHANIAN, Serji N.. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: a review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 233, p. 1182-1206, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LINDER, M.; SARASINI, S.; VAN LOON, P. A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. *J. Ind. Ecol.* 2017.

LO PRESTI, Davide; VASCONCELOS, Kamilla; OREŁKOVIĆ, Marko; PIRES, Gustavo Menegusso; BRESSI, Sara. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 21, n.

8, p. 2071-2090, 25 abr. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2019.1607537>. Acesso em: 23 jul. 2019.

LOISE, Valeria; CAPUTO, Paolino; PORTO, Michele; CALANDRA, Pietro; ANGELICO, Ruggero; ROSSI, Cesare Oliviero. A Review on Bitumen Rejuvenation: mechanisms, materials, methods and perspectives. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 9, n. 20, p. 4316-4360, 14 out. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app9204316>. Acesso em: 06 set. 2020.

LU, Dai Xuan; SALEH, Mofreh. Laboratory evaluation of warm mix asphalt incorporating high RAP proportion by using evotherm and sylvaroad additives. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 114, p. 580-587, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.200>.

LU, Xuan Dai; SALEH, Mofreh. Evaluation of warm mix asphalt performance incorporating high RAP content. **Canadian Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 43, n. 4, p. 343-350, abr. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2015-0454>. Acesso em: 26 jan. 2019

LUZ, Adão Benvindo da. **Zeólitas: propriedades e usos industriais**. CETEM, 1995.

LUZ, Priscila Maria Sousa Gonçalves; MARTINS, Samir Ferreira; COSTA, Daniel Beserra; LUCENA, Lêda Christiane .. Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais. **Transportes**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 141-155, 30 abr. 2019. Programa de Pos Graduação em Arquitetura e Urbanismo. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v27i1.1594>.

MACARTHUR FOUNDATION. **Circularity indicators an approach to measuring circularity project overview**, 2019.

MALLICK, Rajib B.; KANDHAL, Prithvi S.; BRADBURY, Richard L. (2008). **Using Warm Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material in Asphalt Mixtures**. Washington: Transportation Research Board, 2008.

MANTALOVAS, Konstantinos; MINO, Gaetano di. Integrating Circularity in the Sustainability Assessment of Asphalt Mixtures. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 594, 13 jan. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12020594>.

MANTALOVAS, Konstantinos; MINO, Gaetano di. The Sustainability of Reclaimed Asphalt as a Resource for Road Pavement Management through a Circular Economic Model. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 8, p. 2234, 13 abr. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11082234>.

MARINHO FILHO, Paulo Germano Tavares; SANTOS, Alana Tamires Rodrigues dos; LUCENA, Lêda Christiane; TENÓRIO, Eduardo Antonio Guimarães. Rheological Evaluation of Asphalt Binder Modified with Nanoparticles of Titanium Dioxide. **International Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 10, p. 1195-1207, 3 jun. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40999-020-00525-4>.

MASCARENHAS, A. J. S.; Oliveira, E. C.; Pastore, H. O. Cadernos Temáticos. **Quim. Nova**, v. 5, n. 21., 2001

MASCARENHAS, Zila M.G.; PIAO, Zhengyin; VASCONCELOS, Kamilla L.; POULIKAKOS, Lily D.; BERNUCCI, Liedi L.B.. Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 858, p. 159862, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159862>.

MAY, H. P. (org.). **Economia do Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MCCUSKER L. B.; LIEBAU F.; ENGELHARDT G. Nomenclature of structural and compositional characteristics of ordered microporous and mesoporous materials with inorganic hosts. **Pure Appl. Chem.**, v. 73, p. 381- 394, 2001.

MCDANIEL, Rebecca.; ANDERSON, R.Michael. (2001). **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual**. Washington: Transportation Research Board, NCHRP REPORT 452

MCDANIEL, Rebecca; KOWALSKI, Karol; SHAH, Ayesha. Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement for Surface Mixtures. **Joint Transportation Research Program**, [S.L.], p. 1-34, 10 ago. 2012. FHWA/IN/JTRP2012/06. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5703/1288284314665>. Acesso em: 28 jan. 2019.

MCDANIEL, Rebecca; SOLEYMANI, Hamid; LAFAYETTE, West; ANDERSON, R.Michael, TURNER, Pamela; PETERSON, Robert. (2000). **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method**. Transportation Research Board, Project D9-12.

MELO NETO, O. M.; MENDONÇA, A. M. G. D.; RODRIGUES, J. K. G.; LIMA, R. K. B.; SILVANI, C.; SILVA, I. M. Rheological study of asphalt binder modified by cotton and copaiba oils. **Revista Cubana de Ingeniería**, v. 13, e315, 2022.

MELO NETO, Osires de Medeiros. **VIABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÁCIDO GRAXO DA BORRA DO ÓLEO DE SOJA**. 2022. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

MIAH, J.H.; KOH, S.C.L.; STONE, D.. A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 168, p. 846-866, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.187>.

MIKHAILENKO, Peter; ATAEIAN, Parinaz; BAAJ, Hassan. Extraction and recovery of asphalt binder: a literature review. **International Journal Of Pavement Research And Technology**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 20-31, 18 nov. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s42947-019-0081-5>. Acesso em: 26 ago. 2020.

MIRHOSSEINI, Ali Foroutan; KAVUSSI, Amir; TAHAMI, Seyed Amid; DESSOUKY, Samer. Characterizing Temperature Performance of Bio-Modified Binders Containing RAP Binder. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 30, n. 8, p. 1-11, ago. 2018.

Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002373](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002373). Acesso em: 10 ago. 2020.

MOGAWER, Walaa S.; FINI, Ellie H.; AUSTERMAN, Alexander J.; BOOSHEHRIAN, Abbas; ZADA, Boubacar. Performance characteristics of high reclaimed asphalt pavement containing bio-modifier. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 753-767, 15 out. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2015.1096820>. Acesso em: 14 set. 2020.

MOHAJERI, M.; MOLENAAR, A.A.A.; VEN, M.F.C. Van de. Blending of virgin bitumen and RA binder in mixtures with high amounts of RA. **Advances In Asphalt Materials**, [S.L.], p. 363-392, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-100269-8.00012-x>. Acesso em: 10 ago. 2020.

MOINS, B.; FRANCE, C.; BERGH, W. van Den; AUDENAERT, A.. Implementing life cycle cost analysis in road engineering: a critical review on methodological framework choices. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 133, p. 110284, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110284>.

MOLLENHAUER, K. (2010). DIRECT MAT: Dismantling and recycling Techniques for Road materials – WP4 D5 synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed road materials in asphalt (p. 154). Bouguenais: LCPC.

MOLLENHAUER, K., DE BOCK, L., OLESEN, E., BROSSEAUD, Y., GASPAR, L., MCNALLY, C., . . . WIK, O. (2010). **Deliverable D5: Synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed road materials in asphalt.**

MURRAY A, SKENE K, HAYNES K (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *J Bus Ethics* 140(3):369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>

MURRAY, C.J.L.; EZZATI, M.; FLAXMAN, A.; LIM, S.; LOZANO, R.; MICHAUD, C.; NAGHAVI, M.; SALOMON, J.; SHIBUYA, K.; VOS, T.; WIKLER, D.; LOPEZ, A.; (2012) **GBD 2010: design, definitions, and metrics**. Lancet 380:2063-2066.

NAHAR, S. N.; QIU, J.; SCHMETS, A. J. M.; SCHLANGEN, E.; SHIRAZI, M.; VEN, M. F. C. van de; SCHITTER, G.; SCARPAS, A. Turning Back Time: rheological and microstructural assessment of rejuvenated bitumen. **Transportation Research Record: Journal of the**, [S.L.], v. 2444, n. 1, p. 52-62, jan. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/2444-06>. Acesso em: 05 set. 2020.

NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (2017). Designing and Constructing SMA Mixtures – State of Practice. Quality Improvement Series 122. Lanham, MD, EUA.

NOFERINI, Luca; SIMONE, Andrea; SANGIORGI, Cesare; MAZZOTTA, Francesco. Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: effects of interaction between virgin and rap bitumen. **International Journal of Pavement Research And Technology**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 322-332, jul. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.011>. Acesso em: 10 ago. 2020.

NOGUEIRA, Régis Lopes; SOARES, Jorge Barbosa; SOARES, Sandra de Aguiar. Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 223, p. 1145-1153, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.128>.

O, Haoran; XU, Gang; GONG, Minghui; YANG, Jun. Recycling long-term-aged asphalts using bio-binder/plasticizer-based rejuvenator. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 147, p. 117-129, ago. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.066>. Acesso em: 14 set. 2020.

OLIVEIRA, J. A. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo**. 2013 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

OREŁKOVIĆ, Marko; PIRES, Gustavo Menegusso; BRESSI, Sara; VASCONCELOS, Kamilla; LO PRESTI, Davide. Quantitative assessment of the parameters linked to the blending between reclaimed asphalt binder and recycling agent: a literature review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 234, p. 1-14, fev. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117323>. Acesso em: 03 out. 2020.

OSMANI, F.; HETTIWATTE, M.; KSHIRSAGAR, S.; SENADHEERA, S.; ZHANG. Development of an environmental Life-Cycle Assessment (LCA) protocol for flexible pavements that integrates life-cycle components to a proprietary software. In: AL-QADI, H. C.; IMAD, L., et al., (org). **Pavement Life Cycle Assessment: Proceedings of the Symposium on Life-Cycle Assessment of Pavements (Pavement LCA 2017)**, April 12-13, 2017, Champaign, Illinois, USA. CRC Press, 2017.

OTTO, G.G. **Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**. 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

OZBAY, K.; JAWAD, D. (2006). **The Discount Rate in Life-Cycle Cost Analysis of Transportation Projects**. In: 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

PABLO-GALÁN, Liberto de. Diagenesis of Oligocene Vitric Tuffs to Zeolites, Mexican Volcanic Belt. **Clays And Clay Minerals**, [S.L.], v. 44, n. 3, p. 324-338, 1996. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1346/ccmn.1996.0440303>. Acesso em: 10 jul. 2020.

PARTL, M. N., BAHIA, H. U., CANESTRARI, F., ROCHE, C. D. L., BENEDETTO, H. D., PIBER, H., & SYBILSKI, D. **Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.

PASANDÍN, A.R.; NARDI, E.; PÉREZ-BARGE, N.; TORALDO, E.. Valorisation of lignin-rich industrial byproduct into half-warm mix reclaimed asphalt with enhanced performance. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 315, p. 125770, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125770>.

PEÑA, Claudia; CIVIT, Bárbara; GALLEGO-SCHMID, Alejandro; DRUCKMAN, Angela; PIRES, Armando Caldeira-; WEIDEMA, Bo; MIERAS, Eric; WANG, Feng; FAVA, Jim; CANALS, Llorenç Milà I. Using life cycle assessment to achieve a circular economy. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 215-220, 25 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-020-01856-z>.

