



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

JEOVANESA RÉGIS CARVALHO

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE ELEVADAS QUANTIDADES DE
MATERIAL FRESADO**

Campina Grande – PB

2022

JEOVANESA RÉGIS CARVALHO

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE ELEVADAS QUANTIDADES DE
MATERIAL FRESADO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Campina Grande – PB

2022

C331a Carvalho, Jeovanesa Régis.
Avaliação de diferentes tecnologias de misturas asfálticas mornas com a incorporação de elevadas quantidades de material fresado / Jeovanesa Régis Carvalho. – Campina Grande, 2022.
191 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.
"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena".
Referências.

1. Misturas Asfálticas Recicladas Mornas. 2. Tecnologias Sustentáveis. 3. Reciclagem de Pavimentos. 4. Desempenho Mecânico. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 625.85(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

JEOVANESA RÉGIS CARVALHO

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE ELEVADAS QUANTIDADES DE MATERIAL FRESADO

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia

Tese aprovada em: 02/09/2022

Pela Banca Examinadora:

(Assinatura): _____

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio, de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Examinadora Interna: Prof. Dsc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Examinador Externo: Prof. Dsc. Fernando Silva Albuquerque
Universidade Federal de Sergipe –UFS

(Assinatura): _____

Examinadora externa: Prof. Dsc. Isabelle Marie Trindade Bezerra (UFCG)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Examinador Externo: Dsc. Jonny Dantas Patrício
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



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): JEOVANESA RÉGIS CARVALHO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR.^a LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR. JONNY DANTAS PATRÍCIO – UFCG – EXAMINADOR EXTERNO, DR. FERNANDO SILVA ALBUQUERQUE - UFS - EXAMINADOR EXTERNO, DR.^a IZABELLE MARIE TRINDADE BEZERRA - UFCG - EXAMINADORA EXTERNA, (PORTARIA 37/2022). / TITULO DA DEFESA: “AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MISTURAS ASFÁTICAS MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE ELEVADAS QUANTIDADES DE MATERIAL FRESADO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, 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, 02 DE SETEMBRO DE 2022**
- 5.
- 6.
- 7.
8. **FERNANDO SILVA ALBUQUERQUE - UFS - EXAMINADOR EXTERNO**



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/09/2022, às 08:37, 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 05/09/2022, às 11:45, 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 05/09/2022, às 20:30, 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 **Fernando Silva Albuquerque, Usuário Externo**, em 05/09/2022, às 23:12, 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 **Jeovanesa Régis Carvalho, Usuário Externo**, em 06/09/2022, às 07:54, 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 06/09/2022, às 09:14, 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 **IZABELLE MARIE TRINDADE BEZERRA DA COSTA LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/09/2022, às 11:54, 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 **2634728** e o código CRC **938D42F9**.

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.”

Provérbios 16:3

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me guiou durante esses anos em minha carreira acadêmica e que me capacitou em cada desafio. A Ele toda honra e toda glória.

À minha mãe Eclésia Régis, por ser minha maior apoiadora, por me ensinar bons caminhos e por prover das condições necessárias para que eu pudesse me dedicar aos estudos sem outras preocupações, a ela todo amor. Agradeço ao meu pai Rivaldo Carvalho (in memoriam), que apesar de sua morte precoce, pôde deixar como legado seu exemplo de dedicação e caráter.

Às minhas irmãs Danielle e Flávia, por serem minhas melhores amigas, pelo apoio incondicional e pela força nos momentos difíceis, amo vocês. Ao meu sobrinho Davi Luiz, por alegrar as nossas vidas. Meu irmão Lucas e meu cunhado Tiago, agradeço pela amizade e incentivo.

Aos meus tios Edlene e Herick, meus priminhos Maria Helena e Pedro Antônio, pelo carinho e suporte. Ao meu padrasto Flávio, meu avô Edmilson, minhas tias Mônica, Olga e Hortência, agradeço pelo companheirismo e torcida.

Ao meu orientador, professor Adriano Elísio, que aceitou me acompanhar desde a iniciação científica, com paciência e disponibilidade. Sou muito grata pela sua perseverança em me orientar.

À Maria Eloisa que, como aluna de PIVIC, me ajudou nos ensaios de laboratório.

Aos amigos com quem compartilhei o dia-a-dia do laboratório, Arthur, Érika, Sonaly, Conrado, Thamires, Priscila, Osires, Paulo e Jonny pela boa convivência e amizade durante todos os momentos dessa jornada.

Aos professores Lêda Lucena, John Kennedy, Olavo Francisco, William Paiva e Veruschka Escarião pelo conhecimento compartilhado ao longo desses anos de LEP.

A Joseildo e Jadilson pela ajuda na execução de várias etapas deste trabalho. A Ladjane pela companhia diária.

Aos professores Fernando Albuquerque e Isabelle Marie pelas contribuições enquanto membros da banca e pelas palavras de carinho.

À empresa Celta Brasil Ltda. que forneceu o aditivo WARMIX-CEL (zeólita) e à empresa ArrMaz do Brasil Ltda. por ter fornecido o aditivo WarmGrip.

À FAPESQ pela bolsa de estudos concedida.

À UFCG e ao PPGECA por viabilizarem o curso de doutorado.

RESUMO

As tecnologias de misturas asfálticas mornas (MAMs) e a reciclagem de revestimentos asfálticos fresados (RAP) têm recebido muitas atenções nos últimos anos devido aos seus benefícios econômicos e ambientais. As MAMs podem ser usinadas e compactadas em temperaturas mais baixas que as temperaturas a quente tradicionais proporcionando a redução do consumo de energia e das emissões de CO₂. Já a utilização do RAP pode substituir uma certa proporção de ligante asfáltico e agregados virgens necessários para a construção de novos pavimentos asfálticos, que possibilita o descarte ambientalmente adequado do RAP e redução dos custos de produção. Na presente pesquisa foram avaliados os efeitos da adição de três tecnologias disponíveis no mercado para fabricação das MAMs (óleo de girassol, WarmGrip® e zeólita natural) com diferentes porcentagens de material fresado (30 e 70% de RAP), como forma de viabilizar a reciclagem de RAP em maiores taxas de participação da mistura final. Os ligantes oriundos do RAP e os novos ligantes modificados pelos aditivos de MAMs foram caracterizados pela sua composição química e por meio de ensaios reológicos. Foi analisado também o grau de ativação do ligante do RAP para a determinação da quantidade mínima de ligante do RAP que pode ser considerada ativa na formulação de uma nova mistura asfáltica contendo materiais fresados. Os aditivos foram incorporados nas misturas asfálticas recicladas e os efeitos dessa adição sobre a resistência à tração indireta, ao dano por umidade induzida, ao módulo de resiliência, à vida de fadiga, a resistência à deformação permanente e o módulo dinâmico foram avaliados. Os resultados demonstraram que não se deve projetar misturas asfálticas recicladas com a suposição de ativação total do ligante do RAP. A elevação do teor de RAP aumentou a rigidez das misturas e conseqüentemente proporcionou o crescimento da resistência a deformação permanente. No entanto, o óleo de girassol e a zeólita natural apresentaram propriedades rejuvenescedoras e atuaram diminuindo a rigidez dessas misturas. As misturas recicladas mornas exibiram aumento do número de ciclos até a falha no ensaio de fadiga e maior adesão e coesão, verificada por meio do ensaio de dano por umidade induzida, com ênfase para as misturas recicladas com os ligantes modificados pelo WarmGrip. Portanto, as misturas recicladas mornas possibilitaram a incorporação de quantidades mais elevadas de RAP quando comparadas com as misturas asfálticas recicladas a quente convencionais, principalmente as misturas recicladas mornas com até 30% de RAP.

Palavras-chave: Tecnologias sustentáveis, reciclagem de pavimentos, misturas asfálticas recicladas mornas, desempenho mecânico

ABSTRACT

Warm Mix Asphalt (WMA) technologies and the Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) have received much attention in recent years due to their economic and environmental benefits. WMA can be machined and compacted at lower temperatures than traditional hot-mix temperatures providing reduced energy consumption and CO₂ emissions. The use of RAP can replace a certain proportion of asphalt binder and virgin aggregates needed for the construction of new asphalt sidewalks, which allows for the environmentally appropriate disposal of RAP and reduction of production costs. In the present research, the effects of adding three commercially available technologies for the manufacture of WMA (sunflower oil, WarmGrip®, and natural zeolite) with different percentages of milled material (30 and 70% of RAP) were evaluated as a way to enable the recycling of RAP at higher rates of participation in the final mix. The binders derived from the RAP and the new binders modified by the WMA additives were characterized by their chemical composition and through rheological tests. The degree of activation of the RAP binder was also analyzed to determine the minimum amount of RAP binder that can be considered active in the formulation of a new asphalt mix containing milled materials. The additives were incorporated into the recycled asphalt mixtures and the effects of this addition on the indirect tensile strength, water sensitivity, resilient modulus, rutting resistance, fatigue life, and dynamic modulus were evaluated. The results showed that recycled asphalt mixtures should not be designed with the assumption of full binder activation of RAP. Raising the RAP content increased the stiffness of the mixtures and consequently provided growth rutting resistance. However, sunflower oil and natural zeolite showed rejuvenating properties and acted by decreasing the stiffness of these mixtures. Warm recycled mixtures exhibited an increased number of cycles to failure in the fatigue test and increased adhesion and cohesion, verified by the water sensitivity test, with emphasis on the recycled mixtures with the WarmGrip modified binders. Therefore, the warm recycled mixtures allowed the incorporation of higher amounts of RAP when compared to conventional hot recycled asphalt mixtures, especially the warm recycled mixtures with up to 30% of RAP.

Keywords: Sustainable technologies, paving recycling, warm recycled asphalt mixtures, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Usina de asfalto Drum Mix.....	27
Figura 2 – Reciclagem a frio no local configurado como uma central de reciclagem a frio estacionária.....	30
Figura 3 – Reciclagem Profunda	31
Figura 4 - Possíveis interações entre ligantes na reciclagem.....	33
Figura 5 - Porcentagem de ativação do ligante recuperado do RAP para as MARMs.....	39
Figura 6 - Evidência de ativação do ligante do RAP e aglomeração de partículas finas de RAP em uma usina das Estradas do Condado de Minnesota.....	41
Figura 7 - Ilustração dos processos de produção de reciclagem RAP de alimentação a quente ou morna em uma usina de asfalto	47
Figura 8 - Unidades estruturais básicas das zeólitas	54
Figura 9 - Critério de falha por fadiga de diferentes misturas de RAP	67
Figura 10 - Vida à fadiga de várias misturas MARMs com base na literatura.....	68
Figura 11 – Misturas: a) 100% de RAP; b) 73% de RAP; c) 65% de RAP e d) 57% de RAP.....	72
Figura 12 – Fluxograma das etapas de realização desta pesquisa	74
Figura 13 - Curva granulométrica dos agregados.....	78
Figura 14 - FTIR do óleo de girassol e do ligante puro e modificado com o óleo de girassol antes e após o procedimento de RTFO	84
Figura 15 – Local de coleta de amostra de RAP	90
Figura 16 - Processo de recuperação do ligante asfáltico no rotaevaporador	91
Figura 17 – Curva granulométrica do RAP	94
Figura 18 – Resultados do ensaio de FTIR para o ligante extraído do RAP.....	95
Figura 19 - Blending chart.....	97
Figura 20 – Volume de vazios da mistura de RAP	100
Figura 21 – Resultados do parâmetro DoA (%)	101
Figura 22 - Curvas granulométricas: superior, intermediária e inferior	103
Figura 23 – Curvas granulométricas das misturas recicladas.....	106
Figura 24 – Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificados: a) PG, b) PG contínuo	125
Figura 25 - Resultados dos ensaios de MSCR <i>Jnr</i>	127
Figura 26 - Diferença percentual - <i>Jnr,diff</i>	128

Figura 27 - Resultados dos ensaios de MSCR R%.....	129
Figura 28 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	129
Figura 29 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida.....	134
Figura 30 – Resultados do ensaio de MR.....	139
Figura 31 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP das misturas asfálticas de referências	142
Figura 32 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial das misturas asfálticas de referências	143
Figura 33 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP das misturas asfálticas com 30% de RAP	143
Figura 34 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial das misturas asfálticas com 30% de RAP	144
Figura 35 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP das misturas asfálticas com 70% de RAP	144
Figura 36 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial das misturas asfálticas com 70% de RAP	145
Figura 37 - Valores do flow number obtidos pelo ensaio uniaxial de carga repetida	148
Figura 38 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico para misturas asfálticas na temperatura de referência de 20°C	152
Figura 39 - Curvas mestras de Ângulo de fase para misturas asfálticas na temperatura de referência de 20°C	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Procedimentos realizados para caracterizar o ligante asfáltico	75
Tabela 2 - Caracterização do ligante asfáltico puro	77
Tabela 3 - Granulometria dos agregados	78
Tabela 4 - Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdo	79
Tabela 5 – Resultados do índice de forma dos agregados graúdos	80
Tabela 6 – Resultado do ensaio de equivalente areia	80
Tabela 7 – Resultado do ensaio de partículas achatadas e alongadas	81
Tabela 8 – Resultados do ensaio de partículas fraturadas	81
Tabela 9 - Resultados do ensaio de angularidade do agregado miúdo	82
Tabela 10 - Oxidação das amostras de ligante com e sem o óleo de girassol antes e após o envelhecimento por RTFO	85
Tabela 11 - Diferença entre as áreas oxidadas e percentual oxidado das amostras de ligante com e sem o óleo de girassol antes e após o envelhecimento por RTFO.....	86
Tabela 12 - Caracterização física do WarmGrip® N1	87
Tabela 13 - Composição química e as características da zeólita natural.....	88
Tabela 14 - Caracterização física do ligante do RAP.....	92
Tabela 15 – Granulometria do RAP	93
Tabela 16 – Grau de ativação do RAP utilizado neste trabalho	100
Tabela 17 – Nomenclaturas das dosagens das misturas asfálticas estudadas.....	102
Tabela 18 - Proporções dos agregados nas granulometrias.....	103
Tabela 19 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de ligantes iniciais calculados	104
Tabela 20 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos teores de ligantes iniciais calculados	105
Tabela 21 - Proporções de agregados nas granulometrias das misturas recicladas.....	105
Tabela 22 - Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas	107
Tabela 23 - Teor de projeto da mistura com zeólita	108
Tabela 24 - Parâmetros da dosagem com zeólita natural	108
Tabela 25 - Temperaturas de usinagem e compactação	110
Tabela 26 – Propriedades das misturas recicladas considerando 100% de ativação do ligante do RAP	111

Tabela 27 – Resultados dos ensaios de reologia empírica dos ligantes asfálticos puro e modificados	120
Tabela 28 - ANOVA da resistência à tração por compressão diametral das amostras	132
Tabela 29 - Teste Tukey para a interação dos fatores teor de RAP e tipo de aditivo de MAM (RT)	132
Tabela 30 - ANOVA da resistência retida à tração por compressão diametral das amostras	137
Tabela 31 - Teste Tukey para a interação dos fatores teor de RAP e tipo de aditivo de MAM (RRT).....	138
Tabela 32 - ANOVA do módulo de resiliência das amostras.....	141
Tabela 33 - Teste Tukey para a interação dos fatores teor de RAP e tipo de aditivo de MAM (MR)	141
Tabela 34 - Equações características das curvas de vida de fadiga das misturas.....	145
Tabela 35 - ANOVA da resistência a deformação permanente das amostras	150
Tabela 36 - Teste Tukey para a interação dos fatores teor de RAP e tipo de aditivo de MAM (FN)	151

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
APA	Asphalt Pavement Analyser
ARRA	Asphalt Recycling & Reclaiming Association
ASTM	American Society for Testing Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras
CP	Corpo de Prova
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DoA	Grau de ativação do ligante do RAP
EPI's	Equipamentos de Proteção Individual
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
FTIR	Fourier Tranformed Infra Red
GI	Massa Específica do Ligante
Gmm	Massa Específica Máxima Medida da Mistura
HMA	Hot Mix Asphalt
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
LAPAV	Laboratório de Pavimentação - UFRG
LCC	Líquido da Castanha de Caju
LEA	Low Energy Asphalt
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDTs	Linear Variable Differential Transducer
Mag	Massa de agregado
MAM	Mistura Asfáltica Morna
MAQ	MisturasAsfáltica a Quente
MARM	Mistura Asfáltica Reciclada Morna
MARQ	Mistura Asfáltica Reciclada a Quente
ME	Método de Ensaio
MD	Módulo Dinâmico
MR	Módulo de Resiliência
N	Número
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCAT	National Center for Asphalt Tecnology
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program

NM	Norma Mercosul
Pag	Percentual de Agregado na Mistura
PB	Paraíba
PG	Grau de desempenho
PI	Teor de Ligante
Pli	Teor de Ligante Inicial
RBV	Relação Betume x Vazios
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RRT	Relação de Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin-Film Oven
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
TLA	Trinidad Lake Asphalt
TNM	Tamanho Nominal Máximo
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
VAM	Vazios do Agregado Mineral
Vla	Volume de Ligante Absorvido
Vle	Volume de Ligante Efetivo
Vv	Volume de vazios
WMA	Warm Mix Asphalt

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1.	Justificativa	20
1.2.	Hipóteses.....	21
1.3.	Objetivos	22
1.3.1.	Objetivo geral.....	22
1.3.2.	Objetivo específicos	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1.	Misturas asfálticas recicladas.....	23
2.1.1.	Fresagem	24
2.1.2.	Reciclagem de revestimentos asfálticos.....	25
2.2.	Limitações da reciclagem do RAP.....	31
2.2.1.	Ativação e interação do ligante do RAP	32
2.2.2.	Superaquecimento do RAP	40
2.2.3.	Heterogeneidade do RAP.....	41
2.2.4.	Rigidez excessiva oriunda do ligante do RAP	42
2.3.	Tecnologias de misturas asfálticas recicladas mornas.....	45
2.3.1.	Misturas asfálticas mornas fabricadas com aditivos orgânicos	48
2.3.2.	Misturas asfálticas mornas fabricadas com aditivos químicos	50
2.3.3.	Misturas asfálticas mornas fabricadas com asfalto espumado.....	52
2.4.	Dosagem de misturas asfálticas recicladas	56
2.4.1.	Dosagem nos Estados Unidos	56
2.4.2.	Dosagem na Europa	58
2.4.3.	Dosagem na Austrália e Japão	58

2.5.	Procedimentos de extração e recuperação de ligante asfáltico	59
2.6.	Durabilidade de misturas asfálticas recicladas mornas.....	61
2.7.	Desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas	62
2.7.1.	Resistência à Tração.....	64
2.7.2.	Vida de fadiga	65
2.7.3.	Dano por umidade induzida	69
2.7.4.	Deformação permanente	70
2.8.	Considerações sobre o tema abordado	72
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	74
3.1.	Ligante asfáltico.....	75
	Índice de susceptibilidade térmica (IST)	77
3.2.	Agregados	77
3.2.1.	Granulometria	78
3.2.2.	Massa específica e absorção	79
3.2.3.	Abrasão Los Angeles	79
3.2.4.	Índice de forma	80
3.2.5.	Equivalente areia.....	80
3.2.6.	Partículas planas e alongadas	81
3.2.7.	Partículas fraturadas	81
3.2.8.	Angularidade	82
3.3.	Óleo de girassol	82
3.4.	WarmGrip® N1	86
3.5.	Zeólita natural (WARMIX-CEL)	88
3.6.	RAP.....	89

3.6.1.	Caracterização física do RAP	90
3.6.2.	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier do RAP	94
3.6.3.	Blending charts	97
3.6.4.	Grau de ativação do ligante do RAP (DoA)	98
3.7.	Dosagem das misturas asfálticas recicladas.....	102
3.7.1.	Dosagem da mistura asfáltica de referência.....	103
3.7.2.	Dosagem das misturas asfálticas recicladas	105
3.7.3.	Temperaturas de usinagem e compactação	108
3.8.	Ativação do ligante do RAP das misturas asfálticas recicladas.....	110
3.9.	Caracterização mecânica.....	112
3.9.1.	Resistência à tração indireta.....	112
3.9.2.	Dano por umidade induzida	113
3.9.3.	Módulo de Resiliência (MR).....	114
3.9.4.	Vida de fadiga	114
3.9.5.	Resistência à deformação permanente	116
3.9.6.	Módulo Dinâmico (MD)	117
3.9.7.	Análise estatística.....	117
4.	RESULTADOS	120
4.1.	Reologia empírica	120
	Índice de susceptibilidade térmica (IST)	120
4.2.	Reologia fundamental	124
4.2.1.	Grau de desempenho (PG)	124
4.2.2.	MSCR.....	126
4.3.	Caracterização mecânica.....	129

4.3.1. Resistência à tração indireta por compressão diametral	129
4.3.2. Dano por umidade induzida	133
4.3.3. Módulo de resiliência.....	138
4.3.4. Vida de fadiga	142
4.3.5. Resistência à deformação permanente	148
4.3.6. Módulo dinâmico	152
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	158
5.1. Considerações finais	158
5.2. Conclusão.....	159
5.3. Sugestões a pesquisas futuras	159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos, durante o seu ciclo de vida, estão sujeitos a ações diversas, como variações climáticas e cargas de tráfego que contribuem para a sua degradação. Para prolongar a durabilidade de um pavimento é necessário proceder ações de conservação e/ou reabilitação do pavimento, de modo a manter as suas características funcionais e estruturais. Dessa forma, são gerados resíduos no processo de restauração de pavimentos, que possuem potencial para serem incorporados em novas misturas asfálticas.

Tendo em vista os benefícios econômicos e ambientais, as tecnologias de reciclagem de revestimentos asfálticos fresados (RAP) e as misturas asfálticas mornas (MAMs) têm recebido muitas atenções nos últimos anos. As MAMs podem ser usinadas e compactadas em temperaturas mais baixas que as temperaturas a quente tradicionais ocasionando a redução do consumo de energia e das emissões de CO₂ (MARTIN, KERSTIN, & JOACHIM, 2019; BEHNOOD, 2020). Já a utilização do RAP pode substituir uma certa proporção de ligante asfáltico e agregados virgens necessários em pavimentos asfálticos recém-construídos, viabilizando o descarte ambientalmente adequado do RAP e a redução dos custos de produção (GUO *et al.*, 2020; PASETTO *et al.*, 2021).

Porém, ainda existem algumas limitações com relação a quantidade de fresado que pode ser reaproveitado nas misturas asfálticas, podendo serem citados: grau de reativação e interação do ligante do RAP, superaquecimento dos agregados, heterogeneidade do RAP e a rigidez excessiva oriunda do ligante envelhecido (LOPES, *et al.*, 2014; LIZÁRRAGA *et al.*, 2018; GASPAR *et al.*, 2020; SUN *et al.*, 2020).

De acordo com SREERAM *et al.* (2018), o conhecimento sobre a reativação do ligante envelhecido do RAP ainda é limitado. O ligante do RAP e o ligante novo podem não formar um filme asfáltico homogêneo que recobre os agregados e isso pode afetar o desempenho da mistura de forma negativa, principalmente em relação à durabilidade. O maior ou menor grau de mistura entre o ligante do RAP e o novo ligante depende, entre outros fatores, da forma como a mistura é fabricada. Esse processo de reativação do ligante RAP envolve duas variáveis principais: a temperatura e o tempo de mistura.

Com relação ao superaquecimento do RAP, sabe-se que em baixas porcentagens, os agregados são superaquecidos no tambor secador para obter a energia necessária para secar e

aquecer o RAP. Já para maiores percentuais de RAP, é necessária uma usina de asfalto adaptada para pré-aquecer o RAP e facilitar a mistura e reativar as propriedades do ligante (MADRIGAL *et al.*, 2017). Portanto, o conteúdo máximo de RAP inserido em uma usina de mistura asfáltica tradicional ainda é baixo sendo limitado a um valor na faixa de 10-20% (ZAUMANIS & MALLICK, 2015; HANSEN & COPELAND, 2017).

Além disso, a heterogeneidade na composição do RAP é outro motivo que limita a sua utilização em teores mais elevados na produção de novas misturas asfálticas (GAO *et al.*, 2022). Isso acontece porque geralmente o RAP é obtido de várias fontes e é misturado e estocado de forma desordenada. Assim, o material apresenta grande variabilidade, possivelmente impedindo que a mistura asfáltica reciclada alcance um bom desempenho. De acordo com Montañez *et al.* (2020), é importante utilizar o RAP oriundo de uma única fonte, ou promover processos de homogeneização entre diferentes fontes de RAP na produção de novas misturas, principalmente naquelas com elevado conteúdo de RAP.

Independente da heterogeneidade do RAP, durante a vida útil de um pavimento flexível, os ligantes asfálticos sofrem o processo de envelhecimento, ocasionados devido a fatores como a oxidação e a alternância em componentes moleculares. Existem predominantemente dois estágios de envelhecimento de um ligante asfáltico em uma mistura asfáltica: o envelhecimento de curto prazo que ocorre durante a usinagem e compactação da mistura asfáltica; e o envelhecimento de longo prazo, que ocorre durante a vida útil do revestimento. O envelhecimento influencia negativamente o desempenho mecânico no que diz respeito às resistências à fissuração e à fadiga, sendo necessário, de preferência, desacelerar o processo de envelhecimento. O ligante envelhecido apresenta uma maior viscosidade e rigidez do que um ligante virgem, levando à perda de adesão (PRADHAN, 2022).

Portanto, o ligante envelhecido do RAP pode reduzir a eficiência da mistura asfáltica e resultar em desgaste prematuro dos pavimentos asfálticos. Então, para melhorar o desempenho da mistura asfáltica contendo RAP são necessários a adição de agentes rejuvenescedores para reduzir a rigidez dessas misturas. Os aditivos de MAMs têm se apresentado promessores para viabilizar o aumento do teor de RAP nas misturas asfálticas, pois os mesmos podem melhorar a baixa trabalhabilidade do RAP a partir da redução da viscosidade do ligante asfáltico envelhecido (GUO *et al.*, 2020).

A União Europeia lançou um inovador projeto de pesquisa intitulado “Self-sustaining Urban Roads: A way to improve Environmental performance of urban areas” – LIFESURE,

com duração de novembro de 2013 a junho de 2018, com o objetivo de promover uma nova abordagem de desempenho ambiental baseada na reutilização de misturas recicladas com a utilização das tecnologias de MAMs como soluções para aumentar o teor de fresado em novas misturas, com alto grau de durabilidade e desempenho mecânico.

As técnicas de reciclagem do RAP, podem ser a quente, a frio ou morna. Diversos autores investigaram o uso RAP em misturas asfálticas a quente e os seus desempenhos nas propriedades mecânicas, podendo-se citar: Ma *et al.* (2022), Oliveira, Farias & Silva (2022), Suzuki (2019) e Zappe (2020). Outros estudos também foram desenvolvidos com misturas asfálticas recicladas mornas, podendo ser nomeados: Bohn *et al.* (2020), Hou *et al.* (2021) e Yousefi *et al.* (2021a).

A utilização de MAMs diminui as temperaturas de usinagem e compactação e proporciona vários benefícios como redução de 18% no consumo de combustíveis fósseis, diminuição da poluição atmosférica em cerca de 24% e menor envelhecimento do ligante asfáltico (CHERAGHIAN *et al.*, 2020). De acordo com o comentário anterior, durante a vida útil do pavimento, o ligante no cimento asfáltico é oxidado e envelhecido. Assim, o ligante no RAP torna-se mais rígido. Em temperaturas de usinagem mais baixas do que as misturas a quente, o ligante da MAM é menos envelhecido e mais macio do que o ligante na mistura a quente. Ao adicionar RAP em uma MAM, o ligante envelhecido do RAP se mistura com o ligante da MAM, tornando o ligante do produto final mais rígido do que o ligante da MAM sozinho. Dessa forma, de acordo com COPELAND *et al.* (2010), a MAM possibilita a aplicação de porcentagens mais elevadas de RAP. Além disso, essas MAMs proporcionam melhoria nas condições de trabalho, segurança e saúde dos trabalhadores (HURLEY E PROWELL, 2005a e 2005b).

As tecnologias de MAMs podem ser classificadas em quatro grupos principais: aditivos à base de água, aditivos que contenham água, aditivos orgânicos e aditivos químicos. As duas primeiras categorias também podem ser classificadas como tecnologia de asfalto espumado (CHERAGHIAN *et al.*, 2020 e HETTIARACHCHI *et al.*, 2019).

De acordo com Yousefi *et al.* (2021b), a tecnologia de asfalto espumado funciona por meio da retenção de água no ligante, que pode expandir conforme a temperatura sobe e reduzir a viscosidade do ligante asfáltico. A adição de aditivos orgânicos diminui as temperaturas de usinagem e compactação, diminuindo a viscosidade dos ligantes asfálticos em temperaturas superiores ao seu ponto de fusão. Os aditivos químicos melhoram a trabalhabilidade e

compactação de misturas ao diminuir o atrito entre o ligante e a interface dos agregados, proporcionando a redução de temperatura.

A influência que diferentes aditivos de MAMs (orgânico, químico e asfalto espumado) têm sobre o comportamento de ligantes e misturas asfálticas com alto teor de material fresado ainda não são bem conhecidos. Além disso, é necessário analisar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas e qual a influência da temperatura de compactação no grau de ativação do ligante envelhecido do RAP.

Dessa forma, esta pesquisa busca analisar três tecnologias (óleo de girassol, WarmGrip e zeólita natural) disponíveis no mercado para a fabricação de misturas asfálticas mornas com diferentes porcentagens de material fresado, como forma de viabilizar a reciclagem de RAP em maiores taxas de participação da mistura final. As melhorias das MAMs somadas às características das misturas asfálticas recicladas podem trazer significativos ganhos ambientais para o ramo rodoviário e promover estradas mais sustentáveis, dados pelo maior aproveitamento de materiais recicláveis e diminuição da emissão de gases poluentes a atmosfera.

1.1. Justificativa

O desempenho dos revestimentos quando solicitados pelo tráfego ou pelas condições climáticas depende das propriedades e da proporção de cada um dos seus materiais constituintes (NASCIMENTO, 2008).

Segundo D'Angelo *et al.* (2008), as tecnologias de MAMs podem proporcionar as misturas contendo altas proporções de RAP a redução da viscosidade que facilitará a compactação, e a redução do envelhecimento do ligante.

De acordo com Unger Filho (2019), o Brasil não dispõe de dados confiáveis quanto à geração de resíduos, no entanto, para se ter uma ideia do potencial de geração e reaproveitamento de material fresado, pode-se utilizar como exemplo a previsão do Grupo CCR em que entre 2017 e 2021 geraram mais de 1 milhão de toneladas de RAP. Esta quantidade de RAP, seria suficiente, em termos de pavimentação, para construir 331 km de uma base reciclada com 20 cm de espessura e plataforma com 7,2 m.

Além disso, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, por meio da Resolução nº 14, de 08 de julho de 2021, que entrou em vigor em 02 de agosto de 2021, determinou que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias do Departamento, desenvolvidos no âmbito da Sede e Superintendências Regionais, deverão incluir o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) eventualmente produzido no empreendimento. De acordo com essa Resolução, o RAP deverá ser aplicado nas camadas do pavimento a serem construídas ou na execução de novos concretos asfálticos, devendo, para fins de orçamento referencial, já ser levado em consideração nas composições de custos dos serviços nos quais ele será utilizado (BRASIL, 2021).

Nesse contexto, sabendo das exigências por parte dos órgãos governamentais do Brasil para utilização de resíduos provenientes da fresagem de pavimentos asfálticos, esta pesquisa tem como finalidade avaliar o comportamento de diferentes tecnologias de MAMs com a incorporação de elevadas quantidades de material fresado. A proposta de reciclagem de pavimentos será realizada por meio da dosagem de misturas asfálticas pelo método SUPERPAVE, a fim de obter um teor ótimo de ligante em função da proporção de material fresado reutilizado, com o intuito de contribuir com a literatura na formação de um banco de dados nacional que corrobore a utilização desta alternativa de produção de misturas asfálticas.

1.2. Hipóteses

A justificativa desse trabalho tratou sobre o aumento da utilização de aditivos de MAMs na indústria da pavimentação para produção de misturas asfálticas recicladas. Pois, a técnica de fresagem, amplamente adotada nas operações de conservação de pavimentos asfálticos, gera grandes quantidades de resíduos que ocasiona problemas ambientais como o acúmulo e o descarte inadequado. Dessa forma, foi sugerido a utilização dos aditivos: óleo de girassol, WarmGrip e zeólita natural como forma de maximizar a demanda por incorporação de maior percentual de RAP nas misturas asfálticas. Portanto, nesta tese pretende-se verificar a validação das seguintes hipóteses:

Hipótese 1: Os aditivos de MAMs podem atuar em uma mistura asfáltica reciclada como agentes rejuvenescedores do ligante do RAP;

Hipótese 2: Os aditivos de MAMs podem aumentar o grau de ativação entre o ligante envelhecido do RAP e o ligante novo;

Hipótese 3: A combinação de aditivos de MAMs com alto teor de material fresado, 30 e 70% de RAP, apresenta potencial de produzir misturas com desempenho mecânico semelhantes as misturas recicladas a quente convencionais.

Dentro desse contexto, serão necessários ensaios laboratoriais para avaliação das hipóteses mediante análise estatística ANOVA e teste Tukey. Estas, são ferramentas estatísticas valiosas para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Avaliar a viabilidade técnica de misturas asfálticas recicladas mornas fabricadas em laboratório por aditivos redutores de viscosidade, contendo diferentes porcentagens de materiais fresados.

1.3.2. Objetivo específicos

- realizar um estudo do percentual de ativação do ligante do rap das misturas asfálticas recicladas, considerando 100% de ativação do ligante do rap;
- avaliar os efeitos da adição dos aditivos (óleo de girassol, warmgrip e zeólita natural) sobre as propriedades reológicas do ligantes asfálticos;
- avaliar os efeitos de diferentes teores de rap na dosagem e no comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas;
- verificar qual método de produção de mam (orgânico, químico e asfalto espumado) mais adequado para compor misturas asfálticas recicladas mornas;
- avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas mornas;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são apresentados temas que forneceram embasamento teórico para a estruturação desta pesquisa. Inicialmente, faz-se uma abordagem sobre misturas asfálticas recicladas, assim como generalidades sobre o processo de fresagem, a reciclagem de revestimentos asfálticos e a incorporação de agentes rejuvenescedores (AR) usados para restaurar as propriedades reológicas do ligante envelhecido do RAP.

Em seguida são apresentadas as tecnologias disponíveis para a fabricação das misturas asfálticas recicladas mornas, que podem ser divididas em três principais processos: aditivos orgânicos, químicos e a tecnologia de asfalto espumado. Posteriormente, são relatadas as principais limitações para a produção de misturas asfálticas com elevados teores de RAP. São descritos também os processos de dosagem das misturas asfálticas recicladas, procedimentos de extração e recuperação do ligante asfáltico oriundo do RAP e a durabilidade de misturas asfálticas recicladas mornas.

São apresentados também os principais resultados publicados com relação ao desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas mornas, incluindo os parâmetros de resistência e rigidez dessas misturas. Finalmente, o tópico é finalizado com algumas citações de experiências brasileiras com o uso de misturas asfálticas recicladas mornas.

2.1. Misturas asfálticas recicladas

Reciclar pavimentos asfálticos consiste no processo de reutilizar as camadas envelhecidas e deterioradas de um pavimento para a produção de novas misturas, onde é possível aproveitar os agregados e ligantes provenientes da fresagem. Para realizar esse processo de reciclagem é, geralmente, recomendado adicionar nas misturas asfálticas: agente rejuvenescedor, espuma de asfalto, ligante asfáltico ou emulsão e também pode ser necessário inserir aglomerantes hidráulicos e novos agregados (CENTOFANTE, 2016).

2.1.1. Fresagem

Segundo a norma do DNIT 159:2011-ES, a fresagem de pavimentos asfálticos consiste no processo de corte de uma ou mais camadas de um pavimento por intermédio de processo mecânico a frio com a finalidade de remover pavimentos envelhecidos ou deteriorados antes da execução de um novo revestimento. Efetuam-se cortes por movimento rotativo contínuo, e deposita-se o material fresado em um caminhão basculante que irá efetuar o transporte do material para o local de destino onde posteriormente será reaproveitado ou seguirá para o bota-fora. Os locais de bota-fora devem ser previstos no projeto ou indicados pela construtora, devidamente aprovados pela fiscalização, e em conformidade com a Resolução CONAMA nº 307/2002.

De acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), a fresagem de pavimento faz parte das atividades para preparação do pavimento existente antes da aplicação de camadas asfálticas adicionais de um novo revestimento asfáltico. É executada em áreas com ocorrência de remendos em mau estado, áreas adjacentes a painelas, rupturas plásticas e corrugações, áreas com grande concentração de trincas e outros defeitos. Além disso, a fresagem do pavimento constitui uma etapa preliminar para a reciclagem de pavimentos asfálticos.

Segundo Bonfim (2010), o processo de fresagem teve início a partir da segunda metade da década de 1970, simultaneamente, tanto na Europa quanto na América do Norte, como ferramenta adequada para o reprocessamento dos materiais asfálticos deteriorados. Inicialmente, esse material era extraído dos pavimentos com o auxílio de escarificadores. Porém, o processo de escarificação extraía por completo a camada de revestimento asfáltico do pavimento, dando origem a grandes blocos de material asfáltico que demandavam um posterior processo de britagem.

O equipamento de fresagem é capaz de realizar a fresagem em diversas espessuras do revestimento, além de resultar em um material fresado com granulometria adequada. No Brasil, essa técnica foi utilizada pela primeira vez na década de 1980 com o emprego de uma fresadora norte-americana, Roto-Mill PR-525 da C.M.I, na obra de restauração da Via Anchieta, no estado de São Paulo (BONFIM, 2010).

Além disso, é importante que o material fresado não seja contaminado com material de base, solos ou geotêxteis principalmente quando a fresagem ocorrer em acostamentos ou camadas mais profundas do solo. Materiais fresados contaminados devem ser estocados separados das pilhas que não estão contaminadas. Os materiais contaminados só devem ser usados como material para acostamentos (NCHRP, 2013).

De acordo com Suzuki (2019), a velocidade da fresadora deve ser controlada para evitar o aparecimento de grumos de tamanhos indesejados. Portanto, é necessário ter um maior cuidado nessa fase para minimizar o teor de finos. Velocidade de avanço lenta, ou rotação rápida do tambor irá gerar partículas mais finas. Deve-se também ter atenção com a situação inversa.

2.1.2. Reciclagem de revestimentos asfálticos

O RAP é produzido por meio de pavimentos de asfaltos deteriorados e tem sido usado em novas misturas a quente e a frio. As vantagens de usar o RAP incluem reduzir a exploração de material virgem, economizar custo e menor dano ao meio ambiente (ZHU, MA, & DONG, 2020).

A indústria de asfalto nos EUA é a mais efetiva em relação a reciclagem, com mais de 99% do pavimento de asfalto recuperado sendo reaproveitado. A porcentagem média de RAP usada nas misturas de asfalto aumentou de 15,6% em 2009 para 20,1% em 2017, logo o conteúdo médio de RAP usado na mistura asfáltica a quente (MAQ) nova ainda é baixa. Em 2017, a tonelagem estimada de RAP usada nas misturas de asfalto foi de 76,2 milhões de toneladas. Isso representa mais de 3,8 milhões de toneladas (21,5 milhões de barris) de asfalto conservado, juntamente com a substituição de mais de 72 milhões de toneladas de agregado virgem (WILLIAMS, COPELAND & ROSS, 2018).

A indústria de asfalto na Europa também é eficaz com relação a reciclagem de material fresado. A taxa de reaproveitamento do RAP em misturas asfálticas a quente é de 90% na Alemanha, 85% na Grã-Bretanha, 70% nos Países Baixos e, 68% na França (EAPA, 2015).

No Japão, quase a totalidade do material fresado gerado é reutilizado, seja em misturas asfálticas convencionais para revestimentos de pavimentos, seja na execução de bases. Neste país, em 2013, foram usinadas cerca de 55 milhões de toneladas de misturas asfálticas, das quais

76% foram produzidas com a incorporação de fresado nas suas misturas, sendo tal prática adotada desde 1984 (NAPA, 2015).

A indústria de pavimentação do Brasil não disponibiliza de dados confiáveis quanto ao percentual de material fresado que é reaproveitado na aplicação de novas misturas asfálticas. De acordo com o histórico de reciclagem das rodovias deste país, uma das primeiras grandes obras de reciclagem teve início em 1986. Onde, foram executadas em trechos da Via Anhanguera, entre São Paulo e Campinas, num total de 90 km. A mistura continha 50% de RAP e foi produzida em usina do tipo *drum-mixer* (GUSMÃO, 2008).

As técnicas de reciclagem podem ser classificadas de várias maneiras. Por exemplo, a Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA, 2015) define cinco categorias: reciclagem a frio fresagem (*Cold Planning*), reciclagem a quente em usina (Hot recycling in asphalt plant), reciclagem a quente no local (Hot in-place recycling), reciclagem a frio no local (cold recycling in-place) e recuperação profunda do pavimento (Full depth reclamation). Além dessas, existe também a técnica de reciclagem morna, a seleção sobre a escolha da técnica de reciclagem mais apropriada para cada projeto de restauração depende de vários fatores, como nível de degradação do pavimento, equipamentos e disponibilidade materiais.

a) Reciclagem a frio (*Cold Planning*)

A reciclagem a frio consiste na remoção, controlada automaticamente, do revestimento asfáltico até determinada profundidade, a depender do desgaste da camada de revestimento, e é comumente conhecido como fresagem. Essa técnica é utilizada para a reabilitação de estradas, afundamentos, lombadas e outras irregularidades da superfície, deixando uma superfície texturizada uniforme. Além disso, também pode ser utilizada para eliminar o escorregamento e recuperar a resistência à derrapagem. No entanto, esse método reduz sensivelmente o conforto do usuário do veículo que trafega pelo revestimento asfáltico.

A fresagem do revestimento do pavimento é realizada por um tambor rotativo que transfere o RAP para os caminhões que irão retirar o material do local. Entre os benefícios da reciclagem a frio podem-se citar: interrupção mínima de tráfego; custo reduzido, ampliando o orçamento de manutenção para fornecer mais quilômetros de reabilitação de pavimentos; material recuperado para uso futuro; e perfis do pavimento e seções transversais aprimoradas.

b) Reciclagem a quente em usina (*Hot recycling in asphalt plant*)

A reciclagem a quente é uma tecnologia comprovada que fornece uma resposta oportuna aos problemas de manutenção e reabilitação de estradas. Nesse método, RAP, agregados virgens e cimentos asfálticos são combinados e reutilizados para produzir misturas asfálticas quente de alta qualidade, com desempenho igual ou superior ao das misturas convencionais.

A reciclagem a quente também pode ajudar a corrigir e manter a geometria vertical e horizontal, onde as folgas do meio-fio e da ponte são afetadas. Além disso, as usinas de asfalto convencionais, que não foram originalmente projetadas para o uso de materiais reciclados, podem ser modificadas com equipamentos de reciclagem para produzir as misturas recicladas. O RAP é geralmente obtido por meio de trituração ou fresagem do pavimento.

Tanto a usina de mistura a quente quanto a de tambor são usadas para produzir mistura reciclada. O tipo de usina mais empregada é a “*drum mix*” (Figura 1) e o produto final deve atender as especificações de misturas asfálticas a serem aplicadas nas camadas de base, de ligação ou de rolamento. Para eliminar os problemas de secagem do RAP nas usinas “*drum mix*” convencionais, a indústria produziu as usinas que fazem a mistura num tambor duplo “double barrel” (DNIT, 2006).

Figura 1 - Usina de asfalto Drum Mix



Fonte: CIBER (2020)

c) Reciclagem a quente no local (*Hot in-place recycling*)

Esse método é realizado no próprio local da obra, com o pavimento existente processado a uma profundidade de 2 a 4 centímetros. O pavimento asfáltico deteriorado é aquecido e amolecido de modo a permitir que seja escarificado ou misturado por um rotativo a quente, a

uma determinada profundidade. Esse processo pode ser realizado como uma operação de passagem única (uma fase) que recompõe monoliticamente o pavimento restaurado com material virgem, ou como um procedimento de duas passagens, em que o material restaurado é compactado novamente e a aplicação da nova superfície de desgaste segue uma indicação prescrita.

Após o processo de reciclagem a quente no local a flexibilidade do pavimento é restaurada, os afundamentos e os buracos são preenchidos, os pavimentos são nivelados, e drenagem é restabelecida e ainda a segurança na rodovia é melhorada por meio da resistência aprimorada à derrapagem.

d) Reciclagem a frio no local (*cold recycling in-place*)

A reciclagem a frio é um procedimento realizado com a finalidade de recuperar e reutilizar o material de um pavimento existente, sem a utilização do calor como artifício para realização do trabalho. A técnica de reciclagem a frio no local remove o pavimento existente e o reutiliza no próprio local da obra. A reabilitação é realizada em locais que ocorrem falhas estruturais, essas falhas incluem: trincas transversais, afundamento de trilha de roda, buracos, irregularidades na superfície ou uma combinação dos itens acima.

Segundo Meocci *et al.* (2017), a reciclagem a frio reduz o uso de recursos naturais e o consumo de energia de produção, por isso é o método de reciclagem mais escolhido. Quando realizada no momento certo, ou seja, antes da degradação da estrutura do pavimento, os custos de manutenção podem ser reduzidos em 30% a 50% em relação à fresagem convencional e soluções de enchimento (FHWA, 2018). Em comparação com a reciclagem a quente, a tecnologia de reciclagem a frio pode ser produzida à temperatura ambiente adicionando emulsão asfáltica ou asfalto espumado e ainda uma maior utilização de RAP até oitenta a noventa por cento (DOŁŻYCKI E JASKUŁA, 2019; XIAO *et al.*, 2018).

Geralmente a mistura asfáltica reciclada a frio se refere à mistura contendo emulsão asfáltica, cimento, nova partícula de agregado e RAP. No entanto, o comportamento mecânico dessas misturas vai depender de diferentes variáveis que podem afetar sua rigidez, como a granulometria (RASCHIA *et al.*, 2018), teor de RAP, cimento e emulsão (LUAN *et al.*, 2022) e a técnica de reciclagem a frio, na usina ou em campo (DIEFENDERFER *et al.*, 2016).

Guatimosim *et al.* (2016) concluíram que o comportamento da mistura de RAP com cimento triturado, material de base tratado e espuma de asfalto é semelhante a um material

granular, devido à sua dependência do módulo em relação à pressão de confinamento em diferentes condições de cura. Já Kuchiishi *et al.* (2019) realizaram ensaios de módulo dinâmico com as misturas recicladas frias e as curvas mestras indicaram um comportamento viscoelástico para este tipo de mistura, verificando que as propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas não podem ser negligenciadas.

As composições complexas das misturas recicladas frias influenciam nas propriedades mecânicas das mesmas. Pois, o cimento e a emulsão podem atuar aumentando a resistência inicial e final das misturas, o cimento também pode melhorar as propriedades adesivas na interface entre agregado e mástique asfáltico. Quanto ao RAP, os efeitos da ligação do RAP com os agregados virgens terão a influência do ligante asfáltico envelhecido do RAP, proporcionando um aumento de rigidez das misturas.

Além disso, se considerar que as misturas de asfalto reciclado a frio são um material granular, espera-se que o principal defeito apresentado seja a deformação permanente. No entanto, se as misturas de asfalto reciclado a frio forem consideradas um material com propriedades viscoelásticas que se assemelham ao comportamento de uma mistura a quente, então deformações permanentes e trincas por fadiga podem ser os principais defeitos encontrados nesses pavimentos. Portanto, a utilização de misturas asfálticas recicladas mornas poderia aumentar a incorporação de RAP nas misturas e ainda proporcionar redução da rigidez das mesmas devido a utilização dos aditivos de MAMs. Estes podem atuar rejuvenescendo e diminuindo a rigidez do ligante envelhecido do RAP. Um exemplo de uma reciclagem a frio no local em uma usina estacionária foi utilizado em uma seção experimental para uma rodovia de tráfego pesado em Araciguama-SP no Brasil (Figura 2).