PETRILLO, Antonella; FELICE, Fabio de; JANNELLI, Elio; AUTORINO, Claudio; MINUTILLO, Mariagiovanna; LAVADERA, Antonio Lubrano. Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 95, p. 337-355, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.027>.

PETRILLO, Antonella; FELICE, Fabio de; JANNELLI, Elio; AUTORINO, Claudio; MINUTILLO, Mariagiovanna; LAVADERA, Antonio Lubrano. Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 95, p. 337-355, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.027>.

PIRES, G. M. **A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation**. 2018. 304 f. Tese (Doutorado) - Curso de Philosophy in Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, 2018.

PIRES, G. M.; LO PRESTI, D. e AIREY, G. D. A practical approach to estimate the degree of binder activity of reclaimed asphalt materials. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 22, n. 5, p. 1093-1116, 16 Agos. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1663244>

PLATI, Christina. Sustainability Factors in Pavement Materials, Design, and Preservation Strategies: A Literature Review. **Construction and Building Materials**, v. 211, junho de 2019, p. 539–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>.

PODOLSKY, Joseph H.; SAW, Barrie; ELKASHEF, Mohamed; WILLIAMS, R. Christopher; COCHRAN, Eric W.. Rheology and mix performance of rejuvenated high RAP field produced hot mix asphalt with a soybean derived rejuvenator. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 22, n. 8, p. 1894-1907, 31 jan. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2020.1719190>.

PRADHAN, Sujit Kumar; SAHOO, Umesh Chandra. Evaluation of recycled asphalt mixtures rejuvenated with *Madhuca longifolia* (Mahua) oil. **International Journal Of Pavement Research And Technology**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 43-53, 23 jun. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42947-020-0279-6>.

PRATICÒ, Filippo G.; GIUNTA, Marinella; MISTRETTA, Marina; GULOTTA, Teresa Maria. Energy and Environmental Life Cycle Assessment of Sustainable Pavement Materials and Technologies for Urban Roads. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 704, 18 jan. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12020704>.

PROWELL, Brian D.; HURLEY, Graham C.; FRANK, Bob. Warm-Mix Asphalt: best practices. **Asphalt Pavements**, [S.L.], v. 1, n. 3, p. 1-68, 2012. Quality Improvement Publication 125.

QIAO, Yaning; DAVE, Eshan; PARRY, Tony; VALLE, Omar; MI, Lingyun; NI, Guodong; YUAN, Zhenmin; ZHU, Yuefeng. Life Cycle Costs Analysis of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Future Climate. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 19, p. 5414, 30 set. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11195414>.

QURASHI, Irfan Ajaz; SWAMY, Aravind Krishna (2018). Viscoelastic Properties of Recycled Asphalt Binder containing Waste Engine Oil. *Journal of Cleaner Production*, S0959652618302683-. doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.237

RAFIQ, Waqas; MUSARAT, Muhammad Ali; ALTAF, Muhammad; NAPIAH, Madzlan; SUTANTO, Muslich Hartadi; ALALOUL, Wesam Salah; JAVED, Muhammad Faisal; MOSAVI, Amir. Life Cycle Cost Analysis Comparison of Hot Mix Asphalt and Reclaimed

Asphalt Pavement: a case study. *Sustainability*, [S.L.], v. 13, n. 8, p. 4411, 15 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13084411>.

RAOUF, M. A.; WILLIAMS, R. C. Determination of pre-treatment procedure required for developing bio-binders from bio-oils. In: **Proc., 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium, 2009.**

RESENDE, N. G. A.; MONTE, M. B. M; PAIVA, P. R. P. **Zeólitas naturais**, cap. 39. Rochas e Minerais Industriais – CETEM, 2ª edição, 2008.

RIGAMONTI, Lucia; MANCINI, Eliana. Life cycle assessment and circularity indicators. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, [S.L.], v. 26, n. 10, p. 1937-1942, 7 set. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-021-01966-2>.

RINALDINI, E.; SCHUETZ, P.; PARTL, M.N.; TEBALDI, G.; POULIKAKOS, L.D. Investigating the blending of reclaimed asphalt with virgin materials using rheology, electron microscopy and computer tomography. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 67, p. 579-587, dez. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.07.025>. Acesso em: 09 out. 2020.

ROMEIRO, A. R. Economia ou economia política da sustentabilidade. In: MAY, H. P. (org.). *Economia do Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. Cap. 1. p. 3-32.

RUIZ, Leidy Vanessa Espinosa. **Analysis of bio-binder for paving as a total substitute for asphalt binder**. 2020. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

SAIDANI M, YANNOU B, LEROY Y, CLUZEL F, KENDALL A (2019) A taxonomy of circular economy indicators. *J Clean Prod* 207:542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>

SANCHEZ-ALONSO, Elsa; VALDES-VIDAL, Gonzalo; CALABI-FLOODY, Alejandra. Experimental Study to Design Warm Mix Asphalts and Recycled Warm Mix Asphalts Using Natural Zeolite as Additive for Sustainable Pavements. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 980-993, 29 jan. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su12030980>. Acesso em: 01 abr. 2020.

SANTOS, João; FLINTSCH, Gerardo; FERREIRA, Adelino. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 116, p. 15-31, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.025>.

SCHENCK, R. (2000). Using LCA for procurement decisions: A case study performed for the U.S. environmental protection agency. *Environmental Progress*, 19(2), 110–116. doi:10.1002/ep.670190209.

SENGOZ, Burak; OYLUMLUOGLU, Julide. Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 45, p. 173-183, ago. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.097>. Acesso em: 10 ago. 2020.