Figura 2 – Reciclagem a frio no local configurado como uma central de reciclagem a frio estacionária



Fonte: Unger Filho *et al.* (2020)

e) Recuperação profunda do pavimento (*Full depth reclamation*)

Segundo Wirtgen (2012), a reciclagem profunda deve ser realizada quando os defeitos existentes estiverem associados a problemas estruturais na base e/ou sub-base do pavimento. É aplicada em espessuras que variam entre 20 cm e 30 cm, normalmente sendo adicionados agentes estabilizadores. A recuperação profunda do pavimento é uma técnica de recuperação na qual a seção completa do pavimento asfáltico e uma porção predeterminada dos materiais subjacentes são triturados e misturados uniformemente, podendo também ser tratados com aditivos, resultando em uma base estabilizada. A recuperação em profundidade total é capaz de corrigir seções transversais danificadas, aumentar a resistência da base à carga e utilizar 100% dos materiais existentes.

É basicamente um processo de reciclagem a frio, no qual diferentes tipos de aditivos, como emulsões asfálticas e agentes químicos, como cloreto de cálcio, cimento Portland, cinza volante e cal, são adicionados para obter uma base melhorada. Consiste em transformar o pavimento degradado numa estrutura homogênea, estável e com capacidade estrutural compatível com o tráfego que deverá suportar como mostrado na Figura 3 (TECNOPAV, 2020).

Figura 3 – Reciclagem Profunda



Fonte: TECNOPAV (2020)

Destaca-se que os cinco métodos apresentados podem ser utilizados combinados ou separadamente. A seleção de qual técnica de reciclagem é a mais apropriada para cada projeto de reabilitação, equilibrando vantagens e desvantagens de cada um, depende de vários fatores, como nível de degradação do pavimento, equipamentos e a disponibilidade dos materiais (UNGER FILHO *et al.*, 2020).

2.2. Limitações da reciclagem do RAP

Diversas pesquisas têm sido feitas para avaliar o desempenho de misturas de asfalto com alto conteúdo de RAP (IMANINASAB, LORIA-SALAZAR & CARTER, 2022; OLIVEIRA, FARIAS & SILVA, 2022; WANG *et al.*, 2017). Os dados obtidos nas seções de teste de desempenho de longo prazo do pavimento (LTPP) em 16 estados dos EUA e em duas províncias canadenses indicaram que as misturas de sobreposição contendo pelo menos 30% de RAP tiveram o mesmo desempenho que as de materiais virgens (WEST 2010; CARVALHO *et al.*, 2010).

No entanto, existem algumas limitações para a reciclagem com elevados teores de RAP, podendo-se citar a ativação do ligante do RAP e a interação entre o ligante do RAP e o ligante virgem. Ainda não existe uma metodologia bem aceita para determinar de forma confiável o grau de mistura entre ligantes virgens e o ligante do RAP na mistura asfáltica (LO PRESTI *et al.*, 2019). Geralmente, a proporção de RAP para atingir o nível desejado de ligante é determinado pelos métodos de viscosidade absoluta e grau de desempenho. Ambos métodos adotam abordagem gráfica e que ocorre a mistura completa do ligante RAP e do ligante virgem

(ASTM D4887/D4887M-11, 2016). Porém, é essencial verificar se o ligante combinado com RAP é equivalente ao aglutinante virgem em várias propriedades reológicas e químicas (SINGH, SHOWKAT, & SAWANT, 2019).

Segundo Jacques *et al.* (2016), outra consideração importante a analisar é que muitas usinas de asfalto de mistura a quente armazenam o material em silos aquecidos antes do material ser transportado para os canteiros de obras. Esse processo térmico no estágio de armazenamento do silo é um dos parâmetros críticos de produção que podem influenciar o desempenho de um mesmo lote de mistura de RAP. Porque diferentes temperaturas e tempos de armazenamento de silo podem ocasionar vários graus de mistura, difusão e oxidação dos ligantes virgens e do RAP.

Seções de teste foram realizadas em misturas contendo 50% de RAP na pista do National Center for Asphalt Technology (NCAT), essas misturas apresentaram melhor desempenho do que as seções de teste complementares com todos os materiais virgens após 5 anos de carga pesada (TIMM *et al.*, 2016). Apesar do estabelecimento do uso de RAP em novas misturas asfálticas, devido ao potencial nobre do material, ter ganho maior aceitação, há incerteza quanto ao percentual de incorporação de elevadas porcentagens de RAP na substituição de agregados virgens.

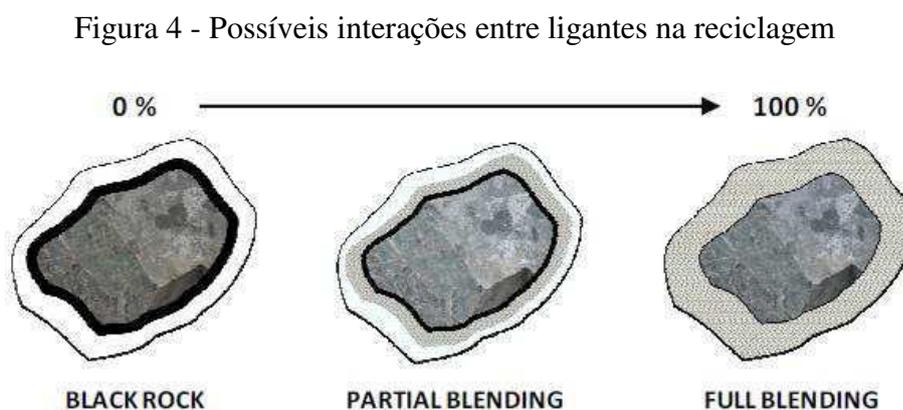
Segundo Yan *et al.* (2018), para um conteúdo mais elevado de RAP, acima de 25%, existe a preocupação de que as misturas se tornem excessivamente rígidas e quebradiças. Frequentemente, um ligante virgem é usado para compensar o ligante rígido contido no RAP. O efeito do ligante do RAP altamente envelhecido no desempenho do ligante virgem pode ser avaliado por meio de ensaios com a extração do ligante do RAP. No entanto, a extração e recuperação de ligante são demoradas e também pode afetar as propriedades do ligante devido à possível existência de resíduo de solvente.

2.2.1. Ativação e interação do ligante do RAP

A produção de misturas asfálticas com teores elevados de RAP sem prejuízo ao desempenho em campo ainda é um desafio. Para a dosagem adequada dessas misturas deve-se levar em consideração, para a compreensão do seu comportamento, como o ligante asfáltico novo interage com o ligante envelhecido presente no material fresado.

Segundo Gaspar *et al.* (2020), nas reciclagens a quente e morna, o ligante presente no RAP é ativado, mas não se sabe quanto dele realmente interage com o ligante novo. Diante disso, os autores analisaram um procedimento laboratorial de extração por etapas que buscou avaliar a homogeneidade do ligante asfáltico em duas misturas mornas produzidas em usina, uma delas com 25% RAP e a outra sem RAP. Os ligantes obtidos nas extrações foram testados no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico. Os resultados mostraram que, para a mistura com 25% RAP, os parâmetros analisados (curvas mestras, MSCR e LAS) variaram de forma progressiva, diferente da mistura de controle. O procedimento se mostrou útil para avaliar a homogeneidade do ligante, o que está relacionado ao grau de interação entre ligantes e pode ser usado para assegurar um bom desempenho da mistura.

Segundo Mangiafico, Sauzéat & Di Benedetto (2019), existem três cenários diferentes que são levados em consideração para analisar o grau de mistura do ligante do RAP com o ligante novo adicionado para produzir uma nova mistura (Figura 4) Se nenhuma interação ocorrer, o material RAP atua como um agregado negro (black rock) portanto, o ligante do RAP e o ligante novo não se misturam. Pelo contrário, se o ligante do RAP se misturar totalmente com agregado, portanto, o componente betuminoso da nova mistura é uma mistura dos dois ligantes com interação total (full blending). Uma hipótese intermediária é que ocorre uma mistura parcial (partial blending), com os dois ligantes tendo grau variável de mistura dentro da mistura.



Fonte: Gaspar *et al.* (2020)

Chen *et al.* (2007) indicaram que ocorre a mistura total entre o ligante do RAP e o ligante novo. Já McDaniel *et al.* (2000) chegaram à conclusão, com base numa elaborada campanha

laboratorial, de que o RAP não atua como rocha negra e que as propriedades aglutinantes podem ser estimadas utilizando gráficos de mistura. Logo, a hipótese em que ocorre uma mistura parcial do ligante RAP é considerada a mais representativa da realidade entre os investigadores (ABED, THOM & LO PRESTI, 2018; DING, HUANG & SHU, 2016; KASSER, ARÁMBULA-MERCADO e MARTINS, 2019).

Mogawer *et al.* (2012) avaliaram o grau de mistura entre os ligantes virgens e o RAP (variando de 0 a 40%). O efeito dos parâmetros de produção da mistura sobre o desempenho (em termos de rigidez, rachaduras, afundamentos e susceptibilidade à umidade) e a trabalhabilidade das misturas foi avaliada. Foram obtidas 18 misturas produzidas em usinas de três locais no nordeste dos Estados Unidos. Os dados e análises ilustraram que o grau de mistura entre RAP e ligantes virgens é uma função dos parâmetros de produção. A rigidez das misturas aumentou conforme a porcentagem de RAP aumentou. A vida de fadiga foi reduzida conforme o percentual de RAP foi elevado. A resistência a deformação permanente e danos à umidade melhorou à medida que a porcentagem de RAP nas misturas aumentaram.

É importante ressaltar que esses três cenários (black rock, partial blending e full blending) considerados para ativação do ligante do RAP resultam da ação de dois mecanismos diferentes. Deve-se levar em consideração primeiramente que a ativação do ligante do RAP depende da trabalhabilidade que ele vai disponibilizar para interagir com o ligante virgem adicionado na mistura. Pois, se não houver ativação do ligante do RAP, não haverá interação entre os ligantes, resultando no cenário de black rock. Em compensação, mesmo que todo o ligante do RAP seja ativado e se torne disponível, cenário correspondente ao full blending, isso não significa que os dois ligantes irão interagir completamente e formar um filme asfáltico homogêneo. Logo, quanto maior a porcentagem de ligante do RAP ativado, maior será a probabilidade que ele se misture com o ligante virgem. Dentro desse contexto, é difícil estudar de forma absolutamente isolada esses dois mecanismos.

2.2.1.1. Grau de ativação do ligante do RAP (DoA)

Sabendo que se o ligante do RAP não se mistura integralmente com o ligante virgem, o desempenho do pavimento asfáltico pode ser comprometido. Assim, é necessário analisar a quantidade de ligante do RAP que está disponível, ou ativado, para uma nova mistura.

Segundo Gaspar (2019), para se referir ao mecanismo de reaproveitamento do ligante envelhecido presente no RAP, deve ser incluído: (i) a transição para uma fase menos viscosa, (ii) a sua mescla com o ligante asfáltico novo, e (iii) o ligante asfáltico final obtido. É necessário a separação deste processo em duas etapas. A primeira relacionada a ativação do ligante oxidado, processo pelo qual parte desse ligante se torna disponível para interagir com os materiais novos, por meio do aquecimento e a consequente redução da viscosidade, enquanto outra parte permanece enrijecida, ou inativa, junta dos agregados do RAP. E a segunda compreende a interação entre o ligante asfáltico virgem e o ligante do RAP que foi ativado e que se tornou disponível ao fim da etapa anterior.

Essa divisão é a mesma que tem sido adotada nas discussões do comitê TC 264-RAP do International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM), grupo de pesquisa internacional que conta com uma equipe de trabalho dedicada especificamente a este assunto, nas quais têm sido utilizados os termos grau de ativação do ligante ou Degree of Binder Activity (DoA) e grau de interação entre os ligantes ou Degree of Blending (DoB).

Segundo Mcdaniel & Anderson (2001), quando o RAP é misturado com o ligante virgem e os agregados em temperaturas de mistura elevadas, o ligante do RAP está parcialmente disponível; ou seja, algo entre 0% e 100% de disponibilidade ocorre na mistura asfáltica.

Apesar disso, uma pesquisa recente no NCHRP Synthesis 495 (2016), indicou que 77% dos órgãos rodoviários estaduais que responderam informaram que consideram 100% de disponibilidade de ligante RAP e, assim, reduzem o teor de ligante virgem na mistura asfáltica pelo conteúdo de ligante RAP. Cerca de 6% dos entrevistados nesta mesma pesquisa consideraram 0% de disponibilidade de ligante RAP e aproximadamente 17% consideraram disponibilidade parcial de ligante do RAP, assumindo que cerca de 75% do ligante RAP está disponível (STROUP-GARDINER, 2016). Portanto, verifica-se que a maioria dos órgãos rodoviários dos EUA, 77%, supõem que ocorre 100% ativação do ligante do RAP, com o intuito de obter uma maior economia de ligante asfáltico novo, porém, essa consideração pode gerar misturas asfálticas com teor insuficiente de ligante e mais susceptíveis a danos por umidade. Observa-se também que mesmo em menor quantidade, 6% dos entrevistados, estimam que ocorre 0% de ativação do ligante do RAP, mas isso pode produzir misturas asfálticas com excesso de ligante e mais sujeitas a deformações permanentes. Finalmente, apenas 17%

consideram que ocorre disponibilidade parcial do ligante do RAP, que é o que melhor representa o que acontece na prática, principalmente para misturas com alto teor de RAP.

De acordo com Lo Presti *et al.* (2019), o DoA representa a quantidade mínima de ligante do RAP que se torna ativo nas temperaturas de produção para mistura com o ligante virgem sem a utilização de agente rejuvenescedor. Além disso, o DoA tem se mostrado dependente de vários fatores, como temperatura e tempo de armazenamento da mistura, fonte e a quantidade de materiais reciclados, conteúdo de ligante reciclado, e algumas propriedades do RAP, como idade, tipo, e graduação do agregado.

Kaseer, Arámbula-Mercado & Martin (2019) estudaram um método para quantificar o grau de disponibilidade de ativação do ligante do RAP (BAF) em misturas asfálticas recicladas. Neste método, as misturas asfálticas foram preparadas para que, após a mistura e condicionamento, o material do RAP fosse separado do agregado virgem, o que permitiu uma avaliação minuciosa da extensão da disponibilidade do ligante RAP na mistura asfáltica. Este método foi utilizado para estimar o BAF de RAP de diferentes fontes, e uma correlação entre RAP BAF e o grau de desempenho em alta temperatura (PG) de cada fonte de RAP foi estabelecida. Por fim, também foram avaliados fatores que afetam o RAP BAF, como temperatura de mistura, período de condicionamento, uso de AR e o método de adição destes a mistura. Os resultados mostraram que:

- o RAP BAF variou de 50% a 95% dependendo da fonte de RAP e da temperatura de mistura: quanto menor o PG de alta temperatura do ligante do RAP, maior foi o BAF, e quanto maior a temperatura de mistura, maior o BAF;
- estender o condicionamento de curto prazo de 2 para 4 horas não aumentou significativamente o RAP BAF;
- a adição do agente rejuvenescedor aumentou claramente o RAP BAF para a maioria das fontes de RAP a uma temperatura de mistura mais baixa (140°C), mas não aumentou significativamente o RAP BAF a uma temperatura de mistura mais alta (150°C);
- o método de adicionar o agente rejuvenescedor diretamente ao RAP, ao invés de misturá-lo com o ligante virgem, não apresentou efeito significativo no RAP BAF.

Costa (2022) avaliou as misturas asfálticas com adição de elevados teores de RAP (25%, 50%, 75% e 100%), com diferentes tipos de agentes rejuvenescedores (ADCAP WM e óleo residual de motor) e ainda verificou o momento ideal da adição do rejuvenescedor no processo de mistura dos asfaltos reciclados (junto ao fresado, junto ao agregado e na adição ao ligante). Os resultados indicaram que foi possível obter misturas recicladas com adições de 50 e 75% de fresado, desde que o óleo residual de motor fosse adicionado diretamente ao ligante novo. Com relação as adições de ADCAP WM, estas puderam ser realizadas tanto diretamente ao ligante quanto junto ao agregado. Segundo este autor, foi possível obter uma taxa máxima de utilização do teor de RAP de 75% e a adição do agente rejuvenescedor ADCAP WM deveria ser feita diretamente ao ligante por apresentar resultados ligeiramente superiores do que as demais combinações.

Ferreira *et al.* (2021) avaliaram as heterogeneidades de envelhecimento dentro de camadas de ligantes RAP, como um passo importante para obtenção de um método científico para projetar misturas asfálticas recicladas considerando um cenário mais realista em que o ligante RAP é apenas parcialmente ativado. Etapas de extração de ligante foram realizadas em seis materiais RAP para ativar artificialmente diferentes camadas de ligante RAP. Após cada extração, o ligante recuperado foi avaliado em termos de suas propriedades reológicas, frações baseadas em polaridade e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier. Com base nos resultados, um projeto de mistura asfáltica foi simulado usando diferentes porcentagens de RAP considerando o impacto das heterogeneidades de envelhecimento do ligante de RAP.

No geral, a análise implicou que pode não ser uma suposição realista considerar a homogeneidade total do ligante RAP. Além disso, com base na simulação realizada, os gráficos de mistura usados para projetar misturas asfálticas recicladas mostraram que os mesmos devem ser idealmente baseados nas propriedades do ligante ativo do RAP, em vez das propriedades do ligante do RAP após a extração completa do ligante. Isso facilitaria a escolha do ligante virgem correto quando o cenário de ativação parcial do ligante do RAP for considerado.

Para misturas de RAP com aditivos de MAMs, não está claro se o ligante do RAP e os ligantes virgens se misturam completamente durante a produção de MAM. Por um lado, o nível de mistura e ativação do ligante do RAP que ocorre durante a produção pode ser menor devido à temperatura de usinagem reduzida. Porém, por outro lado, o aumento da trabalhabilidade causado pelo uso de aditivos de MAMs pode aumentar o grau de ativação do ligante durante a

mistura, conforme relatado por alguns estudos anteriores (DING, HUANG & SHU, 2016; ZHAO *et al.*, 2016).

Sreeram *et al.* (2018) propuseram um método para quantificar o grau de ativação do ligante do RAP e a eficiência de misturas recicladas utilizando espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier de refletância total atenuada (ATR-FTIR) como ferramenta de avaliação. Os ligantes foram recuperados de misturas asfálticas de laboratório com diferentes porcentagens de RAP e preparadas sob diferentes condições de mistura. Parâmetros para avaliação das propriedades relevantes foram então desenvolvidos e validados por meio de testes de reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e cromatografia de permeação em gel (GPC). Por último, o estudo foi estendido para o uso de vários aditivos de mistura asfálticas recicladas mornas (MARMs).

De acordo com Sreeram *et al.* (2018), para análise dos vários espectros de FTIR foi realizada a integração de áreas, espectros normalizados e linha de base absoluta. Assim, o parâmetro para um espectro foi definido como:

$$IA = \int_{w_{l,oa}}^{w_{u,oa}} VA_{norm}(w)dw \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

IA é a área integrada normalizada usando uma linha de base absoluta em um valor de absorvância de 0;

$w_{u,oa}$ é o limite superior do número de onda para o grupo estrutural;

$w_{l,oa}$ é o limite inferior do número de onda para o grupo estrutural; e

$VA_{norm}(w)$ é a absorvância normalizada no número de onda w .

Assim, usando a Equação 1 como base, foram estabelecidos os parâmetros para caracterizar a ativação do ligante do RAP. Foi utilizado o conceito de que o ligante do RAP é considerado como 100% de ativação do RAP, enquanto o ligante virgem tem 0% de ativação do RAP. Com base nisso, foi desenvolvido um parâmetro para estimar a porcentagem de ligante RAP nos ligantes recuperados. Este parâmetro foi usado para representar a mobilização RAP e pode ser descrito da seguinte forma (Equação 2):

$$\text{Porcentagem de ativação do ligante do RAP (\%)} = \frac{IABS - IAVB}{IARAP - IAVB} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

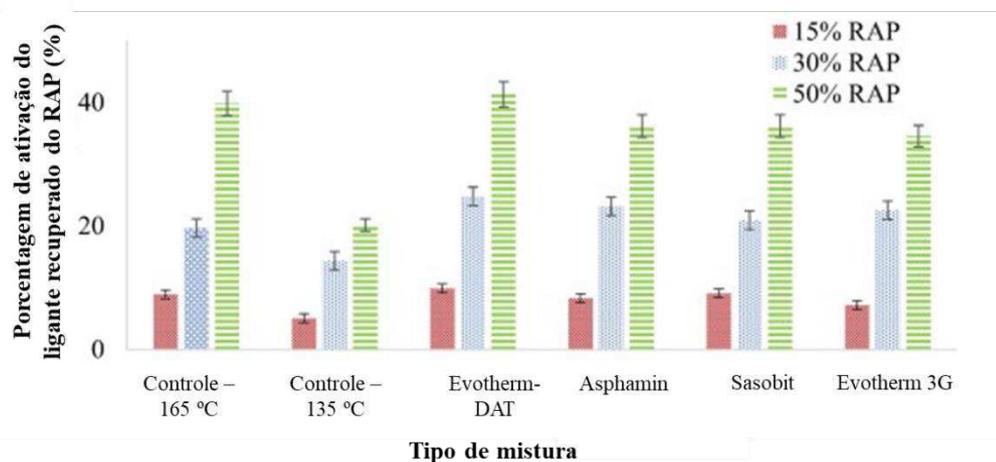
IABS é o IA do ligante recuperado da respectiva amostra;

IAVB é o IA do ligante virgem;

IARAP é o IA do ligante do RAP.

Finalmente, os ligantes recuperados foram testados de acordo com os parâmetros desenvolvidos para avaliar a porcentagem de ativação do ligante recuperado do RAP. Conforme ilustrado na Figura 5, os resultados indicaram que a ativação do ligante RAP é altamente dependente da temperatura e o uso de aditivos de MAMs podem aumentar a ativação em temperaturas de mistura mais baixas.

Figura 5 - Porcentagem de ativação do ligante recuperado do RAP para as MARMs



Fonte: Adaptado Sreeram *et al.* (2018)

Verifica-se também por meio da Figura 5 que todos os ligantes de MAMs recuperados exibiram maior porcentagem de ativação do ligante do RAP do que a amostra de controle preparada a 135°C. Entre os diferentes aditivos de MAM, o aditivo químico Evotherm DAT apresentou a maior capacidade de ativar o ligante do RAP. Com teor de 30% de RAP, o aditivo Asphamin também apresentou maior capacidade de mobilização do que a amostra de controle preparada a 165 °C. Esse comportamento da Asphamin ocorreu devido a mesma ser um aditivo de asfalto espumado à base de zeólitas sintéticas que faz com que temporariamente o ligante

seja mais macio e mais trabalhável, o que pode ter acentuado o aumento da mobilização do ligante do RAP.

2.2.2. Superaquecimento do RAP

A reciclagem usando altas taxas de RAP é limitada devido a vários fatores. Um deles é o superaquecimento de agregados. Durante o processo de reciclagem, o aquecimento do RAP é feito por transferência de calor de agregados naturais para RAP. Então, a incorporação de altas porcentagens de RAP leva a superaquecer fortemente agregados, o que às vezes é tecnicamente inviável em termos de energia (LOPES *et al.*, 2014).

As misturas recicladas podem ser produzidas tanto em usinas gravimétricas (por bateladas) quanto em volumétricas (contínuas). Em usinas contínuas com tambor do tipo contrafluxo, os agregados virgens são inseridos na extremidade superior oposta ao do queimador e fluem em sentido contrário aos gases. O RAP pode ser incorporado no tambor misturador do tipo contrafluxo em um anel localizado no primeiro terço do tambor, sem que tenha contato direto com as chamas do queimador. Neste caso, os agregados virgens são aquecidos por convecção com os gases quentes, enquanto o RAP é aquecido por condução com os agregados virgens superaquecidos. Neste tipo de usina o teor máximo de RAP é limitado a 50% (SUZUKI, 2019).

Além disso, segundo Zaumanis, Mallick, & Frank (2014), o superaquecimento dos agregados pode causar a fumaça azul proveniente da volatilização do ligante asfáltico. Já numa instalação tradicional de usina de asfalto descontínua o conteúdo de RAP é limitado a um valor entre 10 e 20% (ZAUMANIS & MALLICK, 2015).

Estima-se que mais de 90% das fontes de calor para aquecimento e secagem do RAP provêm dos agregados virgens superaquecidos e cerca de 10% das fontes de calor provêm do gás quente ou das paredes aquecidas na prática de reciclagem a frio da alimentação do RAP (DEDENE *et al.*, 2014; LIU, SHUKLA, & NANDRA, 2017).

Adicionalmente, a transferência de calor por condução dos agregados virgens para o RAP influencia na ativação do ligante do RAP (ZHANG, WEN, & HOBBS, 2015) e na aglomeração de partículas finas de RAP (JOHNSON *et al.*, 2013), como indicado na Figura 6. De acordo com Zhang, Huchet, & Hobbs (2019), o grau de ativação e transferência do ligante

afeta o grau de mistura entre o ligante do RAP e o ligante virgem e, assim, afeta o desempenho da mistura final. Pois, com a secagem e superaquecimento do RAP, simultaneamente o ligante do RAP é ativado e transferido para o agregado virgem durante o processo de mistura mecânica.

Figura 6 - Evidência de ativação do ligante do RAP e aglomeração de partículas finas de RAP em uma usina das Estradas do Condado de Minnesota



Fonte: Johnson *et al.* (2013)

Além disso, nem sempre é possível atingir a temperatura utilizando apenas a técnica de superaquecimento dos agregados virgens, pois, tanto o teor de RAP como a umidade do material influenciam a temperatura de usinagem. Ao mesmo tempo, é necessário evitar a oxidação do ligante remanescente no material reciclado. Assim, a incorporação de altos teores de RAP na mistura final pode implicar em maiores custos com adaptações, pois requer o aquecimento do material de modo separado (tambor secador exclusivo para RAP) dos materiais virgens e/ou sem o contato com a chama do queimador (SUZUKI, 2019).

De acordo com Zhang, Huchet, & Hobbs (2019), o teor de umidade do RAP tem efeito negativo na transferência de calor, isto é, à medida que o teor de umidade do RAP aumenta, o teor de ligante do agregado virgem diminui, porque a umidade do RAP consome uma grande quantidade de energia de aquecimento do agregado virgem superaquecido, o que leva a uma menor ativação do ligante do RAP.

2.2.3. Heterogeneidade do RAP

Além do superaquecimento, a reciclagem usando altas taxas de RAP também é limitada devido a heterogeneidade dos asfaltos recuperados. Valdés *et al.* (2011) analisaram o efeito da

variabilidade do RAP nas misturas recicladas. Os resultados mostraram que altas taxas de RAP (até 60%) geralmente podem ser incorporadas na preparação da mistura, considerando uma adequada caracterização e manuseio dos estoques. Isso é fundamental para evitar a heterogeneidade excessiva da mistura.

Oliveira *et al.* (2012) utilizaram uma taxa de 50% de RAP para analisar se um alto nível de incorporação de RAP pode ser alcançada por meio de um controle adequado do processo de produção. O RAP foi separado em frações graúdas e miúdas. A parte graúda foi aquecida juntamente com o agregado virgem (200°C), enquanto que a fração miúda foi introduzida na mistura à temperatura ambiente (em torno de 25°C). Este procedimento foi usado de modo a reduzir o envelhecimento do ligante contido no RAP, que está predominantemente na fração miúda. De acordo com os autores, quando se utiliza um procedimento adequado de redução e separação de tamanho, é possível obter misturas com melhor qualidade, uma vez que as especificações de concepção da mistura podem ser obtidas mais facilmente e o ligante da mistura final é menos envelhecido pelas altas temperaturas.

Lizárraga *et al.* (2018) avaliaram o desempenho mecânico, em laboratório e *in situ*, de duas misturas semi-mornas contendo alto conteúdo de RAP (70% e 100%) e comparou essas misturas com uma mistura a quente convencional utilizadas em vias de seções de desgaste de pavimentos urbanos. Segundo os autores, o controle e classificação do RAP em duas frações, isto é, fino (0/5 mm) e grosso (5/25 mm), foi essencial para garantir o sucesso do pavimento asfáltico reciclado semi-morno com 100% de RAP. Essa classificação em duas faixas de tamanho do RAP evitou a heterogeneidade excessiva das misturas e garantiu o teor de ligante necessário no projeto final da mistura. Além disso, as misturas apresentaram boa resistência a deformações e atingiram o valor mínimo de resistência a danos por umidade (85%), de acordo com a EN 12697-12.

2.2.4. Rigidez excessiva oriunda do ligante do RAP

Conforme aumenta o teor de RAP nas misturas asfálticas, há preocupações sobre o potencial efeito negativo do ligante envelhecido do RAP, especialmente na resistência à fissuração. Para melhorar esses efeitos negativos, são adicionados AR no ligante do RAP, que podem tornar o ligante mais adequado para mistura com material virgem, diminuindo a rigidez

da mistura asfáltica e produzindo o desempenho desejado do ligante por um período de serviço prolongado. Os AR também têm o potencial de restaurar as propriedades viscoelásticas e a composição química do ligante do RAP envelhecido. Vários tipos de agentes rejuvenescedores, incluindo *tall oil* destilado, aromáticos à base de petróleo e óleos orgânicos, têm sido amplamente e efetivamente utilizados em todo o mundo na última década (ZAHOOR *et al.*, 2020).

De acordo com Podolsky *et al.* (2020) agentes rejuvenescedores na indústria de pavimentação asfáltica são materiais usados para restaurar as propriedades reológicas de um ligante envelhecido semelhantes ao seu estado não envelhecido original. Os agentes rejuvenescedores restauram o equilíbrio entre os maltenos e asfaltenos no asfalto adicionando constituintes moleculares leves e/ou quebra dos aglomerados de asfaltenos para melhorar dispersão na matriz de maltenos (CHEN *et al.*, 2014a, 2014b; ELKASHEF, WILLIAMS, & COCHRAN, 2018).

Para abordar essas preocupações, Tran *et al.* (2016) avaliaram a eficácia do uso de um novo AR (*tall oil*) em misturas asfálticas com alto conteúdo de RAP (50%). A resistência às trincas por fadiga a baixa temperatura das misturas para este estudo foram quantificadas utilizando o ensaio de resistência à tração de amostras com restrições térmicas de tensão (TSRST), normatizado pela AASHTO TP10:1993. Nos ensaios TSRST, uma mistura que apresenta uma temperatura de fratura mais baixa é considerada como tendo melhor resistência às trincas por fadiga a baixa temperatura. Os resultados mostraram que a mistura com 50% de RAP com AR apresentou uma temperatura crítica (-19,1°C) estatisticamente equivalente à mistura virgem (-19,1°C). Já a temperatura crítica para a mistura de 50% de RAP sem rejuvenescedor foi estatisticamente mais elevada (-16,0°C). Portanto, a mistura com o novo AR apresentou uma maior resistência às trincas por fadiga a baixa temperatura que a mistura com 50% de RAP sem rejuvenescedor. Rejuvenescedores de origem biológica foram aplicados com sucesso para restaurar as propriedades do RAP em vez de rejuvenescedores à base de petróleo que contêm extratos aromáticos polares cancerígenos (HAJJ *et al.*, 2013).

Estudos realizados na Iowa State University sobre materiais derivados de óleo de soja epoxidado apresentaram potencial para serem utilizados como agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas recicladas, melhorando também as propriedades de ligantes rígidos (ELKASHEF *et al.*, 2017a, 2017b; ELKASHEF & WILLIAMS, 2017).

Mansourkhaki *et al.* (2020) avaliaram a interação entre componentes químicos e o comportamento reológico de ligantes com 25, 50 e 100% de ligante de RAP modificado com ligante novo e com rejuvenescedor. Os parâmetros obtidos nos testes reológicos correlacionaram positivamente com o teor de asfalteno. Além disso, foi constatado que se pode utilizar uma mistura com 100% de RAP quando se adiciona um AR à base de óleo.

Suzuki (2019) analisou o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado em laboratório e em campo. Foi utilizado como agente rejuvenescedor um óleo de base vegetal (Anova™ 1815) com o objetivo de obter alta compatibilidade com o ligante asfáltico, principalmente o envelhecido, e ainda melhorar a durabilidade e a resistência ao trincamento. O resultado do ensaio de deformação permanente, indicou que o número de ciclos das misturas com 25 e 50% de RAP após adição de agente rejuvenescedor foram de 413 e 763, respectivamente, sendo maior do que a mistura de controle que apresentou um número de ciclos de 252. Além disso, verificou-se que, com relação à vida de fadiga, é possível produzir misturas com altos teores de RAP com propriedades similares a uma mistura convencional, uma vez adicionado o AR.

Existem vários tipos de agentes rejuvenescedores (Quadro 1), incluindo extratos aromáticos, óleos altos, ácidos graxos, óleos parafínicos, óleos naftênicos baseados no Centro Nacional de Tecnologia de Asfalto (NCAT, 2014).

Quadro 1 - Tipos de agentes rejuvenescedores

Categoria	Exemplos	Descrição
Óleos parafínicos	Óleo de motor residual Storbit	Óleos lubrificantes usados, refinados
Extratos aromáticos	Hydrolene Reclamite Cyclogen L	Produtos petrolíferos refinados com componentes aromáticos polares
Óleos naftênicos	SonneWarmixRJ Ergon HyPrene Óleo residual vegetal	Hidrocarbonetos modificados para modificação de asfaltos
Triglicerídeos e ácidos Graxos	Resíduo vegetal lubrificante Ácido oleico	Derivados de óleos vegetais
Óleo de pinho (<i>Tall oil</i>)	Sylvaroad™ RP1000 Hydrogreen	Subprodutos da indústria de papel (Mesma família química dos agentes de adesividade líquidos e emulsionantes)

Fonte: NCAT (2014)

Embora os tipos de agentes rejuvenescedores variem, os processos de rejuvenescimento são geralmente os mesmos, definidos como a alteração das características reológicas e de desempenho do ligante envelhecido usando agentes de reciclagem (TABATABAEE & KURTH, 2017). De acordo com Kaseer, Martin, & Arámbula-Mercado (2019), existem três fatores que podem afetar o mecanismo de rejuvenescimento: (a) dispersão do ligante virgem, do ligante envelhecido e do rejuvenescedor na mistura; (b) difusão do rejuvenescedor no ligante reciclado; e (c) compatibilidade entre o rejuvenescedor e todas as misturas de ligantes.

Normalmente os agentes rejuvenescedores são usados para aumentar a proporção de RAP que pode ser adicionada as misturas asfálticas a quente (MAQ). Porém, também é possível se obter um teor mais elevado de RAP por meio da utilização de ligantes mais macios. O uso destes compensa a rigidez do ligante envelhecido do RAP e melhora a trabalhabilidade da mistura final. Além disso, existe uma desvantagem de usar RAP em MAQ, pois as altas temperaturas de usinagem podem causar envelhecimento de curto prazo do ligante. Isso limitaria a proporção de RAP na MAQ e ainda poderia afetar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, como a trabalhabilidade e trincas por fadiga (PRADHAN & SAHOO, 2020).

No entanto, existe outra forma de aumentar a proporção de RAP na mistura asfáltica que é por meio da utilização das tecnologias de MAMs como agentes rejuvenescedores do ligante asfáltico envelhecido do RAP. A redução nas temperaturas de usinagem em uma MAM reduz o envelhecimento de curto prazo do ligante, o que pode compensar a rigidez do ligante no RAP e pode viabilizar maior incorporação de RAP nas misturas.

2.3. Tecnologias de misturas asfálticas recicladas mornas

Além das reciclagens a quente e a frio, também é possível utilizar a tecnologia de Mistura Asfáltica Reciclada Morna (MARM) que apresenta as vantagens das técnicas da MAM e do RAP simultaneamente. As MAMs podem produzir revestimentos asfálticos de boa qualidade com as Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUCs) mais baixas que as misturas a quente (MERIGHI, 2015; JI *et al.*, 2016; LUZ *et al.*, 2019).

As principais vantagens da tecnologia de MAM são: menor consumo de combustível, melhores condições aos trabalhadores, e ainda maior potencial para incorporação de RAP nas

misturas (KIM *et al.*, 2012). Além disso, a distância de transporte mais longa é outra vantagem da MAM, pois uma das principais preocupações da MAQ é a perda de calor devido ao transporte. Se o tempo de transporte for alto, a perda de calor será maior e a mistura não terá as temperaturas de compactação necessárias. A redução da taxa de perda de calor devido a temperaturas de compactação mais baixas torna a MAM mais fácil de transportar por longas distâncias sem perder as temperaturas de compactação especificadas (HETTIARACHCHI *et al.*, 2019). Em virtude disso, desde 2009 nos Estados Unidos, 26% das misturas asfálticas foram produzidas aplicando tecnologias de MAMs (HANSEN AND COPELAND, 2013).

Estudos revelaram que o uso da MAM pode proporcionar uma economia geral de energia de 18% a 30% em comparação com a MAQ convencional (HAMZAH, JAMSHIDI & SHAHADAN, 2010; ALMEIDA-COSTA & BENTA, 2016). O National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) indica que o uso da MAM pode economizar 20-25% do uso de combustível para o queimador (WEST *et al.*, 2014).

Dependendo da tecnologia de MAM usada, a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa apresenta alguma variação. Avaliações realizadas em vários países europeus (D'Angelo *et al.*, 2008 e EAPA, 2014), por exemplo, apresentaram diminuição de várias emissões ao longo do processo de produção na usina, entre elas: 30 a 40% para CO₂ (Dióxido de Carbono) e SO₂ (Dióxido de Enxofre), 50% para VOC (Compostos Orgânicos Voláteis), 10-30% para CO (Monóxido de Carbono), 60-70% para NO_x (Óxidos Nitrosos) e 25-55% para poeira. Também foram relatadas reduções de 30% a 50% para aerossóis/fumos de asfalto e Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP).

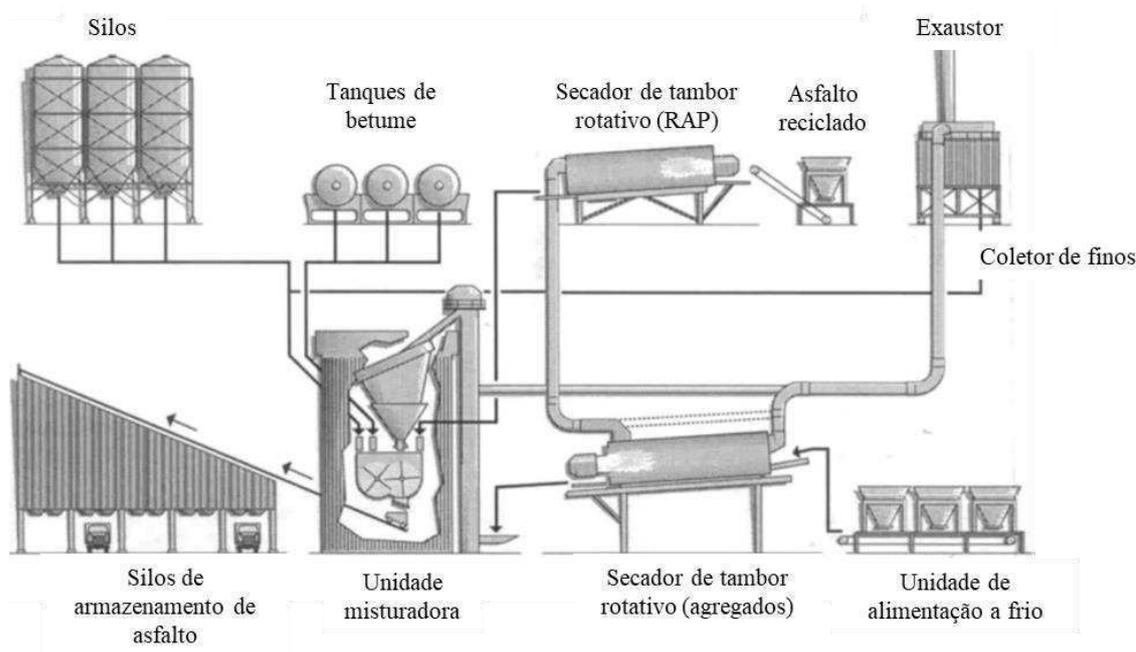
Apesar das muitas vantagens proporcionadas pelas tecnologias de MAMs, elas podem ter impactos negativos na resistência ao dano por umidade e deformação permanente das misturas asfálticas, o que pode ser devido aos agregados úmidos e à falta de aderência eletroquímica entre o ligante e a superfície do agregado como resultado de baixas temperaturas de produção (SANCHEZ-ALONSO *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2012; SOBHI, YOUSEFI & BEHNOOD, 2020).

Outra desvantagem que pode ser citada com o uso das tecnologias disponíveis para a produção de MAMs é o custo. Este custo pode ocorrer devido a necessidade de aquisição de equipamento adicional para a produção das misturas nas usinas, permitindo o uso de tecnologias ou aditivos específicos. Ou então, com o uso de aditivos que trazem algum custo suplementar, que pode ser apenas parcialmente compensado pela redução da temperatura de operação. Existe

também o risco de que algumas das vantagens ambientais reconhecidas pelas MAMs possam ser compensadas pelas emissões de carbono relacionadas à produção dos aditivos (BUTTON, 2007). Em geral, as propriedades das MAMs podem ser ditadas pelos tipos de tecnologias utilizadas, dosagens de aditivos e propriedades químicas e físicas dos componentes da mistura asfáltica (ou seja, agregado, ligante e aditivos).

A produção de MARM em usina de asfalto (Figura 7), assim como a prática de reciclagem de RAP a quente, utiliza um sistema de tambor duplo para secar e pré-aquecer materiais RAP a temperaturas variando de 110 - 160°C e agregados virgens na faixa de temperatura de 190 - 250°C simultaneamente antes da mistura com eles juntos (LIU, SHUKLA, & NANDRA, 2017). Essa prática é amplamente implementada em países europeus (MOLENAAR, MOHAJERI, & VAN DE VEM, 2014).

Figura 7 - Ilustração dos processos de produção de reciclagem RAP de alimentação a quente ou morna em uma usina de asfalto



Fonte: Adaptado Zhang, Huchet, & Hobbs (2019)

Existem várias formas de fabricar as MARMs e dependem do tipo de tecnologia de MAM adotada (aditivos orgânicos, aditivos químicos e asfalto espumado). Cada um desses processos ajuda a melhorar a capacidade de trabalho da mistura a temperaturas mais baixas de diferentes maneiras.

2.3.1. Misturas asfálticas mornas fabricadas com aditivos orgânicos

Os aditivos orgânicos agem diminuindo a viscosidade do ligante e propiciando maior trabalhabilidade para as MAMs que usam ligantes asfálticos modificados por esses aditivos. Geralmente, não são necessárias alterações em planta da usina para que esse tipo de processo seja realizado. Exemplos de aditivos orgânicos: Sasobit®, Licomont BS 100®, óleos vegetais (soja, girassol, etc).

De acordo com Bohn (2017), os aditivos orgânicos também são conhecidos como “fileres inteligentes” por promoverem redução da viscosidade do CAP na temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas e aumento desta viscosidade na temperatura de serviço do revestimento. No entanto, de acordo com a pesquisa de Carvalho (2018), o ligante modificado com 3% de óleo de girassol (aditivo orgânico) apresentou baixo ponto de amolecimento (43,8°C) e alta penetração (122,3 dmm), em comparação com o ligante 50/70 puro. Em virtude disso, as MAMs produzidas com esse teor começaram a amolecer em temperaturas acima de 40°C o que ocasionou a redução de 44% da resistência a deformação permanente, durante o ensaio de flow number. Por esse motivo cabe a ressalva que teores muito elevados deste aditivo podem ser prejudiciais à mistura asfáltica. Já as misturas produzidas com os teores de 1 e 2% de óleo de girassol apresentaram redução da resistência a deformação permanente de 19,2 e 6,4%, respectivamente, durante o o ensaio de flow number. Portanto, estes aditivos de MAMs, com percentual de adição ao ligante asfáltico estabelecido, podem proporcionar aumento da resistência à deformação permanente mesmo quando aplicadas a temperaturas de serviço elevadas, como ocorridas durante o ensaio de flow number, onde a temperatura de execução do ensaio é de cerca 60°C.

Segundo Rodríguez-Alloza & Gallego (2017), os aditivos Sasobit e Licomont BS 100 melhoraram a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, já que a mistura de controle apresentou afundamento na trilha de roda acima de 0,060 mm, enquanto que as misturas modificadas com os aditivos de MAMs apresentaram afundamentos na trilha de roda abaixo de 0,030 mm. No entanto, esses aditivos reduziram a resistência a ação deletéria da água, pois as misturas com os aditivos de MAMs apresentaram a resistência retida à tração abaixo de 96,5%, resultado encontrado para a mistura de controle. Apesar disso, pode-se ressaltar que as misturas modificadas com Licomont BS 100 apresentaram resistência acima dos 90% exigido pela norma EN 12697-12. Portanto, esses aditivos podem ser utilizados para produzir misturas

mais “limpas” devido a redução das temperaturas de usinagem e compactação sem afetar o comportamento mecânico das misturas.

O óleo de girassol pode ser uma alternativa viável para utilização como aditivo redutor das temperaturas de usinagem e compactação. Este aditivo também pode ser utilizado como aditivo melhorador da adesividade de misturas asfálticas mornas, por melhorar a resistência ao dano por umidade induzida (CARVALHO, 2018). O girassol é cultivado principalmente na Rússia, Argentina, Europa Ocidental e Oriental, China e Estados Unidos. Tem-se observado uma produção crescente no Brasil, já que representa uma alternativa econômica na rotação de cultivares (TELLES e BLOCK, 2010). Além disso, o óleo vegetal é um tipo de material ecológico, degradável, volátil e é composto principalmente de éster de ácido graxo. A adição de óleo vegetal no ligante asfáltico envelhecido pode aumentar o conteúdo de óleo leve (GONG *et al.*, 2016).

Segundo CAO *et al.* (2018), o resultado por meio do procedimento de envelhecimento à curto prazo com a estufa de filme fino rotativo mostrou que o ligante asfáltico rejuvenescido com óleo vegetal tem forte capacidade anti-envelhecimento em comparação com o ligante asfáltico virgem.

Zaumanis *et al.* (2014) estudaram em laboratório amostras com MAQ contendo 100% de RAP modificados com seis rejuvenescedores (óleo vegetal residual, gordura vegetal residual, óleo orgânico, óleo alto destilado, extrato aromático e resíduos de óleo de motor) e constatou que os rejuvenescedores de base biológica tiveram melhor desempenho em comparação com os rejuvenescedores à base de petróleo. Porém, as amostras rejuvenescidas exigiam maiores energias de compactação do que as virgens.

Diversas pesquisas foram realizadas (JI *et al.*, 2016; NAYAK & SAHOO, 2015; PORTUGAL *et al.*, 2017; SILVA, 2016; ZARGAR *et al.*, 2012;) com o emprego de aditivos orgânicos a base de óleos vegetais como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas que contêm material fresado, pois a incorporação do aditivo ao ligante asfáltico contribui para a redução da viscosidade e pode realizar a reposição de compostos aromáticos que devolvem ao asfalto a característica original de consistências perdidas pelo envelhecimento do ligante ao longo do tempo de serviço do pavimento.