SENGOZ, Burak; TOPAL, Ali; GORKEM, Cagri. Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 43, p. 242-252, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.026>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.026>. Acesso em: 16 abr. 2020.

SENGOZ, Burak; TOPAL, Ali; ONER, Julide; YILMAZ, Mehmet; DOKANDARI, Peyman Aghazadeh; KOK, Baha Vural. Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, [S.L.], p. 1-11, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3311/ppci.8498>. Acesso em: 16 abr. 2020.

SHIRODKAR, Prashant; MEHTA, Yusuf; NOLAN, Aaron; SONPAL, Khyati; NORTON, Alan; TOMLINSON, Chris; DUBOIS, Eric; SULLIVAN, Patrick; SAUBER, Robert. A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 150-155, jan. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.045>. Acesso em: 08 set. 2018.

SOARES, F. S. C. **Caracterização e aplicações de zeólitas naturais**. 2010. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

SONG, Weimin; HUANG, Baoshan; SHU, Xiang. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 192, p. 191-198, ago. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.269>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SOUZA FILHO, A. C.; SILVEIRA, L. E. M.; SANT'ANA, H. B.; SOARES, J. B. Produção e caracterização mecânica de misturas asfálticas obtidas a temperatura intermediárias pela adição de zeólitas. In: **Encontro de Asfalto**, 18., 2006, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2006.

SOUZA, Luciana de Paula. **Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e de análise do custo do ciclo de vida em pavimentação**. 2017. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SOUZA, Miria de Almeida. **Metabolômica macrofungos cultivados em torta do caroço do algodão por espectrometria de massa**. 2020. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Química, Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

SUZUKI, Karina Yuriko. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

TAHERKHANI, H.; NOORIAN, F. Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, v. 21, n. 5, p. 1238-1257, 2020.

TAO, Mingjiang; MALLICK, Rajib B.. Effects of Warm-Mix Asphalt Additives on Workability and Mechanical Properties of Reclaimed Asphalt Pavement Material. **Journal Of The Transportation Research Board**: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 18, n. 2126, p. 151-160, maio 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/2126-18>. Acesso em: 18 mar. 2020.

TASSIRI, Sarawut; KANITPONG, Kunnawee; SAWANGSURIYA, Auckpath. Effects of Additives on the Performance Properties of Warm Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. **International Journal Of Pavement Research And Technology**, [S.L.], v. 15, n. 5, p. 1239-1250, 3 ago. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42947-021-00085-3>.

TAYH, Sady. A.; MUNIANDY, Ratnasamy; HASSIM, Salihudin; JAKARNI, Fauzan; ABURKABA, Eltaher. An overview of utilization of bio-oil in hot mix asphalt. **Walia**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 131-141, 2014.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, C.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

THIVES, L.P., GHISI, E. Asphalt mixtures emission and energy consumption: a review. **Renew. Sustain. Energy Ver**, v. 72, p. 473-484, 2017.

TRAN, Nam; TAYLOR, Adam; WILLIS, Richard. Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP contents. **Asphalt Pavements**, [S.L.], p. 1661-1670, jun. 2012. NCAT Report 12-05. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1201/b17219-201>. Acesso em: 10 ago. 2020.

TSCHERNICH, Rudy W. **Zeolites of the world**. Arizona: Geoscience Press, 1992. 563 p.

UMPIERRE, A. P.; MACHADO, F. Glycerochemistry and Glycerol Valorization. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 106-116, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20130010>. Acesso em: 16 jul. 2020.

VAIANA, Rosolino; IUELE, Teresa; GALLELLI, Vincenzo. Warm Mix Asphalt with Synthetic Zeolite: a Laboratory Study on Mixes: a laboratory study on mixes workability. **International Journal Of Pavement Research And Technology**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 562-569, set. 2013. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6\(5\).562](http://dx.doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(5).562). Acesso em: 29 mar. 2020.

VALDES-VIDAL, G.; CALABI-FLOODY, A.; SANCHEZ-ALONSO, E.. Performance evaluation of warm mix asphalt involving natural zeolite and reclaimed asphalt pavement (RAP) for sustainable pavement construction. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 174, p. 576-585, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.149>.

VANDEWALLE, David; ANTUNES, Vítor; NEVES, José; FREIRE, Ana Cristina. Assessment of Eco-Friendly Pavement Construction and Maintenance Using Multi-Recycled RAP Mixtures. **Recycling**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 17, 14 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/recycling5030017>.

VARÃO, L. H. R.; SILVA, T. A. L.; ZAMORA, H. D.; Pasquini, D. Óleo de algodão como matéria-prima para a indústria brasileira de biodiesel. *Revista Brasileira de Energia*. Vol. 24. nº 1. 2018.

VIDAL, Rosario; MOLINER, Enrique; MARTÍNEZ, Germán; RUBIO, M. Carmen. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 74, p. 101-114, maio 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>. Acesso em: 16 jan. 2020.

VIEIRA, Luiz H.; RODRIGUES, Mariana V.; MARTINS, Leandro. SEED-ASSISTED BEHAVIOR OF ZEOLITE CRYSTALLIZATION. **Química Nova**, [S.L.], p. 1515-1524,

2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140229>. Acesso em: 21 jun. 2020.

VISSCHER, Joëlle de; VERVAECKE, Frederik; VANELSTRAETE, Ann; SOENEN, Hilde; TANGHE, Tine; REDELIUS, Per. Asphalt Production at Reduced Temperatures using Zeolites and the Impact on Asphalt Performance. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 65-81, jan. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2010.9690260>.