Além disso, óleos residuais também podem ser utilizados como rejuvenescedores do ligante envelhecido do RAP devido a seus componentes de óleo mais leves semelhantes ao

ligante asfáltico novo. Yan *et al.* (2021) investigaram a viabilidade e desempenho mecânico de dois tipos de misturas asfálticas (com ligante Pen70 envelhecido e com ligante modificado com SBS) rejuvenescidas por óleo de tungue e óleo de cozinha residual. As misturas asfálticas rejuvenescidas foram referidas como grupos experimentais e as duas misturas betuminosas virgens como grupos controle. Os resultados do ensaio de módulo de rigidez à tração indireta cíclico indicaram que as misturas de controle apresentaram módulo acima de 1700 Mpa enquanto que as misturas experimentais apresentaram módulo abaixo de 1590 Mpa. Portanto, as misturas rejuvenescidas apresentaram menor rigidez que as misturas de controle. De acordo com Liu *et al.* (2019), o óleo de cozinha residual pode melhorar a resistência ao craqueamento térmico do ligante asfáltico.

Torres (2020) analisou o comportamento de misturas asfálticas com o uso de material fresado e de ligante modificado com óleo vegetal residual, no qual tem maior aplicação prática. Os resultados indicaram que com o acréscimo do óleo vegetal residual foi obtida redução na viscosidade, e conseqüente, redução das temperaturas de usinagem e compactação. Por meio da análise estatística das variáveis analisadas, foi verificado que a variável que mais influenciou os resultados mecânicos foi o teor de óleo, com exceção do ensaio de Lottman modificado, onde o teor de material fresado foi mais significativo. Foi observado também redução na utilização de agregados virgens para a mistura com 60% de material fresado e redução de 1,2% de ligante asfáltico virgem comparada com a mistura sem este material, gerando economia na fabricação desta mistura.

2.3.2. Misturas asfálticas mornas fabricadas com aditivos químicos

Os aditivos químicos são usados para facilitar a lubricidade das partículas dos agregados a temperaturas mais baixas de produção, porque eles trabalham como surfactantes e promotores de adesão, reduzindo a tensão superficial do ligante e o esforço necessário para mover agregados durante a compactação. Portanto, aditivos químicos interagem na superfície dos agregados para modificar e controlar o atrito interno da mistura e melhorar a trabalhabilidade do ligante (FERROTTI *et al.*, 2017).

Diversos autores (MOTTA, 2011; MOREA, MARCOZZI & CASTANO, 2012; OLIVEIRA, 2013) mostraram que a viscosidade do ligante puro permanece praticamente

inalterada após a incorporação de aditivos químicos, mesmo que permitam obter trabalhabilidade razoável e esforços adequados de compactação.

Vários aditivos químicos estão disponíveis comercialmente, como Zycotherm, Rediset, Cecabase e Evotherm (CHERAGHIAN *et al.*, 2020). Além desses, pode-se citar também: Revix, QPR QualiTherm, Gemul XT-14 e o WarmGrip. Nenhum desses processos/produtos exige modificações importantes nas práticas utilizadas nas usinas e em campo (CERATTI, BERNUCCI & SOARES, 2015).

De acordo com Yu *et al.* (2020), o Evotherm sofreu alterações desde o seu surgimento, possuindo três gerações de produtos, podendo-se citar: a tecnologia de emulsão Evotherm (Evotherm-ET), a tecnologia de asfalto disperso Exotherm (Evotherm-DAT) e a terceira geração sem água (Evotherm-3G). O primeiro foi desenvolvido como uma emulsão asfáltica utilizada para produção de misturas mornas. A primeira geração, Evotherm ET (Emulsion Technology) é uma combinação química que permite a presença de água no ligante melhorando a adesividade. Na mistura com os agregados, a água evapora ficando apenas os agregados e o ligante asfáltico (HURLEY & PROWELL, 2006; D'ANGELO *et al.*, 2008). A segunda geração, Evotherm Dispersed Asphalt Technology (DAT), foi introduzida em 2007.

A mistura com Evotherm DAT resultou em menor quantidade de ligante na mistura, porém, os autores recomendaram manter o teor de projeto do ligante requerido pela especificação de grau de desempenho (PG) e substituir parte do ligante pelo aditivo Evotherm (HURLEY & PROWELL, 2006). Não existe necessidade de alterações na usina, apenas é preciso a utilização de uma bomba extra para injeção do Evotherm, com medidor de vazão. Com esta tecnologia, é possível produzir misturas asfálticas com as temperaturas variando entre 105°C e 120°C, dependendo do tipo de agregados, da classificação do ligante e do tipo de mistura asfáltica produzida. O ganho energético estimado fica entre 35% e 55% dependendo da umidade dos agregados e das condições ambientais. Estima-se redução em 48% dos gases do efeito estufa, 58% de óxido de nitrogênio e 41% de dióxido sulfúrico, sendo este responsável pelas chuvas ácidas (ZUBARAN, 2014).

Na terceira geração de fabricação do aditivo químico, o Evotherm® 3G, o aditivo deixa de ser a água ou o vapor de água, e passa a atuar no atrito interno entre as partículas dos agregados. O aditivo Evotherm® 3G possui moléculas tensoativas que permitem que grande parte da energia térmica necessária para a produção das misturas asfálticas seja substituída por energia química (MELLO, 2012).

Diversos estudos (YU *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2017) têm mostrado que o Evotherm aumentou a adesividade das misturas asfálticas. Foi realizado nos Estados Unidos um estudo do ligante asfáltico envelhecido e uma comparação do desempenho da mistura a quente tradicional com mistura morna utilizando três aditivos diferentes da Evotherm (ET, DAT e 3G), com base em catorze misturas. Os resultados mostraram que a resistência à ruptura térmica da mistura a quente e dos ligantes modificados com Evotherm eram semelhantes. A adição do aditivo Evotherm não comprometeu a resposta elástica dos ligantes modificados com polímeros (WU *et al.*, 2017).

O aditivo químico chamado Rediset WMX foi desenvolvido pela empresa Holandesa AkzoNobel Surfactants Company, no qual é produzido como um aditivo sólido e contém modificadores surfactantes e reológicos. Adicionalmente, o produto pode ser utilizado como aditivo melhorador de adesividade. Esse aditivo permite a redução das temperaturas entre 20°C e 35°C e possibilita o aumento da trabalhabilidade das misturas asfálticas nestas temperaturas mais baixas (BOWER *et al.*, 2015).

O Gemul XT14 é um produto da empresa brasileira Quimigel, portanto, algumas pesquisas nacionais foram realizadas utilizando esse aditivo (MOTTA, 2011; OLIVEIRA, 2013; E WARGHA FILHO, 2013). Segundo o fabricante, o Gemul XT14 é um agente tensoativo composto de amidas sintéticas que é encontrado em forma líquida. Esse aditivo pode ser utilizado em misturas mornas com ligantes convencionais ou modificados, permitindo que a temperatura da mistura asfáltica final seja até 40°C inferior à uma mistura a quente convencional.

2.3.3. Misturas asfálticas mornas fabricadas com asfalto espumado

No processo com espuma, a mistura é produzida por injeção de água durante a fase de usinagem. A adição de água pode ser feita: diretamente na mistura, ou de forma indireta por meio de uso de agregados úmidos ou de minerais hidrofílicos, sendo comumente utilizados os da família zeólito. Apresenta a vantagem, quando comparadas as outras tecnologias, de não exigir o uso de aditivos dispendiosos, porém requer uma modificação na planta da usina.

Comparado aos aditivos contendo água, o processo à base de água pode usar água diretamente, o que significa que permite que mais água seja injetada no ligante e produz uma

maior expansão de volume resultando em melhor trabalhabilidade das misturas betuminosas (MOHD HASAN *et al.*, 2019). Durante o processo de formação de espuma, é necessário um equipamento de espuma específico para permitir que uma quantidade de água seja injetada diretamente no fluxo de betume pré-aquecido com os bicos especiais (YOU *et al.*, 2018b).

A temperatura do ligante pré-aquecido é normalmente entre 150 e 180°C porque a água evapora em vapores e os vapores são encapsulados no ligante aquecido sob alta temperatura. Durante esse processo, é gerado uma grande quantidade de bolhas que reduzem a tensão superficial e adiciona a área superficial por unidade de volume de ligante (DONG *et al.*, 2017). Isso permite que o agregado seja revestido rapidamente e a mistura seja facilmente trabalhável e compactada mesmo em temperaturas de usinagem mais baixas. No entanto, de acordo com Zhu, Chen, & Yin (2017), a espuma pode dissipar em um tempo muito curto, geralmente menos de 1 min. Por esse motivo, a janela de mistura da MAM com o asfalto espumado é restringida em um curto período de tempo, enquanto o ligante asfáltico ainda está em seu estado de espuma. Quando o asfalto espumado se mistura com o agregado, pode ser gerado um revestimento forte com alta resistência ao cisalhamento da mistura.

Novos aditivos foram propostos para prolongar a janela do processo de espumação, tornando-a disponível para usinagem e compactação em larga escala, podendo-se citar como exemplo o etanol (MOHD HASAN *et al.*, 2019). Estes autores utilizaram água ou etanol para espumar o ligante asfáltico e acrescentaram o bicarbonato de sódio (NaHCO_3) como agente espumante adicional. Uma análise estatística baseada na ANOVA e na comparação de pares de Tukey foi utilizada para identificar os efeitos dos agentes espumantes na viscosidade do ligante asfáltico. Os resultados mostraram que o teor de etanol afeta significativamente a viscosidade dos ligantes espumados. Maior teor de etanol (3%) resultou em viscosidades mais baixas. No entanto, a adição de NaHCO_3 não alterou significativamente a viscosidade dos ligantes espumados com base no valor de p superior a 0,05 em um intervalo de confiança de 95%.

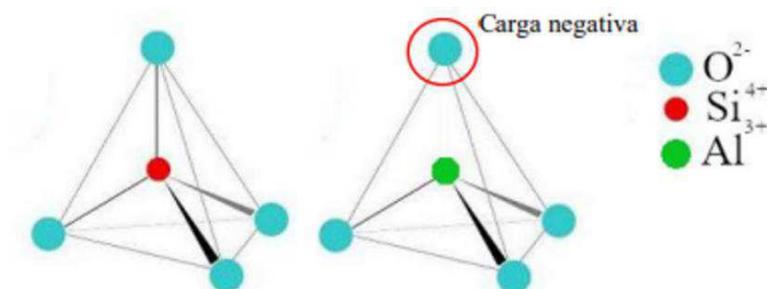
Um exemplo do método indireto foi desenvolvido na França, a tecnologia LEA® (Low Energy Asphalt) que se baseia na técnica de espumação do asfalto realizada por meio da água contida na fração miúda dos agregados (ou do RAP) para gerar, naturalmente, o processo de espumação. Outros exemplos dos métodos indiretos utilizam as zeólitas sintéticas ou materiais químicos introduzidos no agregado granítico para espumar o ligante, diminuir sua viscosidade e melhorar o revestimento dos agregados e a trabalhabilidade da mistura durante o processo de usinagem (RONDÓN & FERNÁNDEZ, 2014). Segundo Wozzuk *et al.* (2017) a estrutura da

zeólita contém aproximadamente 20% de água que pode ser liberada à medida que a temperatura aumenta. Os aditivos contendo água geralmente utilizam zeólita sintética (por exemplo, Aspha-min e Advera) para produzir efeitos espumantes.

As zeólitas podem se dividir em naturais e sintéticas. Zeólitas naturais são conhecidas como pedras ferventes (das palavras zeo “que ferve” e lithos “pedra”) que, quando aquecidas, produzem uma quantidade considerável de vapor de água, liberando assim a espuma. A formação das zeólitas naturais ocorre de alguns processos naturais, como transformações de vidros vulcânicos, e precipitação de líquidos localizados em minerais porosos. A temperatura, pressão, concentração de espécies iônicas e pressão parcial da água são agentes determinantes na formação de diferentes tipos de zeólitas naturais. Para obtenção das zeólitas sintéticas o método hidrotérmico é o mais utilizado, e consiste na síntese em sistemas aquosos que contenham os reagentes necessários para a formação das mesmas.

De acordo com Amoni (2019), as zeólitas são aluminossilicatos hidratados, cristalinos e microporosos. A estrutura cristalina das zeólitas é construída pela combinação dos tetraedros de silício e alumínio, que são ligados entre si a partir do átomo de oxigênio, localizado no vértice dos tetraedros. A combinação entre os tetraedros de silício e alumínio formam uma carga residual negativa no cristal, pois há uma diferença de cargas entre o Si^{4+} e o Al^{3+} . A carga negativa é neutralizada por íons positivos, como: prótons, cátions de metais alcalinos e alcalinos terrosos e complexos catiônicos que possuam tamanho compatível com os poros da zeólita. Os íons positivos são permutáveis e influenciam as propriedades das zeólitas. A Figura 8 apresenta a unidade básica estrutural da zeólita (basic bulding unity-BBU).

Figura 8 - Unidades estruturais básicas das zeólitas



Fonte: Amoni (2019)

De acordo com Sun *et al.* (2016b), a Aspha-min® é uma zeólita sintética produzida pela Eurovia Company, cujo principal componente é o aluminossilicato de sódio poroso contendo 21% de água cristalina e a aparência é pó branco ultrafino. O diâmetro médio das partículas de Aspha-min é de 380 µm e a densidade é de 2,0 g/cm³, que é insolúvel em água. De acordo com os produtores de Aspha-Min®, ela pode reduzir a temperatura de mistura em mais de 10°C e gerar economia de 30% no consumo de energia na usina de asfalto.

A Advera® é uma zeólita sintética (pó fino de aluminossilicato de sódio hidratado) que é cristalizada hidrotermicamente. A água representa entre 18% e 22% de sua composição. Em temperatura elevada, a água se expande e resulta no aumento do volume do ligante asfáltico. O fabricante recomenda a dosagem de 0,3 a 0,9% do peso de mistura que pode reduzir a temperatura de usinagem em 20°C. Geralmente, o aditivo Advera é adicionado em uma proporção de 0,25% e 0,3% em peso de mistura (HERNÁNDEZ, 2018; HOSSAIN *et al.*, 2012; WU & LI, 2017).

De acordo com Wozzuk e Franus (2017), as zeólitas sintéticas podem promover melhor distribuição do ligante dentro da mistura asfáltica e melhorar a trabalhabilidade das misturas asfálticas sem afetar negativamente o desempenho mecânico. Além disso, as MAMs fabricadas com zeólitas sintéticas apresentam melhores propriedades sob carga cíclica (resistência a deformação e fadiga) em comparação com as fabricadas com zeólitas naturais (TOPAL *et al.*, 2014).

Zou *et al.* (2022) indicaram que zeólitas podem ser sintetizadas a partir de cinzas de lodo de esgoto (SSA) para ser utilizada como um aditivo de MAM. Para isso, foram produzidas misturas usando zeólita derivada de SSA e Aspha-min, como aditivos de MAMs, e uma mistura de referência, MAQ, de mesma gradação, para analisar os seus desempenhos mecânicos e custo-benefício. Os resultados evidenciaram que comparado com a Aspha-min, a zeólita derivada de SSA continha uma porcentagem relativamente maior de água cristalina e proporcionou uma liberação mais gradual de água cristalina quando aquecida. Além disso, os autores concluíram que a zeólita derivada de SSA pode reduzir de 35,6% a 50% do custo por quilograma, o que apresenta suas vantagens na economia em comparação com as zeólitas comerciais.

2.4. Dosagem de misturas asfálticas recicladas

O objetivo da dosagem de misturas asfálticas recicladas é alcançar as propriedades volumétricas necessárias para um bom desempenho mecânico. Com a incorporação do RAP, é importante que as propriedades do ligante asfáltico presente nele, as características dos seus agregados, a interação com o ligante virgem e os agregados novos sejam levados em consideração na composição de uma nova mistura.

2.4.1. Dosagem nos Estados Unidos

O método de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente do Asphalt Institute (2014) considera o parâmetro RPBR (RAP Pavement Binder Ratio), que indica a razão do ligante do RAP em relação ao teor total de ligante da mistura. Para todos os níveis de RAP, precisam ser determinados o teor de ligante asfáltico e a granulometria do material reciclado. Em misturas com alto teor de RAP, as propriedades físicas do ligante também são necessárias. Segundo a AASHTO M 323 (2017), a recomendação para a seleção do grau de desempenho (Performance Grade – PG) adequado do ligante virgem é a seguinte:

- $RAP < 15\%$ → não é necessária nenhuma mudança na classificação PG;
- $15\% \leq RAP \leq 25\%$ → selecionar o ligante virgem um grau de desempenho menor que o projeto inicial;
- $RAP > 25\%$ → é recomendado a construção dos blending charts.

No entanto, segundo Singh, Sawant, & Xiao (2017), as notas de PG recomendadas pelo sistema de três camadas podem ser contraditórias devido à variação na fonte de RAP, que requer a construção de blending charts, mesmo no primeiro e segundo nível, para que as agências possam ter mais confiança na seleção do ligante de base.

De acordo com Suzuki (2019), para misturas com teores de RAP acima de 25% são recomendados a utilização de blending charts. A utilização destes gráficos pode ser aplicada para três casos: (i) determinar o grau do ligante virgem quando o teor de ligante do RAP na mistura e o PG final dos ligantes misturados são conhecidos; (ii) determinar o teor do ligante do RAP que poderá ser usado quando um grau de ligante virgem específico deve ser usado e o

PG final dos ligantes misturados são conhecidos; ou (iii) determinar o grau dos ligantes misturados quando o teor do ligante do RAP e o grau do ligante virgem são fixos.

Uma vez conhecido o PG do ligante recuperado, a temperatura crítica superior do ligante virgem ou da mistura pode ser determinada tomando por base o parâmetro %RAP, que indica o teor de RAP a ser adicionado à mistura, como apresenta a Equação 3 e, dessa forma, o ligante virgem que se adeque a esta temperatura poderá ser estabelecido.

$$T_{\text{virgem}} = \frac{T_{\text{mistura}} - (\% \text{RAP} \times T_{\text{RAP}})}{(1 - \% \text{RAP})} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

T_{virgem} é a temperatura crítica do ligante virgem;

T_{RAP} é a temperatura crítica do ligante do RAP;

T_{mistura} é a temperatura crítica da mistura de ligantes.

Os parâmetros de temperaturas intermediária e baixa, também podem ser determinadas utilizando-se a Equação 3, com os valores de m-value e BBR stiffness. De acordo com Suzuki (2019), embora no Brasil não seja utilizada a classificação PG, o clima apresenta características tropicais com grandes variações devido a grande extensão territorial do país. Portanto, o critério utilizado para a escolha do ligante irá variar 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.

Após a definição do teor de RAP e o tipo de ligante virgem, a dosagem segue o procedimento padrão da metodologia SUPERPAVE, que é realização da seleção granulométrica dos agregados virgens e dos agregados extraídos do RAP. Em seguida, é realizada a compactação para determinação do teor de ligante virgem adicional que vai depender do grau de ativação do ligante do RAP.

2.4.2. Dosagem na Europa

Os países europeus adotam a classificação do ligante na mistura reciclada baseados nos parâmetros de penetração e ponto de amolecimento, conforme a proporção em massa de cada ligante na mistura. De acordo com a norma BS EN 13108-8:2016 a classificação do ligante virgem permanece inalterada se a mistura reciclada possuir menos de 10% de ligante do RAP para camadas de rolamento, e menos de 20% para camadas de binder e base. Para o uso de maiores teores de RAP deve-se determinar a penetração e o ponto de amolecimento dos ligantes misturados, conforme as Equações 4 e 5 abaixo:

$$a \log pen_1 + b \log pen_2 = (a + b) \log pen_{mistura} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

pen_1 = penetração do ligante recuperado do RAP;

pen_2 = penetração do ligante virgem;

$pen_{mistura}$ = valor calculado da penetração do ligante da mistura;

a, b = razão, em massa, do ligante do RAP e do ligante virgem, (a+b=1,0).

$$TR\&B_{mistura} = a TR\&B_1 + b TR\&B_2 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$TR\&B_1$ = ponto de amolecimento do ligante recuperado do RAP;

$TR\&B_2$ = ponto de amolecimento do ligante virgem;

$TR\&B_{mistura}$ = valor calculado do ponto de amolecimento do ligante da mistura;

a, b = razão, em massa, do ligante do RAP e do ligante virgem, respectivamente (a+b=1,0).

2.4.3. Dosagem na Austrália e Japão

De acordo com West & Copeland (2015) tanto na Austrália quanto no Japão os blending charts também são aplicados, porém utilizando outros parâmetros para caracterização. A norma

da Austrália da Austroads AGPT-T193:2015 faz uso da viscosidade dos ligantes asfálticos, enquanto os japoneses utilizam, além da penetração dos ligantes, resultados do ensaio de resistência à tração feitos em amostras de mistura asfáltica produzidas em laboratório.

2.5. Procedimentos de extração e recuperação de ligante asfáltico

O material fresado sofre o efeito do envelhecimento tanto durante o processo de usinagem quanto durante o tempo de serviço em que o pavimento asfáltico foi submetido em campo antes de ser recuperado. Além disso, sabe-se que o envelhecimento tem um papel importante no desempenho mecânico de uma mistura asfáltica, principalmente no que diz respeito a deformação permanente e vida de fadiga. Em virtude disso é importante fazer a correta extração e recuperação do ligante asfáltico do RAP com objetivo de analisar as propriedades do ligante que irão influenciar no comportamento da nova mistura asfáltica.

Os primeiros métodos utilizados para separar o ligante de uma mistura asfáltica foram relatados no início do século XX, onde a técnica consistia na utilização do dissulfeto de carbono (CS_2) para a extração, recuperando o ligante em seguida por meio de destilação simples. Porém, com o passar dos anos percebeu-se que esta técnica não removia totalmente o solvente por completo da amostra de ligante (WAKEFIELD *et al.*, 2018).

Posteriormente com intuito de substituir o CS_2 , em 1933, Gene Abson apresentou um novo método para recuperação de ligante asfáltico que fazia uso do benzeno como solvente para extração (ABSON, 1933). Além de modificar o processo de destilação por meio da injeção de dióxido de carbono (CO_2), e com a finalidade de reduzir a pressão do vácuo aplicada e a agitação mecânica, foi facilitada a remoção do solvente em temperaturas mais baixas, de 149 a 163°C. Em 1961, foi então aprovada pela American Society for Testing and Materials (ASTM) uma normativa para recuperação de ligantes asfálticos, a atual ASTM D1856:2021 (WAKEFIELD *et al.*, 2018). No entanto, devido o caráter cancerígeno do benzeno outros solventes a base de cloro passaram a ser utilizados, a exemplo do tricloroetileno, tricloroetano e o cloreto de metileno, normatizada pela atual ASTM D2172:2017.

Além desses métodos já mencionados, em meados da década de 1970, o uso do evaporador rotativo (rotaevaporador) passou a ser utilizado por apresentar melhor desempenho quanto a remoção do solvente, sendo normatizado pela ASTM D 5404:2012. Onde, o ensaio

consiste em destilar a solução, previamente extraída pelo método centrífugo, em um frasco de destilação rotativo parcialmente imerso no banho de óleo aquecido do rotavapor enquanto a solução é submetida a um vácuo parcial e a um fluxo de gás nitrogênio ou dióxido de carbono, como resultado do ensaio tem-se o ligante recuperado.

As pesquisas desenvolvidas, entre 1969 e 2019, abordaram alguns aspectos sobre os processos de extração e recuperação do ligante oriundo do RAP, podendo-se citar: (i) aplicação de diferentes tipos de solventes e os seus efeitos nas características de ligantes asfálticos; (ii) efeito dos métodos de extração sobre as propriedades físicas, reológicas e químicas dos ligantes convencionais, ou modificados; (iii) eficiência da remoção do solvente das amostras de ligante pelos procedimentos Abson ou rotavapor, e possíveis influências nas características físicas, reológicas e químicas desses ligantes (PINHEIRO & VASCONCELOS, 2022).

Segundo Rodezno & Julian (2018) o processo de extração consiste na remoção do ligante asfáltico presente na mistura por meio da lavagem com solvente, de forma a se obter apenas os agregados. Após esse processo, pode-se quantificar o teor de ligante e determinar a curva granulométrica da mistura. Ao final do processo de extração, o ligante asfáltico que foi removido permanece misturado ao solvente que foi utilizado. Por isso, para que se obtenha o ligante asfáltico isolado é necessária ainda a etapa de recuperação, que consiste na remoção completa do solvente.

Existem diferentes métodos de extração e recuperação do ligante oriundo do RAP, com variados tipos de solventes que podem ser utilizados durante a extração, e como os tipos de solventes e processos de recuperação podem influenciar nas propriedades do ligante asfáltico recuperado. Em virtude disso, AbuHassan *et al.* (2019) estudaram o efeito de três solventes utilizados para extração (tricloroetileno, tolueno e Brometo de n-propila) sobre as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos recuperados quando utilizados com quatro ligantes de diferentes PGs (PG 58-28, PG 64-22, PG 64-28, e PG 70-22). Os resultados mostraram que ao comparar os PGs contínuos de alta e baixa temperatura dos ligantes originais e recuperados, observou-se que o tolueno resultou numa menor alteração em ambos os PGs, enquanto o efeito do tricloroetileno e o Brometo de n-propila foram mais pronunciados, especialmente no PG a baixa temperatura.

Pinheiro & Vasconcelos (2022) analisaram diferentes técnicas de extração e recuperação de ligantes que são geralmente empregadas nesses processos, e discutiram como os procedimentos e os tipos de solventes podem afetar as propriedades químicas, físicas e

reológicas de ligantes asfálticos oriundos do RAP. Verificaram então que o brometo de n-propila (BnP) e o blend de solventes clorados são alternativas mais eficazes dentre os solventes avaliados, juntamente com as extrações automatizadas (recuperação de ligante) e por ignição (definição de teor), e da recuperação pelo rotaevaporador.

2.6. Durabilidade de misturas asfálticas recicladas mornas

Com relação às misturas asfálticas recicladas, o conceito de durabilidade é a capacidade da mistura resistir aos efeitos da água, do ar, dos raios solares e da fadiga efetuada pelo tráfego de veículos. Ou seja, é a aptidão de resistir ao envelhecimento e à fadiga. Para avaliar a durabilidade devem-se verificar as propriedades da mistura antes e após sua aplicação em campo em termos de resistência à tração, dano por umidade, deformação permanente, módulo dinâmico e resistência à fadiga.

É importante estudar a durabilidade das misturas recicladas mornas para obter indicadores do desempenho do pavimento, e também para justificar a utilização das misturas asfálticas recicladas combinadas com a tecnologia de MAMs, cuja durabilidade deve ser, pelo menos, equivalente as misturas de referência (mistura a quente tradicional sem a utilização de RAP). Vários estudos (CHENG *et al.*, 2021; KIE BADROODI *et al.*, 2020; YIN & PAN, 2022) têm demonstrado a viabilidade técnica de combinar técnicas de RAP e MAM, mas alguns aspectos relacionados a durabilidade dessa combinação ainda precisam ser explorados.

Zhang *et al.* (2019) desenvolveram um teste de varredura de amplitude linear da matriz de agregados finos (MAF), que é uma parte crucial na resistência à fadiga de misturas asfálticas com alto teor de RAP, para estudar a resistência à fadiga da mistura asfáltica, verificou-se que à medida que o teor de RAP aumentava, o módulo da MAF seria aumentado, acompanhado de uma queda no ângulo de fase. A vida de fadiga da MAF seria reduzida quando a taxa de substituição do ligante RAP atingisse 50%. Zhang *et al.* (2021) analisaram a correlação entre tempo e teor de RAP e o MAF, então sugeriram que o tempo de envelhecimento e o aumento do teor de RAP teriam um efeito negativo no desempenho em fadiga de MAF.

Gennesseaux (2015) analisou a durabilidade das misturas asfálticas recicladas com taxas elevadas de RAP (50%), com o objetivo principal de compreender se existe benefícios nas propriedades mecânicas de misturas mornas recicladas. Para essa análise, foi realizado o ensaio

de fadiga que é um dos ensaios que permitem melhor avaliar e comparar diferentes misturas asfálticas para comporem uma camada de pavimento. Porém, este ensaio não pode ser diretamente transposto à previsibilidade de campo por ter restrições, tais como o ligante das amostras ensaiadas não teve tempo de envelhecer; e as misturas asfálticas, dependendo da quantidade de RAP e da temperatura de usinagem, podem envelhecer em velocidades diferentes em campo. Em virtude disso, a autora propôs a adição de uma etapa de envelhecimento previamente aos ensaios mecânicos. Os resultados indicaram que uma mistura reciclada morna pode ser utilizada como camada de revestimento asfáltico, exceto que ela tem a tendência de ser mais sensível à fadiga que uma mistura com a mesma composição de agregados e de teor de ligante, fabricada a quente ou morna, mas sem a adição de RAP.

2.7. Desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas

O desempenho mecânico de uma mistura asfáltica reciclada que utiliza elevadas porcentagens de RAP é muito influenciado pela rigidez da mistura. De acordo com diversos estudos (HETTIARACHCHI *et al.*, 2019; LU *et al.*, 2019; ZIARI *et al.*, 2021), quanto maior o teor de RAP, maior a rigidez das misturas, o que melhora a resistência a deformação permanente, mas pode afetar a durabilidade destas misturas pois reduz a resistência ao trincamento por fadiga. O aumento da rigidez dessas misturas é devido à presença de ligante envelhecido do RAP e algumas estratégias, como o uso de agentes rejuvenescedores e tecnologias de MAMs, podem superar esses efeitos negativos (BAGHAEE MOGHADDAM & BAAJ, 2016; YOUSEF *et al.*, 2021a).

A temperatura de usinagem e compactação reduzida da MAM limita a oxidação indesejável do ligante e pode compensar o ligante rígido presente na mistura asfáltica reciclada. Além disso, a MAM é menos afetada pelas condições de envelhecimento em comparação com a mistura a quente convencional (PICCONE *et al.*, 2020).

Valdes-Vidal, Calabi-Floody, & Sanchez-Alonso (2018) analisaram o comportamento mecânico de MAMs projetadas com uma zeólita natural chilena (clinoptilolite-modernite type) e diferentes quantidades de RAP (10%, 20% e 30%) para a construção sustentável de pavimentos. Os resultados indicaram que as MAMs com zeólita natural podem ser fabricadas a uma temperatura de 20°C abaixo da mistura a quente de referência, atendendo às

especificações do projeto. O comportamento à fadiga das MAMs com apenas zeólita natural adicionada foi semelhante a MAQ. No entanto, valores de deformação mais baixos no mesmo ciclo de carga foram obtidos no ensaio de fadiga à medida que o teor de RAP aumentou.

Yousefi *et al.* (2021a) investigaram o efeito de quatro aditivos diferentes de MAMs no desempenho mecânico de misturas contendo até 50% de RAP. Os resultados indicaram que os aditivos MAMs poderiam melhorar a resistência a fadiga e módulo resiliente. Além disso, o tipo de aditivo de MAM influencia na resistência ao dano por umidade, pois dependendo do tipo de aditivo utilizado a resistência a ação deletéria da água aumenta ou diminui.

Oliveira (2013) avaliou o desempenho de MARMs em laboratório e em campo no que diz respeito ao seu comportamento mecânico por meio de ensaios como: módulo de resiliência, resistência à tração, vida de fadiga e *creep* dinâmico. As MARMs foram dosadas com 15, 35 e 50% de RAP em suas composições e com a utilização do aditivo surfactante de MAM Gemul XT-14®. As MARMs apresentaram parâmetros volumétricos e comportamento mecânico similares se comparados aqueles obtidos para as misturas asfálticas convencionais. Além disso, o aditivo de MAM diminuiu a rigidez da mistura asfáltica reciclada. Esses resultados foram alcançados sem a necessidade de nenhuma adaptação da usina de asfalto para a produção dessas misturas. Foi possível obter uma economia no consumo de ligante novo de até 45% e de agregados virgens de até 50%, além de uma possível diminuição do consumo energético durante o processo de produção dessas misturas asfálticas devido a redução das temperaturas em até 40°C.

A produção das MARMs apresenta resultados contraditórios em diferentes pesquisas com relação ao desempenho mecânico. Sabe-se que alguns fatores podem influenciar nesse comportamento como o tipo de tecnologia de MAM (GUO *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2017; SOBHI *et al.*, 2020), o conteúdo de RAP (LU *et al.*, 2019), a temperatura de produção (RATHORE & ZAUMANIS, 2020), e o condicionamento em laboratório (FAKHRI & HOSSEINI, 2017).

Em campo, outros fatores também podem influenciar nos comportamentos discrepantes do desempenho mecânico das misturas recicladas mormas, que é a condição de produção térmica, incluindo tipo de usina, tempo de mistura, temperatura e tempo de armazenamento do silo, entre outros (ZHANG, HUCHET, & HOBBS, 2019). Portanto, sem o conhecimento adequado e particularizado de como foi realizada a mistura asfáltica o seu desempenho mecânico pode ser enganoso. Além disso, de acordo com Zaumanis & Mallick (2015), a falta de conhecimento sobre a produção de misturas RAP são uma das barreiras que impedem

maiores taxas de reciclagem de RAP em misturas asfálticas. A seguir, são apresentados alguns resultados de pesquisas de diversos autores, compreendendo o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas mornas.

2.7.1. Resistência à Tração

Com relação à resistência à tração, existe uma tendência de aumento desse parâmetro com aumento do teor de RAP incorporado nas misturas. O aumento do percentual de RAP tende a apresentar uma rigidez mais elevada que favorece o aumento nos valores de resistência à tração (RT). Isso acontece pois, à medida que se aumenta o teor de fresado, aumenta-se também a quantidade de ligante envelhecido (oriundo do material fresado) em relação ao ligante virgem (OLIVEIRA, 2013).

De acordo com a Yu *et al.* (2014) a oxidação do ligante do RAP geralmente contribui para o aumento da rigidez e para redução nas propriedades de relaxamento de tensão. Portanto, isso pode ter ocasionado o aumento da resistência à tração indireta da mistura.

Monu *et al.* (2019) estudaram o efeito da utilização das tecnologias (RAP e MAM) variando duas fontes de RAP (R1 e R2) e duas proporções de utilização (35% e 70%) sobre as propriedades mecânicas das misturas. Os resultados indicaram que as incorporações de RAP aumentaram consideravelmente a RT das misturas analisadas, independentemente da fonte de original. Da mesma forma, os aditivos de MAMs também aumentaram a RT das misturas, independentemente do tipo de agregado usado. No entanto, em comparação com o a adição de RAP, o aditivo de MAM contribuiu mais significativamente para o aumento da RT. Pois verificou-se que as MAQs com 35% de R1 e 70% de R1 exibiram valores de RT de 782 kPa e 1045 kPa, enquanto que, as MAMs com 35% de R1 e 70% de R1, o valor da RT foi de 1136 kPa e 1237 kPa, respectivamente, o que é cerca de 45% e 18% superior às MAQs. Comportamento semelhante foi encontrado para as misturas com R2. Além disso, constatou-se que as MARMs retêm muitas de suas propriedades, mesmo após longo prazo de envelhecimento em comparação com as misturas asfálticas recicladas a quente (MARQs).

Com relação aos valores de RT para as MARMs e para as MARQs os resultados das pesquisas apresentam muitas discrepâncias, pois alguns estudos mostram que não existe diferença entre a resistência das MARMs com relação as MARQs, como foi o caso da pesquisa

realizada por Rahman *et al.* (2019), onde a MARM a base de espuma de asfalto apresentou resistência à tração indireta de 3,76 MPa e RT de 3,74 MPa para a MARQ. Assim, a diferença entre a resistência média indireta à tração dessas misturas foi estatisticamente insignificante ao nível de 95% de confiança.

Já outros estudos relatam que a resistência da MARM é superior em comparação com a MARQ, a exemplo do trabalho de Goli & Latifi (2020). Nesta pesquisa as MARMs apresentaram maiores valores de RT do que as MARQs, indicando que existe maior coesão do ligante modificado com a tecnologia de MAM e também melhor aderência do ligante aos agregados do que as misturas a quente. Segundo esses autores, isso pode ser originado devido as propriedades físicas e químicas do ligante modificado na interface ligante-agregado. Embora o menor envelhecimento do ligante resulte em menor temperatura de usinagem, as misturas mornas apresentam menor redução da ductilidade, e a resistência à fissuração sob carga de tração é ligeiramente reduzida sob carga da RT.

2.7.2. Vida de fadiga

Com o aumento dos teores de RAP utilizados nas misturas asfálticas e as diferentes tecnologias de MAMs existentes no mercado, é importante analisar as misturas com base em sua resistência à fadiga para alcançar a vida útil pretendida. A resistência à fadiga da mistura asfáltica pode ser determinada por meio da realização de vários métodos, podendo-se citar: (i) Curvatura Semi-Circular (SCB) (HASSAN & KHALID, 2010); (ii) Fadiga de Feixe de Quatro Pontos (BF) (HUANG, SHU, VUKOSAVLJEVIC & 2011); (iii) Tração Indireta (IDT) (GONG *et al.*, 2012; WEN, 2013); (iv) Tração Direta Cíclica (CDT) (UNDERWOOD, BAEK & KIM, 2012); (v) Tração Compacta em Forma de Disco (DCT) (ASTM D 7313:2013) e (vi) Teste de Sobreposição (OT) (WALUBITA *et al.*, 2012).

O projeto 9-57 do National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, 2016) realizou um estudo interlaboratorial para comparar diferentes testes de fadiga. Neste estudo, os testes OT, CDT e BF foram sugeridos para as trincas de fadiga de baixo para cima e os testes SCB e IDT foram sugeridos para as trincas de fadiga de cima para baixo. Huang, Shu e Tang (2005) compararam os testes SCB e IDT; este estudo sugeriu que os resultados do teste SCB e IDT eram totalmente comparáveis e conversíveis. Kim, Mohammad & Elseifi (2012)

compararam as propriedades de fratura de misturas asfálticas com os resultados dos testes SCB e IDT e concluíram que os resultados dos testes SCB e IDT se correlacionam bem ($R^2 = 0,65$) para as misturas produzidas em laboratório.

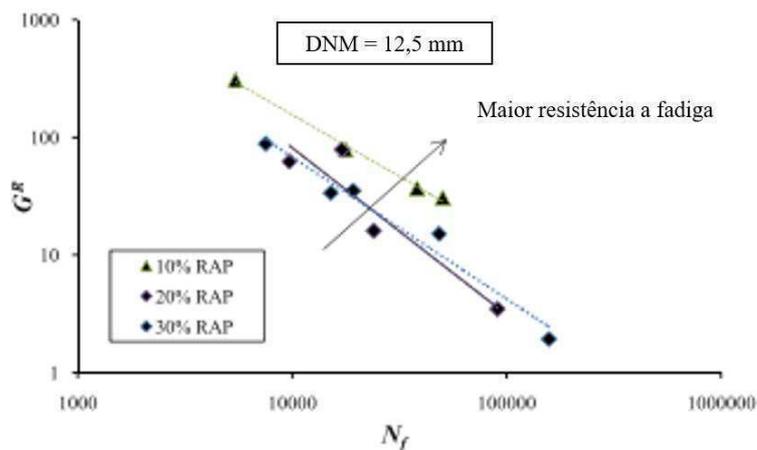
Barman *et al.* (2018) realizaram um estudo para sugerir um método de teste de fadiga simples, rápido e eficaz e um procedimento de análise de dados correspondente. Os autores indicaram que o ensaio de tração indireta, normalmente adotado nos departamentos de transportes, também poderia ser utilizado para caracterizar a resistência à fadiga de misturas asfálticas. Esses autores propuseram uma abordagem simplificada de análise de dados, onde a resistência à fadiga de misturas asfálticas foi determinada usando um parâmetro recém-derivado chamado Índice de Fadiga (f_i). Para isso, analisaram a resistência à fadiga de cinco misturas asfálticas diferentes utilizando este novo parâmetro. Os resultados indicaram que o parâmetro f_i foi capaz de discriminar estatisticamente cinco misturas asfálticas selecionadas em relação à sua resistência à fadiga. A eficácia do parâmetro f_i foi verificada por meio da investigação com suas correlações e com os resultados dos testes de fadiga de viga semicircular e de quatro pontos.

Além das diferenças entre os métodos para análise da vida de fadiga, os resultados dos ensaios para previsão da vida de fadiga de misturas asfálticas recicladas mornas são divergentes devido as diferentes tecnologias disponíveis no mercado para fabricação das MAMs, que irão proporcionar variadas vantagens e desvantagens. Portanto, o desempenho das misturas MAMs com adição de RAP depende da tecnologia selecionada. Algumas pesquisas desconsideram o tipo ou tecnologia de aditivo de MAM ao analisar o desempenho das MARMs. No entanto, é importante categorizar cada estudo com base na tecnologia MAM para avaliar o desempenho das MARMs.

Zhu *et al.* (2018) avaliaram os desempenhos de fissuração térmica e por fadiga de MARQs, com diferentes teores de RAP (10%, 20% e 30%) e granulometria (12,5 mm e 19 mm), usando dois métodos de teste: teste de tração compacta em forma de disco e abordagem de dano contínuo viscoelástico simplificado (S-VECD) usando teste de fadiga de tração uniaxial. Inicialmente, o teste de fratura DCT foi conduzido, e o índice de tenacidade (TI) foi utilizado para avaliar a capacidade de fissuração a baixa temperatura. Em seguida, o teste de fadiga foi conduzido em diferentes misturas asfálticas, e utilizando o modelo S-VECD para determinar a Curva Característica de Danos ($C \times S$) e o critério de falha baseada no número de ciclos (N_f) versus critério de falha por fadiga (G^R), como pode ser visto na Figura 9. Os dois

testes indicaram que a resistência à fadiga reduziu com a adição de RAP. Além disso, as misturas com menor conteúdo RAP e Diâmetro Nominal Máximo (DNM) de 12,5 mm apresentou melhor resistência à fratura.

Figura 9 - Critério de falha por fadiga de diferentes misturas de RAP



Fonte: Adaptado Zhu *et al.* (2018)

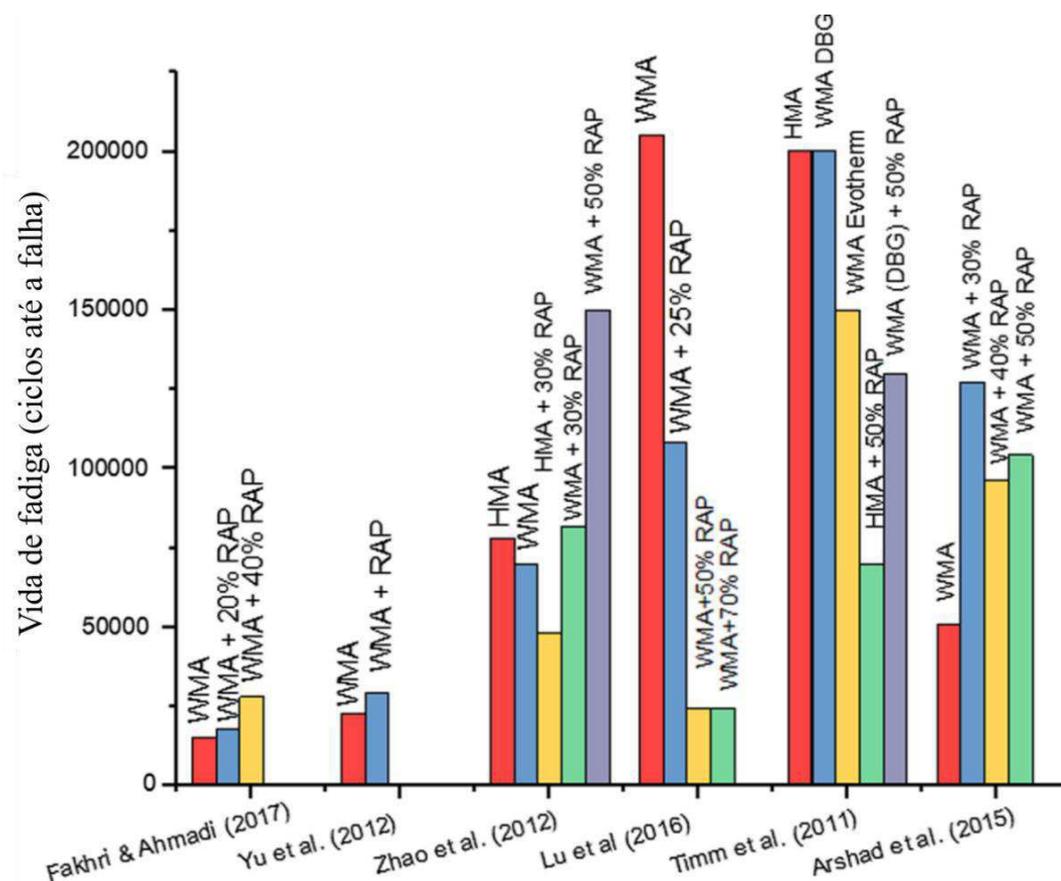
You *et al.* (2018a) destacaram que as misturas que utilizam a tecnologia de asfalto espumado são propensas a trincas por fadiga devido ao efeito da água aprisionada. Já Guo *et al.* (2014) relataram a redução da fadiga e da propensão de trincas em MAMs com a incorporação de RAP. Rahman *et al.* (2019), observaram que em termos de fadiga, ambas as misturas a quente e mornas apresentaram resistência semelhante, com diferenças estatisticamente insignificantes.

Lu & Saleh (2016) analisaram em laboratório misturas asfálticas mornas incorporando alta proporção de RAP usando os aditivos Evotherm e Sylvaroad. Para investigação da resistência à fadiga das misturas foi realizado o ensaio de vida de flexão de quatro pontos. A dimensão da amostra e a configuração do teste foram preparadas de acordo com a AG:PT/T233 - 2006 “Fatigue life of compacted bituminous mixes subject to repeated flexural bending”. A vida em fadiga foi determinada como o número de ciclos em que a rigidez da mistura degrada para 50% da rigidez de flexão inicial. Verificou-se que a MAM com Sylvaroad teve melhor desempenho no que diz respeito à resistência à fadiga. No entanto, todas as outras misturas

MAM e MAM-RAP tiveram números significativamente menores de ciclos para atingir a falha por fadiga do que a a mistura a quente.

De acordo com Sengoz *et al.* (2017), é importante ressaltar que quase todos os estudos que utilizaram MAMs fabricadas com aditivos orgânicos relataram um resultado positivo de desempenho de fadiga em comparação com as misturas de controle. No entanto, foram obtidos resultados negativos para as MAMs produzidas usando a tecnologia de asfalto espumado e aditivos químicos. Porém Kim *et al.* (2017) apresentaram resultados positivos de fadiga para os aditivos químicos. A Figura 10 apresenta a vida à fadiga de várias misturas obtidas em diversos estudos.

Figura 10 - Vida à fadiga de várias misturas MARMs com base na literatura



Fonte: Adaptado Hettiarachchi *et al.* (2019)

De acordo com a Figura 10 percebe-se a tendência de aumento da vida de fadiga para as MAMs combinadas com RAP, com exceção dos estudos realizados por Lu *et al.* (2016) e Timm *et al.* (2011), em que o incremento do teor de RAP diminuiu a vida de fadiga das misturas.

Nos estudos de Timm *et al.* (2011) e Zhao *et al.* (2012), observa-se que realizando uma comparação apenas entre a MAQ convencional com a MAM, sem as incorporações de RAP, ocorre diminuição da vida de fadiga. Este fato indica que quando a MAM é utilizada individualmente, a mesma apresenta algumas desvantagens, como a redução da resistência à vida de fadiga. Além disso, percebe-se também nos trabalhos de Timm *et al.* (2011) e Zhao *et al.* (2012), que quando comparadas as MARQs com as MARMs, estas apresentam maior resistência de vida de fadiga, ou seja, suportam um maior número de ciclos até a falha.

Portanto, as principais razões para conclusões tão divergentes e contraditórias são a disponibilidade de inúmeras tecnologias disponíveis para fabricação das MAMs, inconsistência nos materiais RAP, uso de várias porcentagens de RAP, adesão a diferentes métodos de teste para avaliar o desempenho e a generalização da MAM como tecnologia única.