WANG, Fuyu; FANG, Yuan; CHEN, Zhao; WEI, Haibin. Effect of waste engine oil on asphalt reclaimed properties. **Aip Conference Proceedings**, [S.L.], jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5041396>.

WASIUDDIN, Nazimuddin M.; SELVAMOHAN, Selvaratnam; ZAMAN, Musharraf M.; GUEGAN, Marie Louise Thérèse Anne. Comparative Laboratory Study of Sasobit and Aspha-Min Additives in Warm-Mix Asphalt. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 1998, n. 1, p. 82-88, jan. 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/1998-10>. Acesso em: 15 jul. 2020.

WEETMAN, C. Economia circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa. Tradução Afonso Celso da Cunha Serra. São Paulo: Autêntica Business, 2020.

WEST, R.; TIMM, D.; WILLIS, R.; POWELL, B.; TRAN, N.; WATSON, D.; Sakhaeifar, M.; Brown, R.; Robbins, M.; Vargas-Nordbeck, A.; Villacorta, F. L.; Guo, X.; Nelson, J. PHASE IV NCAT PAVEMENT TEST TRACK FINDINGS. **Asphalt Pavements**, [S.L.], p. 1-184, 2012. NCAT Report 12-10.

WEST, Randy; WILLIS, James Richard; MARASTEANU, Mihai. Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. **Transportation Research Board**, [S.L.], p. 1-161, 21 jun. 2013. NCHRP REPORT 752. Project 09-46. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17226/22554>. Acesso em: 23 jul. 2020.

WILLIAMS, Brett A.; WILLIS, J. Richard; ROSS, T. Carter. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2018. **Asphalt Pavements**, [S.L.], p. 1-45, set. 2019.

WILLIS, J. Richard; TURNER, Pamela; PADULA, Flavio de Goes; TRAN, Nam; JULIAN, Grant. Effects of Changing Virgin Binder Grade and Content on High Reclaimed Asphalt Pavement Mixture Properties. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 2371, n. 1, p. 66-73, jan. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/2371-08>. Acesso em: 08 set. 2020.

WOSZUK, Agnieszka; FRANUS, Wojciech. A Review of the Application of Zeolite Materials in Warm Mix Asphalt Technologies. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 293-308, 16 mar. 2017. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app7030293>. Acesso em: 04 abr. 2020.

WOSZUK, Agnieszka; FRANUS, Wojciech. Properties of the Warm Mix Asphalt involving clinoptilolite and Na-P1 zeolite additives. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 114, p. 556-563, jul. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.188>. Acesso em: 01 abr. 2020.

WOSZUK, Agnieszka; ZOFKA, Adam; BANDURA, Lidia; FRANUS, Wojciech. Effect of zeolite properties on asphalt foaming. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 139, p. 247-255, maio 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.054>. Acesso em: 04 ago. 2020.

WU, S.; QIU, J.; MO, L.; YU, J.; ZHANG, Y.; LI, B. Investigation of Temperature Characteristics of Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures. **Resources, conservation, and Recycling**. v. 51, n. 3, p. 610–620. 2007.

XIAO, Feipeng; HOU, Xiangdao; AMIRKHANDANIAN, Serji; KIM, Kwang W. Superpave evaluation of higher RAP contents using WMA technologies. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 112, p. 1080-1087, jun. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.024>. Acesso em: 16 jan. 2020.

XU, Ruren; PANG, Wenqin; YU, Jihong; HUO, Qisheng; CHEN, Jiesheng. **Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials**. Asia: John Wiley & Sons, 2007. 673 p.

YANG, Rebekah; KANG, Seunggu; OZER, Hasan; AL-QADI, Imad L.. Environmental and economic analyses of recycled asphalt concrete mixtures based on material production and potential performance. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 104, p. 141-151, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.014>.

YIN, Fan; ARÁMBULA-MERCADO, Edith; MARTIN, Amy Epps; NEWCOMB, David; TRAN, Nam. Long-term ageing of asphalt mixtures. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 2-27, 2 jan. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1266739>. Acesso em: 17 out. 2020.

YOUSEFI, Afshar; BEHNOOD, Ali; NOWRUZI, Ata; HAGSHENAS, Hamzeh. Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 268, p. 121200, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121200>.

ZAUMANIS, Martins; MALLICK, Rajib B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. **International Journal Of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 39-55, 6 mar. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>. Acesso em: 06 ago. 2020.

ZHU, Haoran; XU, Gang; GONG, Minghui; YANG, Jun. Recycling long-term-aged asphalts using bio-binder/plasticizer-based rejuvenator. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 147, p. 117-129, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.066>.

ZHU, Junqing; MA, Tao; FANG, Zhanyong. Characterization of agglomeration of reclaimed asphalt pavement for cold recycling. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 240, p. 1-8, abr. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117912>. Acesso em: 02 nov. 2020.

ZIARI, Hassan; MONIRI, Ali; BAHRI, Parastoo; SAGHAFI, Yasha. Evaluation of performance properties of 50% recycled asphalt mixtures using three types of rejuvenators. **Petroleum Science And Technology**, [S.L.], v. 37, n. 23, p. 2355-2361, 1 out. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10916466.2018.1550505>.

ZIEGLER, Christian Rafael; BARROS, Ablenya Grangeiro de; SILVA, Conrado Cesar Vitorino Pereira da; COSTA, Daniel Beserra; RODRIGUES, John Kennedy Guedes. Avaliação da adição do óleo de algodão bruto nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo. In: Congresso nacional de pesquisa em transporte da ANPET, 21., 2017, Recife. **Anais [...]**. Recife: Anpet, 2017. p. 1-13.