Além disso, essas divergências nos resultados de vida de fadiga também podem suceder devido a suposição de que ocorre 100% de ativação do ligante do RAP. Pois, isso pode resultar em misturas asfálticas com menor teor de ligante total que o ideal selecionado no projeto da mistura. Nesse caso, as misturas asfálticas podem se tornar secas com alto volume de vazios de ar, proporcionando problemas de revestimento e trincas por fadiga. Pelo contrário, se considerar que não ocorre nenhuma ativação do ligante do RAP, as misturas apresentam problemas de deformações, devido ao excesso de ligante na mistura total.

2.7.3. Dano por umidade induzida

A susceptibilidade a danos por umidade é uma preocupação nas MARMs, Dinis-Almeida *et al.* (2016) estudaram o emprego de 100% de RAP com emulsão asfáltica para obter misturas de asfalto reciclado a temperaturas mais baixas. As misturas de asfalto reciclado obtiveram melhores resultados de susceptibilidade à ação deletéria da água que as misturas a quente, sendo seu comportamento à fadiga semelhante.

Zhao *et al.* (2013) acreditam que os ligantes e agregados envelhecidos do RAP têm uma ligação mais forte do que um sistema de ligantes e agregados virgens, levando a uma mistura com menor susceptibilidade à ação deletéria da água. No entanto, o aumento da dureza da mistura, quando combinado com o RAP, pode ser mais uma razão para o aumento da RRT. Singh *et al.* (2017) entendem que o uso do RAP deve ser limitado até certo ponto e que o seu

uso em elevadas porcentagens pode prejudicar o pavimento. Estes autores, afirmam que o uso do RAP a 30% provoca um aumento no valor da RRT, no entanto, a mistura com 40% de RAP tem um valor de RRT mais baixo em comparação com a mistura de controle. No entanto, alguns fatores podem ter influenciado nos resultados contraditórios dessas pesquisas, como o aditivo e a tecnologia de MAM, tempo e temperatura de mistura, além da heterogeneidade do RAP utilizado.

Moghadas Nejad *et al.* (2014) indicaram que a porcentagem ótima de RAP em misturas relativas a danos por umidade é de 50% e que uma mistura com 60% de RAP perde resistência. Porém, esses autores podem não ter levado em consideração que o projeto dessas misturas asfálticas com elevado teor de RAP sob a suposição de ativação completa do ligante do RAP pode resultar em misturas com teor insuficiente de ligante e, assim, aumentar a suscetibilidade aos danos por umidade. Além disso, se o asfalto reciclado tiver apresentado falhas de resistência ao dano por umidade, é possível que esse problema de falta de adesividade aconteça novamente na incorporação do RAP em uma nova mistura asfáltica. Para superar este problema, são recomendados a utilização de agentes rejuvenescedores ou aditivos melhoradores da adesividade do asfalto.

2.7.4. Deformação permanente

Com relação a deformação permanente existe a tendência de que a inclusão de RAP nas misturas mornas melhoram a resistência a deformação permanente (MOGHADAS NEJAD *et al.*, 2014; ZHAO *et al.*, 2013). Rahman *et al.* (2019) utilizaram o equipamento Hamburg Wheel Tracking (HWT) para avaliar o potencial de deformação permanente de misturas asfálticas recicladas a quente e mornas (tecnologia de asfalto espumado). Esse ensaio de HWT tem se tornado mais comum pois simula dados de desempenho em campo razoavelmente bem. Os resultados dos ensaios indicaram que as misturas com mesmo teor de RAP, apresentaram profundidades de deformações mais altas para as MAMs do que para as MAQs para um número semelhante de passagens da roda, essas diferenças aumentaram com o maior número de passagens de roda.

Ao longo dos anos, vários estudos indicaram que o RAP envelhecido pode levar a misturas quebradiças com comportamento de relaxamento reduzido e, portanto, mais propensas

a trincas em temperaturas mais baixas e sob carregamentos repetidos (MENSCHING *et al.*, 2014; YOU *et al.*, 2011). No entanto, o aumento da rigidez do material reciclado pode ser benéfico em altas temperaturas, resultando em pavimentos com melhor desempenho contra deformação permanente (ZHANG & BAHIA, 2021).

Imaninasab, Loria-Salazar & Carter (2022) analisaram algumas modificações de práticas e critérios no projeto de misturas para uma melhor fabricação de misturas asfálticas com elevados teores de RAP. Para isso, usaram os conceitos de granulometria grossa e granulometria fina do método Bailey, em misturas contendo 57%, 65%, 73%, e 100% de RAP. De acordo com esses autores, o volume de vazios também é um fator importante na profundidade da deformação permanente. Para análise da deformação permanente realizaram o ensaio de trilha de roda do Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC) em diferentes misturas conforme o método LC 26–410: “Résistance à la déformation des enrobés à l’essai d’orniérage”, usando amostras retangulares de 500×180×50 mm.

Os resultados indicaram que as misturas com 100% de RAP apresentaram um volume de vazios maior do que as misturas com 57%, 65% e 73% RAP. Isso está relacionado com a propriedade intrínseca de uma mistura mal graduada: as partículas não fornecem espaço suficiente para acomodar o ligante, em vez disso, forçam a saída do ligante e causam escoamento. As misturas com 100% de RAP apresentaram uma resistência à deformação inferior em comparação com outros tipos de mistura, devido as amostras serem mal graduadas e apresentarem volume de vazios mais altos, embora tenha um ligante asfáltico mais rígido. Para uma melhor visualização, os perfis de diferentes tipos de mistura após o ensaio LPC de deformação permanente estão representados na Figura 11.

Figura 11 – Misturas: a) 100% de RAP; b) 73% de RAP; c) 65% de RAP e d) 57% de RAP.



Fonte: Imaninasab, Loria-Salazar & Carter (2022)

Por meio da Figura 11 verifica-se que existem diferenças evidentes entre a mistura com 100% de RAP e as outras. Percebe-se que as misturas com 100% de RAP não tem esqueleto agregado forte e as partículas grossas são dispersas dentro de partículas mais finas. Em contraste, as misturas com 57%, 65% e 73% de RAP parecem ter uma estrutura agregada forte semelhante. Isso indica outra razão para um desempenho de ruptura mais elevado destas em comparação com as misturas com 100% de RAP, este fato amplia o papel da estrutura do agregado e a importância de restaurar a graduação do RAP. Além disso, as misturas com 73% de RAP apresentaram uma resistência à deformação inferior em comparação com 65% de RAP, demonstrando o papel importante dos agregados miúdos no desempenho à deformação permanente. Pode-se concluir que a fração fina e a fração grossa das misturas devem ser levadas em consideração, pois essas frações são fundamentais no desempenho à deformação permanente para as misturas com elevado teor de RAP.

2.8. Considerações sobre o tema abordado

A busca por alternativas economicamente sustentáveis aplicadas à pavimentação têm sido amplamente discutidas. Em virtude disso, a utilização do RAP e das MAMs na composição de novas misturas asfálticas são amplamente aprovadas pelo setor de infraestrutura. No entanto, há incertezas com relação ao efeito que diferentes métodos de produção das MAMs (orgânico, químico e asfalto espumado) pode proporcionar para a incorporação de elevadas quantidades

de RAP na composição de novas misturas asfálticas. Ao analisar os diferentes aditivos de MAMs espera-se identificar se estes poderão proporcionar o aumento da taxa de RAP e qual aditivo apresentará melhor desempenho mecânico.

Considerando que a ativação parcial do ligante do RAP é o cenário mais aceitável para a composição de novas misturas asfálticas, é necessário a análise do grau de ativação do ligante do RAP das misturas asfálticas recicladas. Existe uma falta de recomendação e especificação sobre como conceber misturas recicladas nesta situação. Por isso, esta análise é orientada, pois sabe-se que o ligante presente no RAP é ativado, mas não se sabe quanto dele realmente interage com o ligante novo. Ressalta-se também que quanto menor o teor de ligante adicionado nas novas misturas, menor o custo necessário para implantação de um novo pavimento asfáltico, não implicando necessariamente que este tenha um comportamento pior que sua mistura de referência.

Além disso, o ligante envelhecido do RAP influencia na rigidez das misturas asfálticas recicladas. Portanto, misturas asfálticas com elevados teores de RAP apresentam maior rigidez e necessitam da incorporação de um ligante asfáltico mais macio ou um agente rejuvenescedor para compensar a rigidez da mistura reciclada. Ao longo deste capítulo, mostrou-se que os aditivos de MAMs podem atuar diminuindo a rigidez das misturas recicladas devido ao menor endurecimento do ligante asfáltico e a da redução das temperaturas de usinagem e compactação.

Para o estudo do desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas mornas, é necessário o desenvolvimento de um quadro experimental que analise todas as principais variáveis que podem prejudicar o desempenho de uma mistura asfáltica com altas porcentagens de RAP, podendo-se citar: rigidez, deformabilidade, susceptibilidade à danos por umidade e a trincas por fadiga.

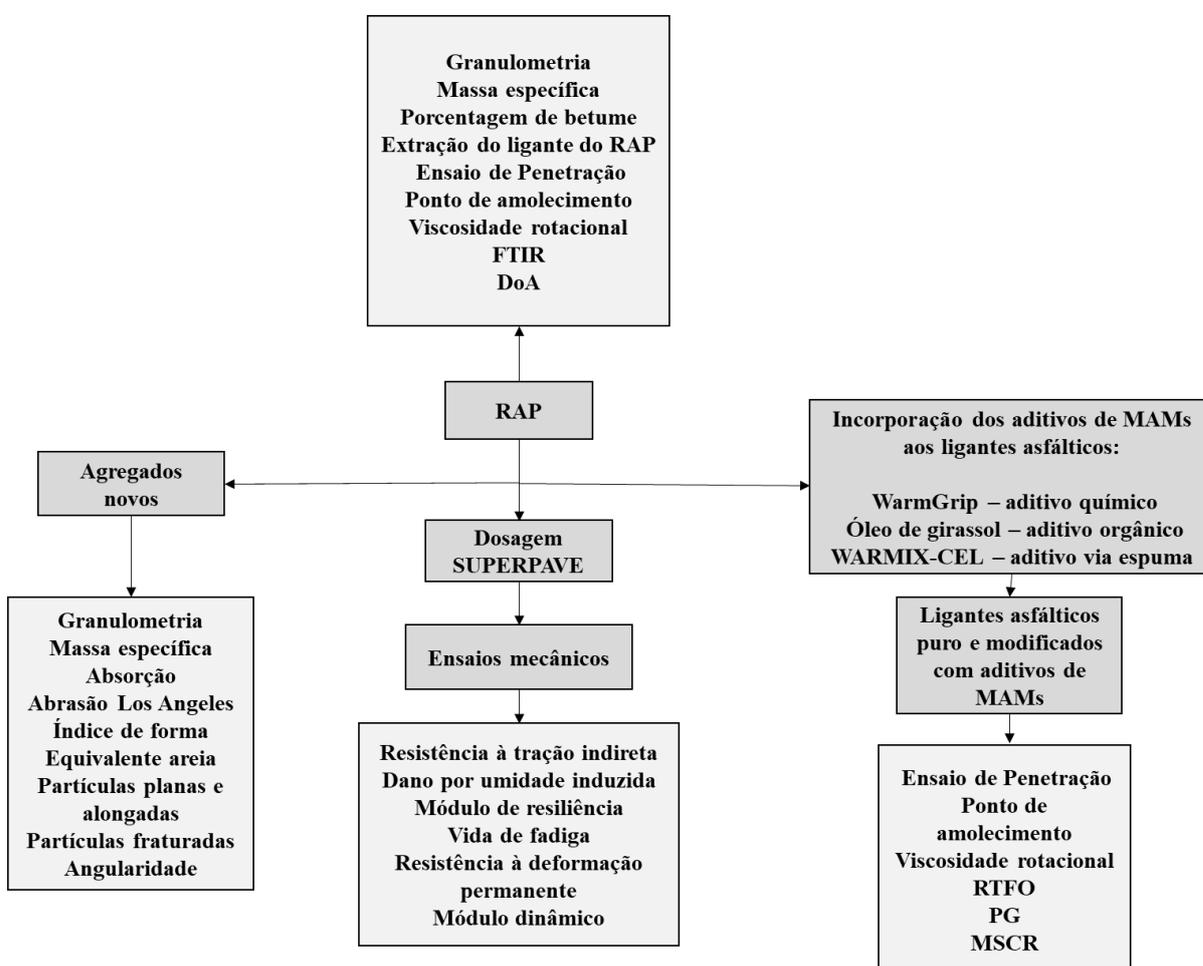
Assim, a ideia principal desta tese é determinar se os aditivos de MAMs podem atuar como agente rejuvenescedor do ligante asfáltico envelhecido do RAP e se a combinação do RAP e das MAMs irá prejudicar o comportamento mecânico dessas misturas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico descreve os materiais utilizados nesta pesquisa para compor as misturas asfálticas recicladas mornas e quentes. São apresentados também os procedimentos realizados para avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas. A maior parte dos procedimentos descritos neste do trabalho foi realizada no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Os métodos de ensaios utilizados são baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da ASTM (American Society for Testing Materials), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). A metodologia adotada está apresentada no Fluxograma da Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma das etapas de realização desta pesquisa



3.1. Ligante asfáltico

O ligante asfáltico de classificação 50/70 foi utilizado para compor as misturas asfálticas, tendo sido cedido pela empresa Rocha Cavalcante. A escolha deste tipo de ligante foi estabelecida pelo fato deste ser o mais utilizado na Região Nordeste do Brasil. A Tabela 1 apresenta os procedimentos e respectivas normas usadas para avaliar as características físicas e reológicas do ligante puro. Todos os ensaios realizados para o ligante asfáltico puro também foram executados com as amostras dos ligantes asfálticos modificados pelos aditivos de MAMs.

Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e PG foram realizados com amostras de ligante asfáltico virgem e envelhecidas pelo procedimento de envelhecimento à curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (Rolling Thin Oven Test - RTFO). Os ensaios de viscosidade rotacional foram realizados usando um viscosímetro rotacional da marca Brookfield e o ensaios de reologia, em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1).

Tabela 1 - Procedimentos realizados para caracterizar o ligante asfáltico

Procedimento	Método de ensaio
Penetração	DNIT 155:2010 – ME
Ponto de amolecimento	DNIT 131:2010 – ME
Viscosidade rotacional	NBR 15184:2005
Rolling Thin Oven Test (RTFO)	ASTM D 2872:2012
Performance Grade (PG)	ASTM D6816:2011
Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	ASTM D7405:2015

A partir dos resultados de penetração e de ponto de amolecimento, foi possível calcular o índice de suscetibilidade térmica (ISC) (Equação 6), que indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura.

$$ISC = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C) - 1951}{120 - (50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

T°C = Ponto de amolecimento;

PEN = Penetração a 25°C, 100 g, 5 seg

Além disso, foi possível calcular a penetração retida (PENretida), de acordo com a Equação 7, por meio da relação percentual entre os resultados de penetração das amostras envelhecidas e virgens.

$$PEN_{retida}(\%) = \frac{PEN_{pósRTFO}}{PEN_{antesRTFO}} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

PEN_{pósRTFO} = Valor de penetração após o procedimento RTFO

PEN_{antesRTFO} = Valor de penetração antes do procedimento RTFO

Finalmente um outro parâmetro calculado foi a variação no ponto de amolecimento que indica a susceptibilidade do ligante asfáltico ao envelhecimento e consiste na subtração entre o ponto de amolecimento da amostra envelhecida e o ponto de amolecimento da amostra virgem.

O ensaio de Performance Grade foi realizado verificando-se o parâmetro G*/senδ conforme a variação de temperatura, partindo de 46°C, com incrementos de 6°C. O valor do o PG é dado pela temperatura anterior à da falha verificada no ensaio.

O ensaio de MSCR foi realizado na menor temperatura de PG verificada entre a amostra de ligante virgem e após RTFO. As amostras usadas são de ligante asfáltico envelhecidas pelo RTFO. Durante o ensaio são aplicados 20 ciclos de tensão ao ligante asfáltico, sendo os 10 primeiros ciclos sob a tensão de 0,1 kPa e os demais sob a tensão de 3,2 kPa. A partir dos resultados da deformação das amostras devido às tensões, são calculados as compliâncias não-recuperáveis (Jnr), a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis de 0,1 kPa e 3,2 kPa (Jnr diff) e porcentagem de recuperação elástica (%R).

A Tabela 2 apresenta a caracterização do ligante asfáltico puro. Nesta tabela também são apresentadas as especificações recomendadas pela especificação de serviço DNIT 095/2006 para ligantes asfálticos do tipo 50/70 e as recomendações da AASHTO M320 (2016) para os resultados de MSCR.

Tabela 2 - Caracterização do ligante asfáltico puro

Característica	Resultado	Especificação
Penetração (0.1 mm)	66,3	50 a 70
Ponto de amolecimento	48,3	≥ 46 (°C)
Índice de susceptibilidade térmica (IST)	-0,97	-1,5 e +0,7
	135 °C	≥ 274
Viscosidade rotacional (cP)	150 °C	≥ 112
	177 °C	57 a 285
Temperatura mais alta do PG (°C)	64	-
Jnr 0,1 (kPa ⁻¹)	3,88	-
Jnr 3,2 (kPa ⁻¹)	4,16	Tráfego padrão: ≤4.0
Jnr _{diff} (%)	7,2	≤75
R _{0,1} (%)	1,48	-
R _{3,2} (%)	0,28	-

Os resultados obtidos na caracterização do ligante demonstram que o ligante asfáltico analisado é adequado para serviços de pavimentação, tendo em vista que todas as características analisadas se encontram dentro critérios estabelecidos para o CAP 50/70 pelo DNIT 095/2006. Pode-se afirmar também que o ligante asfáltico estudado é classificado como PG 64-XX.

Para a realização do procedimento de RTFO das amostras de ligantes modificadas pelos aditivos WarmGrip, óleo de girassol, e zeólita natural, as temperaturas do ensaio foram reduzidas para 140°C, simulando assim as temperaturas de usinagem de uma MAM. Este procedimento também foi usado para determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade do asfalto.

3.2. Agregados

Os agregados novos utilizados nessa pesquisa foram fornecidos pela Pedreira Rocha Cavalcante – PB. Os agregados graúdos utilizados foram a brita 12,5mm e a brita 19mm. Os agregados miúdos empregados foram areia e pó de pedra. Foi adicionado também a cal hidratada como filler para compor as misturas asfálticas.

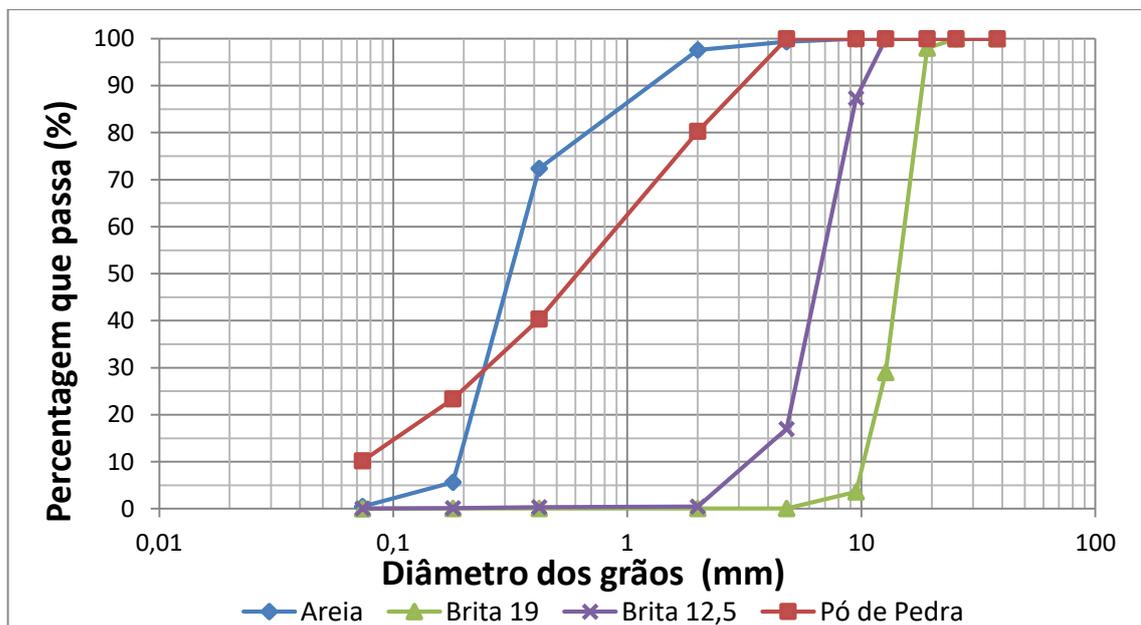
3.2.1. Granulometria

A análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdos utilizados nesta pesquisa foi realizada segundo a norma DNIT 411:2019 - ME. A Tabela 3 e a Figura 13 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos materiais granulares utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3 - Granulometria dos agregados

Quantidade passante acumulada (%)					
Peneira	Peneira (mm)	Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de pedra
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100	100,00
3/4"	19,1	98,02	100,00	100	100,00
1/2"	12,7	28,98	100,00	100	100,00
3/8"	9,5	3,59	87,34	100	100,00
Nº 4	4,8	0,08	16,98	99,36	99,98
Nº 10	2	0,06	0,46	97,58	80,28
Nº 40	0,42	0,05	0,34	72,38	40,37
Nº 80	0,18	0,04	0,16	5,61	23,33
Nº 200	0,074	0,02	0,10	0,46	10,16

Figura 13 - Curva granulométrica dos agregados



Quanto à distribuição granulométrica dos grãos, os agregados graúdos e a areia apresentam graduação uniforme, enquanto o pó de pedra possui graduação densa.

3.2.2. Massa específica e absorção

Os ensaios de massa específica e de absorção dos agregados graúdos foram realizados segundo a norma do DNIT 413:2019 - ME. A determinação da massa específica e da absorção dos agregados miúdos foram realizadas segundo a norma ABNT NBR 16916:2021. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdo

Teste	Limites	Resultados			
		Brita 19mm	Brita 12,5mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real, g/cm ³	-	2,77	2,78	2,70	2,50
Massa específica aparente, g/cm ³	-	2,74	2,73	2,56	2,38
Absorção, %	≤2				

A massa específica real, a massa específica aparente e a absorção dos agregados graúdos e miúdos utilizados nesta pesquisa se encontraram dentro dos limites recomendados.

3.2.3. Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado nos agregados graúdos. Sendo realizado de acordo com a norma do DNIT-ME 035:1998. A brita 19 mm apresentou um desgaste Los Angeles de 21,01%, valor de acordo com a especificação do DNIT – ME 031/2006, que recomenda valor máximo igual ou inferior a 50%. Portanto, a brita 19 mm utilizada nesta pesquisa atende ao critério estabelecido.

3.2.4. Índice de forma

O Índice de forma foi realizado de acordo com a norma DNIT 424:2020 - ME. Na Tabela 5 são apresentados os resultados após realização do ensaio.

Tabela 5 – Resultados do índice de forma dos agregados graúdos

Agregado	Índice de forma	Critério	Requisito mínimo
Brita 12,5mm	0,74	0<f<1	0,5
Brita 19,1mm	0,88	f=1 cúbico f=0 lamelar	

É possível verificar que os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa atendem aos critérios de forma exigidos pelos órgãos rodoviários brasileiros.

3.2.5. Equivalente areia

O ensaio foi executado conforme a norma do DNIT 054:1997 – ME, os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de equivalente areia

Ensaio	Pó de pedra	Areia	Requisito mínimo
Equivalente areia	56,0%	86,39%	55%

De acordo com resultados obtidos verifica-se que a areia e o pó de pedra utilizados na pesquisa atenderam de forma satisfatória ao requisito mínimo de 55% de equivalente areia.