ZUBARAN, M. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto**. 2014. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE, Rio de Janeiro, 2014.

APÊNDICE A - Composição Unitária de Custos para a etapa de produção da mistura asfáltica de referência

CGCIT		DNIT						
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		São Paulo						
Custo Unitário de Referência		Outubro/2022		Produção:	1,00	t		
6416078 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais		Valores em reais (R\$)						
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total	
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo		
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	0,010	1,00	0,00	71,07	40,03	0,71	
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	0,010	0,80	0,20	198,47	94,50	1,78	
E9021	Grupo gerador - 456 kVA	0,010	1,00	0,00	442,90	21,37	4,45	
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	0,020	1,00	0,00	53,16	36,31	1,07	
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	0,004	1,00	0,00	1.103,72	585,50	3,96	
SINAPI 93433	Usina de mistura asfáltica à quente, tipo contra fluxo, prod 40 a 80 t/h	0,006	1,00	0,00	2.421,97	186,17	15,64	
		Custo horário total de equipamentos					27,60	
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total		
P9824	Servente	0,040	h			23,00	0,92	
		Custo horário total de mão de obra					0,92	
		Custo horário total de execução					28,53	
		Custo unitário total de execução					28,53	
		Custo do FIC					-	
		Custo do FIT					-	
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário		
M0028	Areia média	0,016	m³			145,46	2,34	
M0191	Brita 1 (12,5mm)	0,154	m³			125,28	19,31	
M0191	Brita 1 (19,0mm)	0,081	m³			125,28	10,21	
M0344	Cal hidratada - a granel	10,000	kg			0,44	4,44	
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,052	t			3.189,34	165,85	
M1941	Óleo tipo A1	8,000	l			6,45	51,57	
M1135	Pó de pedra	0,109	m³			118,50	12,91	
		Custo unitário total de material					266,62	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário		
		Custo unitário total de atividades auxiliares					0,00	
		Subtotal					295,15	
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo unitário		Custo Unitário	
M0028	Areia média - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,040	t			1,71	0,07
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,410	t			1,71	0,70
M0191	Brita 1 (19,0mm)- Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,220	t			1,71	0,38
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914363	0,010	t			18,13	0,18
M1135	Pó de pedra- Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,268	t			1,71	0,46
		Custo unitário total de tempo fixo					1,79	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário	Custo Unitário	
M0028	Areia média - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,040	tkm	50,0	1,19	2,38	
M0191	Brita 1(12,5mm) - Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,410	tkm	50,0	1,19	24,40	
M0191	Brita 1(19,0mm)- Caminhão basculante 10 m³	5914359	0,220	tkm	50,0	1,19	13,09	
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914359	0,010	tkm	50,0	0,60	0,30	
M1135	Pó de pedra- Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,268	tkm	50,0	1,19	15,95	
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70- Caminhão com capacidade de 20000l em rodovia pavimentada para DMT igual ou inferior a 100km. AF_02/2016	5914619	0,052	tkm	50,0	1,84	4,78	
		Custo unitário total de transporte					60,90	
		Custo unitário direto total					357,83	

APÊNDICE B - Composição Unitária de Custos para a etapa de produção das misturas asfáltica recicladas

CGCIT																DNIT	
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO								São Paulo								Produção: 1,00 t	
Custo Unitário de Referência								Outubro/2022								Valores em reais (R\$)	
6416098 Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Utilização		Custo Horário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Operat	Imp rot	Produ	Improd	Custo Tot	Custo Tot				
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,00	0,00	71,07	40,03	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,86	0,14	198,47	94,50	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
E9021	Grupo gerador - 456 kVA	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,00	0,00	442,90	21,37	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	1,00	0,00	53,16	36,31	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	1,00	0,00	1.103,72	585,50	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96
SINAPI 93433	Usina de mistura asfáltica à quente, tipo contra fluxo, prod 40 a 80 t/h	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	1,00	0,00	2.421,97	186,17	15,64	15,64	15,64	15,64	15,64	15,64
Custo horário total de equipamentos												27,67	27,67	27,67	27,67	27,67	27,67
B - MÃO DE OBRA		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33			Custo Horário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Unid			Custo Horário	Custo Tot	Custo Tot				
P9824	Servente	0,0402	0,0402	0,0402	0,0402	0,0402	0,0402	h	23,00		0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
												0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
												28,59	28,59	28,59	28,59	28,59	28,59
												28,59	28,59	28,59	28,59	28,59	28,59
												-	-	-	-	-	-
												-	-	-	-	-	-
C - MATERIAL		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33			Preço Unitário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Unid			Preço Unitário	Custo Tot	Custo Tot				
M0191	Brita 1 (12,5mm)	0,130	0,120	0,105	0,130	0,120	0,105	m³	125,28		16,30	14,98	13,19	16,30	14,98	13,19	
M0191	Brita 1 (19,0mm)	0,089	0,084	0,089	0,089	0,084	0,089	m³	125,28		11,14	10,58	11,14	11,14	10,58	11,14	
M0344	Cal hidratada - a granel	10,000	10,000	10,000	7,000	7,000	7,000	kg	0,44		4,44	4,44	4,44	3,11	3,11	3,11	
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,042	0,034	0,030	0,044	0,036	0,033	t	3.189,34		134,72	107,93	94,72	140,33	114,82	105,25	
M2093	Material fresado	0,060	0,100	0,131	0,060	0,100	0,131	m³	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
M1941	Óleo tipo A1	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	l	6,45		51,57	51,57	51,57	51,57	51,57	51,57	
M1135	Pó de pedra	0,065	0,044	0,031	0,065	0,044	0,031	m³	118,50		7,71	5,20	3,71	7,71	5,20	3,71	
M0028	Areia média	0,020	0,020	0,012	0,020	0,020	0,012	m³	145,46		2,92	2,92	1,75	2,92	2,92	1,75	
	Óleo de algodão	1,913	2,348	3,587	0,000	0,000	0,000	l	5,81		11,11	13,64	20,84	0,00	0,00	0,00	
	Zeólita	0,000	0,000	0,000	3,000	3,000	3,000	kg	6,85		0,00	0,00	0,00	20,55	20,55	20,55	
Custo unitário total de material												239,90	211,26	201,36	253,62	223,72	210,26
D - ATIVIDADES AUXILIARES		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33			Custo Unitário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Unidade			Custo Unitário	Custo	Custo	Custo	Custo	Custo	Custo

											Unit	Unit	Unit	Unit	Unit	Unit	
Custo unitário total de atividades auxiliares											0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Subtotal											268,4909	239,8463	229,9473	282,2077	252,3127	238,8502	
E - TEMPO FIXO	Código	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Unid	Custo Unitário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	
											Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant
M0191	Brita 1 (12,5mm)- basculante 10 m³	Caminhão	5914647	0,346	0,318	0,280	0,346	0,318	0,280	t	1,71	0,59	0,54	0,48	0,59	0,54	0,48
M0191	Brita 1 (19,0mm)- basculante 10 m³	Caminhão	5914647	0,240	0,228	0,240	0,240	0,228	0,240	t	1,71	0,41	0,39	0,41	0,41	0,39	0,41
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³		5914363	0,010	0,010	0,010	0,007	0,007	0,007	t	18,13	0,18	0,18	0,18	0,13	0,13	0,13
M2093	Material fresado - basculante 10 m³	Caminhão	5915407	0,150	0,250	0,330	0,150	0,250	0,330	t	2,60	0,39	0,65	0,86	0,39	0,65	0,86
M1135	Pó de pedra-basculante 10 m³	Caminhão	5914647	0,160	0,108	0,077	0,160	0,108	0,077	t	1,71	0,27	0,18	0,13	0,27	0,18	0,13
M0028	Areia média-basculante 10 m³	Caminhão	5914647	0,050	0,050	0,030	0,050	0,050	0,030	t	1,71	0,09	0,09	0,05	0,09	0,09	0,05
	Zeólita - a granel - Caminhão silo 30 m³		5914363	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,003	t	18,13	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05	0,05
Custo unitário total de tempo fixo											1,93	2,04	2,11	1,93	2,04	2,11	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Código	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Unid	DMT	Custo Unitário	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	
											Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant
M0191	Brita 1 (12,5mm)- basculante 10 m³	Caminhão	5914359	0,346	0,318	0,280	0,346	0,318	0,280	tkm 50,0	1,19	20,59	18,92	16,66	20,59	18,92	16,66
M0191	Brita 1 (19,0mm)- basculante 10 m³	Caminhão	5914359	0,240	0,228	0,240	0,240	0,228	0,240	tkm 50,0	1,19	14,28	13,57	14,28	14,28	13,57	14,28
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³		5914366	0,010	0,010	0,010	0,007	0,007	0,007	tkm 50,0	0,60	0,30	0,30	0,30	0,21	0,21	0,21
M2093	Material fresado - basculante 10 m³	Caminhão	5914359	0,150	0,250	0,330	0,150	0,250	0,330	tkm 50,0	1,19	8,93	14,88	19,64	8,93	14,88	19,64
M1135	Pó de pedra-basculante 10 m³	Caminhão	5914359	0,160	0,108	0,077	0,160	0,108	0,077	tkm 50,0	1,71	13,68	9,23	6,58	13,68	9,23	6,58
M0028	Areia média-basculante 10 m³	Caminhão	5914359	0,050	0,050	0,030	0,050	0,050	0,030	tkm 50,0	1,71	4,28	4,28	2,57	4,28	4,28	2,57
	Zeólita - a granel - Caminhão silo 30 m³		5914366	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,003	tkm 50,0	0,60	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	0,09
	Óleo de algodão-tanque 13,0001	Caminhão	SINAPI 93177	0,002	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000	tkm 50,0	1,19	0,16	0,20	0,30	0,00	0,00	0,00
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70- Caminhão tanque 13,0001		SINAPI 93177	0,042	0,034	0,030	0,044	0,036	0,033	tkm 50,0	1,84	3,89	3,11	2,73	4,05	3,31	3,04
Custo unitário total de transporte											66,10	64,48	63,06	66,10	64,48	63,06	
Custo unitário direto total											336,52	306,36	295,12	350,24	318,83	304,02	

APÊNDICE C - Composição Unitária de Custos para a etapa de construção do revestimento do pavimento utilizando a da mistura asfáltica de referência

CGCIT							DNIT	
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO			São Paulo	FIC	0,00453			
Custo Unitário de Referência			Outubro/2022	Produção:	1,00		t	
4011463 Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais								Valores em reais (R\$)
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo	
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	Horário Total	
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	0,010	0,71	0,29	236,79	109,41	2,01	
E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	0,010	0,82	0,18	278,33	95,95	2,46	
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	0,010	1,00	0,00	334,39	143,84	3,36	
Custo horário total de equipamentos							7,83	
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total		
P9824	Servente	0,080	h	23,00		1,85		
Custo horário total de mão de obra							1,85	
Custo horário total de execução							9,68	
Custo unitário total de execução							9,68	
							Custo do FIC	
							Custo do FIT	
							-	
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário			
Custo unitário total de material							0,00	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário			
6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	1,020	t	357,83	364,98			
Custo unitário total de atividades auxiliares							364,98	
Subtotal							374,6590	
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário			
6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Caminhão basculante 10 m³	5914649	1,020	t	7,53	7,68		
Custo unitário total de tempo fixo							7,68	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário		
6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Caminhão basculante 10 m³	5914359	1,020	tkm	50,0	1,19	60,69	
Custo unitário total de transporte							60,69	
Custo unitário direto total							443,03	

APÊNDICE D - Composição Unitária de Custos para a etapa de construção do revestimento do pavimento utilizando mistura asfáltica reciclada

CGCIT												DNIT									
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO							São Paulo				FIC		0,00453								
Custo Unitário de Referência							Outubro/2022				Produção:		1,00 t								
4011478 Concreto asfáltico reciclado em usina com adição de asfalto - brita comercial							Valores em reais (R\$)														
A - EQUIPAMENTOS		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Utilização		Custo Horário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33				
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Operat	Improt	Produ	Improd	Custo Total	Custo H	Custo H							
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,71	0,29	236,79	109,41	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01				
E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,82	0,18	278,33	95,95	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46				
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	1,00	0,00	334,39	143,84	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36				
Custo horário total de equipamentos												7,83	7,83	7,83	7,83	7,83	7,83				
B - MÃO DE OBRA		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Unid		Custo Horário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33				
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant					Custo Total	Custo H	Custo H							
P9824	Servente	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	h		23,00		1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85				
Custo horário total de execução												9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68				
Custo unitário total de execução:												9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68				
Custo do FIC												0,00453	0,00453	0,00453	0,00453	0,00453	0,00453				
Custo do FIT												-	-	-	-	-	-				
C - MATERIAL		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Unid		Preço Unitário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33				
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant					Custo Unitário									
Custo unitário total de material												0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
D - ATIVIDADES AUXILIARES		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Unid		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33						
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant			Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário	Custo Unitário						
6416098	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial	1,020						t		336,52	306,36	295,12	350,24	318,83	304,02	343,25	312,49	301,02	357,24	325,21	310,10
Custo unitário total de atividades auxiliares												343,25	312,49	301,02	357,24	325,21	310,10				
Subtotal												352,9251	322,1680	310,6969	366,9162	334,8837	319,7779				
E - TEMPO FIXO		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Unid		Custo Unitário		MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33				
		Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant					Custo Unitário									
6416098	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial - Caminhão basculante 10 m³	5914649	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	t		7,53	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68				
Custo unitário total de tempo fixo												7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68				
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Cód	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33	Unidade	DMT	Custo	MAR-BL4%	MAR-BL6%	MAR-BL10%	MAR-Z15	MAR-Z25	MAR-BLZ33				

			BL4%	BL6%	BL10%	Z15	Z25	BLZ33		Unitário							
			Quant	Quant	Quant	Quant	Quant	Quant			P	BL4%	BL6%	BL10%	Z15	Z25	BLZ33
											Custo Unitário						
6416098	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial - Caminhão basculante 10 m³	5914359	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	tkm	50	1,19	60,69	60,69	60,69	60,69	60,69	60,69
Custo unitário total de transporte											60,69	60,69	60,69	60,69	60,69	60,69	
Custo unitário direto total											421,30	390,54	379,07	435,29	403,26	388,15	

APÊNDICE E - Composição Unitária de Custos para a etapa de fim de vida do pavimento

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		São Paulo			Produção:		
Custo Unitário de Referência		Outubro/2022			1,00		m ³
4011479 Fresagem contínua de revestimento asfáltico							Valores em reais (R\$)
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	Horário Total
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	0,010	0,55	0,45	338,53	79,26	2,23
E9678	Fresadora a frio - 410 kW	0,010	1,00	0,00	1.390,83	477,25	13,96
E9697	Minicarregadeira de pneus com vassoura de 1,8 m - 45,50 kW	0,020	0,83	0,17	147,63	58,40	2,66
E9156	Soprador de ar costal - 2,6 kW	0,020	1,00	0,00	4,51	0,41	0,09
		Custo horário total de equipamentos					18,94
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade		Custo Horário	Custo Horário Total	
P9824	Servente	0,050	h		23,00		1,15
		Custo horário total de mão de obra					1,15
		Custo horário total de execução					20,10
		Custo unitário de execução					20,10
		Custo do FIC					-
		Custo do FIT					-
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade		Preço Unitário	Custo Unitário	
M1974	Dente de corte para fresadora de 410 kW	0,648	un		40,08		25,97
M2148	Porta-dente de corte para fresadora e recicladora a frio	0,001	un		390,59		0,53
		Custo unitário total de material					26,50
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade		Custo Unitário	Custo Unitário	
		Custo unitário total de atividades auxiliares					0,00
		Subtotal					46,60
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade		Custo Unitário	
M3507	Revestimento asfáltico - Caminhão basculante 10 m ³	5915440	1,000	t		2,80	2,80
		Custo unitário total de tempo fixo					2,80
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Código	Quantidade	Unidade	DMT P	Custo Unitário	Custo Unitário
M3507	Revestimento asfáltico - Caminhão basculante 10 m ³	5914359	1,000	tkm	50,0	1,19	59,50
		Custo unitário total de transporte					59,50
		Custo unitário direto total					108,90