3.2.6. Partículas planas e alongadas

O ensaio para a determinação das porcentagens de partículas achatadas e alongadas em agregados graúdos foi realizado de acordo com a norma DNIT 429:2020 - ME. Este ensaio permitiu obter a razão dimensional entre o comprimento e a espessura de partículas de uma amostra representativa dos agregados por meio da utilização de um paquímetro. Na Tabela 7 são apresentados os resultados.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de partículas achatadas e alongadas

Ensaio	Critério	Requisito máximo	Brita 19,0mm	Brita 12,5mm
Partículas achatadas e alongadas (%)	5:1	5%	1,07	1,00

Percebe-se que tanto a brita 19 mm como a 12,5 mm atenderam aos requisitos da norma.

3.2.7. Partículas fraturadas

O ensaio para a determinação da porcentagem de partículas fraturadas em agregados graúdos foi realizado de acordo com a norma DNIT 430:2020 - ME. A porcentagem de partículas fraturadas foi determinada a partir da contagem das partículas com uma e com duas faces fraturadas em relação ao número total de partículas analisadas na amostra. A Tabela 8 apresenta os resultados.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de partículas fraturadas

Agregado	Partículas fraturadas (%)	Critério	Requisito mínimo
Brita 19,1mm	100	Duas ou mais faces fraturadas	90%
Brita 12,5mm	100		90%

Verifica-se que tanto a brita 19 mm como a 12,5 mm utilizadas neste trabalho atenderam ao preconizado por norma.

3.2.8 Angularidade

O ensaio de determinação da angularidade do agregado miúdo foi realizado de acordo com a norma DNIT 415:2019 - ME. Este ensaio determina o teor de vazios de agregados miúdos não compactados, vertidas de uma altura de queda estabelecida, dentro de um cilindro de volume conhecido (100cm³). Este teor de vazios é uma indicação indireta da angularidade, esfericidade e textura da superfície deste agregado comparado com outros agregados miúdos testados na mesma graduação. A Tabela 9 apresenta os resultados do ensaio de angularidade do agregado miúdo,

Tabela 9 - Resultados do ensaio de angularidade do agregado miúdo

Material	Densidade aparente	Vazios não compactados	Critério	Requisito mínimo
Areia	2,50 g/cm ³	45,76%	Método B	Volume de tráfego médio ≥ 40%
Pó de pedra	2,70 g/cm ³	46,58%	Método B	Volume de tráfego alto ≥ 45%

Verifica-se que tanto a areia quanto o pó de pedra atenderam ao preconizado por norma.

3.3. Óleo de girassol

O aditivo orgânico de MAM utilizado foi o óleo de girassol da marca Liza, este foi obtido no comércio local. Baseado no desempenho mecânico apresentado no estudo de Carvalho (2018), foi adotado o teor de 2% de óleo de girassol, adicionado em peso de ligante. Para o processo de produção do ligante modificado com óleo de girassol foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72.

O processo de produção do ligante modificado com o óleo de girassol foi realizado conforme as instruções da pesquisa de Carvalho (2018). O ligante foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 135°C sendo mantida a temperatura de mistura constante. O tempo de mistura foi de 20 minutos, onde gradativamente o teor de óleo de girassol foi adicionado ao ligante, a uma velocidade máxima de 410 rpm no misturador mecânico. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação.

Para quantificar a intensidade do envelhecimento das amostras de ligante com e sem o aditivo, as amostras foram submetidas ao procedimento de RTFO e posteriormente analisados pelo ensaio de espectroscopia de infravermelho por transformada de fourier (FTIR). A espectroscopia FTIR para ligantes asfálticos pode ser usada como indicador de envelhecimento do ligante asfáltico, pois permite a identificação da evolução de grupos funcionais resultantes do processo de oxidação: a Carbonila (C=O) e o Sulfóxido (S=O). Após os registros dos espectros de FTIR, foi efetuado o cálculo da concentração dos grupos funcionais (carbonila e sulfóxidos), baseado na analogia das áreas de absorção características.

Segundo Mouillet (2010) para o cálculo dos índices de oxidação Carbonilas e Sulfóxidos, devem ser aplicadas a Equação 8 e Equação 9, retiradas do método MLPC N°69 (apud CARVALHO, 2018). Nestas equações, supõe-se que o grupo Metil (CH₃ – em torno de 1375 cm⁻¹) e o grupo Etileno (CH₂ – em torno de 1460 cm⁻¹) são pouco alterados quando o ligante é oxidado. Em compensação, os Sulfóxidos (SO – em torno de 1030 cm⁻¹) e os grupos Carbonilas (CO - em torno de 1700cm⁻¹) aumentam com a oxidação.

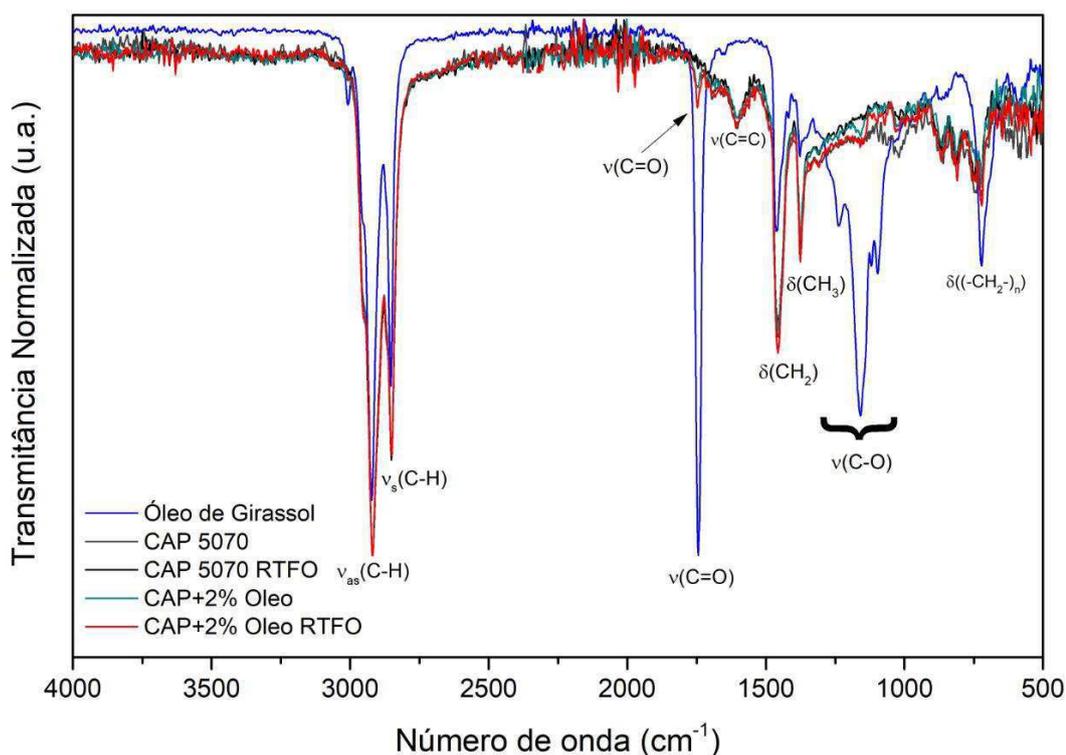
$$CO (\%) = 100 \times ICO = 100 \times \frac{(\text{Área em torno de } 1700\text{cm}^{-1})}{(\text{Área em torno de } 1460\text{cm}^{-1})+(\text{Área em torno de } 1375\text{cm}^{-1})} \quad \text{Equação 8}$$

$$SO (\%) = 100 \times ISO = 100 \times \frac{(\text{Área em torno de } 1030\text{cm}^{-1})}{(\text{Área em torno de } 1460\text{cm}^{-1})+(\text{Área em torno de } 1375\text{cm}^{-1})} \quad \text{Equação 9}$$

A Figura 14 apresenta a caracterização do óleo de girassol e do ligante CAP 50/70 puro e modificado com o aditivo, antes e após o procedimento de RTFO, por meio de FTIR. O ensaio

de FTIR (ASTM D 7653:2018) foi realizado a fim de caracterizar quimicamente a amostra por meio da identificação dos grupos funcionais presentes.

Figura 14 - FTIR do óleo de girassol e do ligante puro e modificado com o óleo de girassol antes e após o procedimento de RTFO



Observa-se que no óleo de girassol ocorreram vibrações do tipo “roking” referentes a uma banda pequena de 729 cm⁻¹, para a ligação (CH₂)_n, uma banda média de estiramento C-O ocorreu em 1168 cm⁻¹, essa ligação CO é do triacilglicerol. Ocorreram também vibrações do tipo “Scissoring” em 1465 cm⁻¹ correspondente a C-H (CH₂)_n, o quarto domínio espectral ocorreu em 1745 cm⁻¹ com modo de vibração de estiramento, e revela a existência de unidades de carbonilas (-C=O) dentro do óleo. O último domínio espectral ocorreu o pico em 2927 cm⁻¹ com modo de vibração de estiramento, que correspondem a C-H (CH₂).

Para o ligante 50/70 e para os ligantes modificados com o óleo de girassol verifica-se a presença de vibrações do tipo “roking” correspondente a picos em torno de 720 cm⁻¹ (CH₂)_n. Picos em 1462 – 1377 cm⁻¹, que se referem a deformação de CH₂ e CH₃ de estruturas alifáticas, picos em 2852 cm⁻¹ corresponde a presença de estiramento de C-H. Picos em 2922 cm⁻¹ para as ligações do tipo C-H (CH₂) que representa modo de vibração de estiramento (simétrico e

assimétrico). O ligante modificado com óleo de girassol apresenta um pico em 1740 cm^{-1} , que corresponde a unidades de carbonila (C=O), que revela a presença do óleo de girassol no ligante asfáltico.

Como porcentagem de óleo na amostra é pequena (2%) o pico aparece menor no gráfico, quando comparado com amostra do óleo de girassol puro. A diferença entre as amostras de ligantes modificados com o óleo de girassol com a amostra de óleo de girassol puro é a presença da ligação C-O que pertence ao triacilglicerol, que é a composição básica do óleo vegetal. Já a diferença entre amostras antes para as amostras após RTFO é a presença de um pico na posição 2364 cm^{-1} , que representa a tripla ligação (alcino).

A partir da área do gráfico, define-se que uma substância envelheceu mais que a outra quando a área compreendida entre as linhas dos espectros nas etapas após o envelhecimento é maior que as obtidas antes do envelhecimento o que representa uma maior oxidação. Assim, é possível quantificar a intensidade do envelhecimento de uma amostra em relação a outra. Para obter uma avaliação quantitativa do envelhecimento de cada amostra foi realizado o cálculo dos índices de Carbonilas e Sulfóxidos. A Tabela 10 quantifica as oxidações nas amostras de ligante puro e modificado com 2% de óleo de girassol antes e após o RTFO.

Tabela 10 - Oxidação das amostras de ligante com e sem o óleo de girassol antes e após o envelhecimento por RTFO

Grupo funcional	Amostra	Área de oxidação	
		Antes do RTFO	Após o RTFO
Carbonila	Ligante puro	28,83	29,06
	Ligante + 2% óleo de girassol	28,79	29,54
Sulfóxido	Ligante puro	25,07	26,79
	Ligante + 2% óleo de girassol	26,49	27,20

Sabendo que a área de oxidação é definida como sendo a área abaixo do gráfico do espectro do infravermelho que corresponde aos limites das bandas de absorção da carbonila e do sulfóxido. Por meio desses valores das áreas de oxidação de cada amostra é possível estabelecer uma comparação entre os processos de envelhecimentos ocorridos nas amostras. A área de oxidação é dada pela diferença entre a soma das áreas de oxidação de cada amostra após o envelhecimento e a soma das áreas de oxidação das amostras antes do envelhecimento

ocasionado pelo RTFO. O percentual oxidado é definido como sendo o quociente entre a diferença entre as áreas de oxidação e a área de oxidação antes do envelhecimento da respectiva amostra. A Tabela 11 apresenta a diferença entre as áreas oxidadas nas amostras de ligante sem aditivo de MAM antes e após o envelhecimento, além do percentual oxidado dessas amostras.

Tabela 11 - Diferença entre as áreas oxidadas e percentual oxidado das amostras de ligante com e sem o óleo de girassol antes e após o envelhecimento por RTFO

Amostras	Diferenças entre as áreas de oxidação (%)	Percentual oxidado (%)
Ligante puro	1,95	3,62
Ligante + 2% óleo de girassol	1,47	2,65

O percentual de oxidação do ligante puro foi de 3,62% e o do ligante com o óleo de girassol foi de 2,65%, gerando assim um indicativo de que a amostra de ligante mais o óleo de girassol envelheceu menos do que a amostra de ligante puro. Portanto, o óleo de girassol atuou como um antioxidante. Por meio dessas características antioxidantes do óleo de girassol, espera-se maiores resultados de penetração, redução das temperaturas de ponto de amolecimento e de viscosidade em comparação com os ligantes puros.

Ao mesmo tempo, deve-se levar em consideração que o envelhecimento por RTFO não simula todo o envelhecimento que um pavimento asfáltico é submetido em campo. Por isso, os percentuais de oxidação das amostras foram baixos. Para uma melhor análise das características antioxidante que o óleo de girassol proporcionaria ao ligante envelhecido do RAP, seria necessário a realização do ensaio de FTIR e o cálculo do percentual de oxidação por meio dos índices de Carbonilas e Sulfóxidos em amostras de ligantes extraídos e recuperados de misturas asfálticas contendo o RAP e o aditivo de óleo de girassol.

3.4. WarmGrip® N1

O aditivo químico de MAM utilizado foi o WarmGrip® N1, fornecido pela ArrMaz do Brasil Ltda. que pertence ao grupo ARKEMA. De acordo com o fabricante, WarmGrip®, é compatível com todos os modificadores de ligante, pois não interage com outros ligantes e componentes de mistura para afetar adversamente as suas propriedades. Até agora, não foram

encontrados artigos de pesquisa publicados com este novo produto, embora suas informações possam ser encontradas em mídias inéditas, como o site da empresa.

O fabricante indica que o WarmGrip N1 é um aditivo asfáltico que permite compactação mais fácil em campo e maior aderência do ligante asfáltico ao agregado. O WarmGrip N1 é formulado para minimizar o fumo e o odor para melhor conforto do pessoal da fábrica e da equipe de pavimentação, e é usado para projetar misturas que estejam em conformidade com especificações típicas, incluindo AASHTO T283: Método de teste de resistência à umidade por danos induzidos da mistura betuminosa compacta, AASHTO T324: Método de ensaio para Hamburg Wheel-Track de mistura asfáltica a quente compacta e AASHTO R35: Prática padrão para projeto volumétrico SUPERPAVE.

Ainda de acordo com o fabricante, o aditivo facilita a utilização de maiores quantidades de RAP nas misturas asfálticas e prolonga a vida útil do pavimento, protegendo-o contra desgaste e danos causados pela umidade, sendo necessárias poucas alterações nas usinas e em campo para sua utilização. O aditivo pode ser adicionado a uma taxa entre 0,25 e 0,75% em peso do ligante total na mistura. O teor de utilização é determinado pelo usuário com base no grau de revestimento do agregado e teste de susceptibilidade à ação deletéria da água na temperatura de produção desejada. O aditivo pode ser misturado diretamente ao ligante e agitado mecanicamente. A Tabela 12 apresenta a caracterização física do WarmGrip.

Tabela 12 - Caracterização física do WarmGrip® N1

Propriedade	Descrição
Aspecto, 25° C	Líquido de cor escura
Odor	Amina
Densidade, 25 °C	1,0 kg/L
Viscosidade, 25°C	1.650 cP
Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de Produtos Químicos (REACH)	Adequado

Wargha Filho (2013) utilizou um aditivo surfactante líquido para a produção de MAM incorporado no teor de 0,4% em peso de ligante total na mistura. Baseado no trabalho deste autor, foi adotado para esta pesquisa o teor de 0,4% de WarmGrip® adicionado em peso de

ligante total na mistura. Segundo Motta (2011), os percentuais geralmente utilizados em aditivos surfactantes líquidos ficam em torno de 0,2% a 0,5%.

Para o processo de produção do ligante modificado com WarmGrip® foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72. A mistura do ligante/aditivo foi submetida à uma rotação de 1.500 rpm por 20 minutos em uma temperatura de 130 °C, essa mistura seguiu as recomendações de Oliveira (2013) e Wargha Filho (2013). Segundo este autor, temperaturas superiores a 150°C poderiam comprometer a qualidade do aditivo surfactante.

3.5. Zeólita natural (WARMIX-CEL)

O aditivo de MAM utilizado para fabricação pelo processo de espuma foi o WARMIX-CEL, fornecido pela empresa Celta Brasil. WARMIX-CEL é um produto 100% natural composto por aluminossilicatos hidratados (zeólitas), que possuem a propriedade de absorver e liberar água de dentro de suas cavidades, proporcionando a redução da viscosidade do ligante asfáltico quando adicionado ao mesmo adequadamente. A Tabela 13 apresenta a composição química e as características do aditivo.

Tabela 13 - Composição química e as características da zeólita natural

Composição	Teor
SiO ₂	62 a 64%
Al ₂ O ₃	10 a 12%
Fe ₂ O ₃	0,8 a 1%
CaO	0,3 a 1%
Na ₂ O	4 a 6%
K ₂ O	2 a 4%
LOI	11 a 13%
Massa específica	0,98 kg/dm ³
Granulometria	325 mesh
Ponto de fusão	1300 °C
Cor	Branca, levemente esverdeada
Capacidade de liberar de 5% a 6% do seu peso na forma de água no momento da mistura	

O fornecedor do aditivo apresenta algumas recomendações de aplicação. Portanto, as misturas com a adição de zeólita natural foram realizadas em laboratório da seguinte forma:

- aquecer os agregados à temperatura de 130 °C (temperatura abaixo da usual);
- aquecer o ligante asfáltico (CAP) à temperatura de 155 °C (temperatura convencional);
- introduzir a zeólita natural em pó, no seu estado natural, junto ao ligante asfáltico (CAP), exatamente no momento da mistura aos agregados, dentro do misturador de asfalto;
- executar a compactação SUPERPAVE e procurar concluir a compactação na temperatura mínima de 90 °C.

Para a dosagem do produto, o fornecedor do aditivo sugere que seja adicionado um teor de 0,3% a 0,9% de zeólita natural, calculado sobre o peso da mistura asfáltica, aproximadamente entre 8 e 23 kg do produto para cada m³ de asfalto morno. A proporção adequada depende de avaliações em testes laboratoriais dentro dos padrões estabelecidos pela Especificação de Serviço do DNIT - ME 031/2006 - Concreto Asfáltico. De acordo com Wozzuk & Franus (2017) o teor de 0,3% de zeólita por cento de massa da mistura, é o teor de zeólita normalmente utilizado em MAMs. Além disso, estudos realizados por Rivoire Junior (2014), o teor de 0,3% em peso de zeólita natural adicionado à mistura asfáltica apresentaram bons resultados de resistência à tração, módulo de resiliência e dano por umidade induzida. Desta maneira, este trabalho adotou o teor de 0,3% de zeólita natural incorporado em peso de mistura asfáltica.

No processo de produção do ligante modificado com zeólita natural para realização da caracterização reológica, foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72 sob temperatura de 90 °C, rotação de 1500 RPM por 2 horas. A velocidade e temperatura da mistura do ligante/aditivo foram baseadas no trabalho de Amoni (2019), que avaliou o potencial da zeólita A, obtida a partir das cinzas volantes, como aditivo de MAM.

3.6. RAP

A coleta do RAP foi realizada em um estoque de material fresado localizado no trecho do km 35,7 ao km 42,0 da pista no sentido crescente e decrescente da BR 230, pertencente ao DNIT de Santa Rita-PB. O estoque não apresentava vestígios de outros tipos de materiais como, por exemplo, concreto ou solo (Figura 15). As amostras foram coletadas com pás, e embrulhadas em sacos plásticos e posteriormente foram encaminhadas ao laboratório de

Engenharia de Pavimentos (LEP). Infelizmente não foi possível obter alguns dados do trecho em que as amostras foram coletadas, como: dosagem do revestimento, espessura das camadas do pavimento e idade do pavimento.

Figura 15 – Local de coleta de amostra de RAP



3.6.1. Caracterização física do RAP

A extração e recuperação do ligante asfáltico do RAP foi realizada com o objetivo de caracterizá-lo fisicamente e reologicamente para determinação do grau dos ligantes misturados, ligante oriundo do RAP e o ligante virgem, utilizados na mistura asfáltica reciclada. O ensaio de extração foi realizado com o modelo de centrífuga elétrica, conhecida por Rotarex, e seguindo as recomendações da norma ASTM D2172:2017. O solvente utilizado foi o tricloroetileno (temperatura de ebulição de 87°C), solvente indicado na norma ASTM D2172:2017 e DNIT 158:2011-ME.

Para separação do ligante do RAP dos agregados dele, foi adotada a metodologia de ensaio de extração do ligante asfáltico baseado no estudo de Gonçalves *et al.* (2019), seguindo a norma ASTM D2172:2017. Inicialmente, as amostras ficaram 1 hora em estufa a 110°C. Em seguida, as amostras foram destorroadas e pesadas no prato da centrífuga. Posteriormente a pesagem, o material foi coberto totalmente por solvente e, após 15min, a centrífuga foi fechada já com o papel filtro. A centrifugação iniciou-se e, assim que o solvente depositado

anteriormente na amostra tivesse sido totalmente extraído, foi adicionado mais 200ml do diluente, em passos idênticos, até que o solvente saísse puro, como preconizado pela norma. Após a realização desse procedimento, o teor de ligante presente no RAP correspondeu a 5,6%. De acordo com a especificação do DNIT – ME 031/2006, o teor de ligante para camada de rolamento faixa C varia de 4,5 a 9,0%. Portanto, na extração realizada o teor encontrado está dentro da faixa preconizada.

Em seguida, para eliminação do solvente presente no ligante e a sua recuperação, foi realizada a destilação simples por meio de um extrator Soxhlet, seguindo a norma do DNIT 158:2011-ME. Inicialmente, as amostras foram aquecidas (aproximadamente a 130°C) para que o solvente passasse para o estado físico de vapor e em seguida, com o auxílio de um condensador, esse solvente voltou a estado líquido e foi separado das amostras de ligante.

Após o processo de destilação, para tentativa de retirar qualquer resquício de solvente existente no ligante, este ainda foi submetido em estufa a uma temperatura de 100°C, por um período de até 6 horas. No entanto, mesmo após o processo de destilação simples verificou-se, por meio de análise de FTIR, que ainda havia presença de solvente na amostra. Portanto, foi realizado uma nova extração e recuperação do ligante do RAP por meio do rotaevaporador que apresenta melhor desempenho quanto a remoção do solvente, sendo normatizado pela ASTM D 5404:2012. Onde, a recuperação do ligante asfáltico oxidado foi realizado no evaporador rotativo a uma temperatura de aproximadamente 60°C por cerca de 2 horas com vácuo de 0.035 mmHg. A Figura 16 apresenta o rotaevaporador no processo de recuperação. O ligante recuperado foi submetido à estufa por 6 horas para retirada de possíveis resquícios de tricloroetileno.

Figura 16 - Processo de recuperação do ligante asfáltico no rotaevaporador



Após a recuperação do ligante foram verificados o teor de ligante médio dos materiais bem como as propriedades do ligante recuperado (PG, penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, MSCR). Para a determinação do valor de PG do ligante do RAP foi utilizado os valores de DSR do ligante envelhecido, onde $G^*/\sin\delta$ é de 2,20kPa. Para o ensaio de MSCR, as amostras foram testadas de acordo com a norma ASTM D7405:2020 executados na temperatura de 70°C. A Tabela 14 apresenta a caracterização física do ligante do RAP.

Tabela 14 - Caracterização física do ligante do RAP

Característica	Ligante Do RAP	Norma
Penetração (0,1mm)	5,0	DNIT 155:2010
Ponto de amolecimento (°C)	90,5	DNIT 131:2010
PG (°C)	82	ASTM D 6373:2021
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	10688	
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	3944	ASTM D4402:2015
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	775	
Jnr 0.1 (kPa-1)	0,0094	
Jnr 3.2 (kPa-1)	0,010	
Jnr diff (%)	7,36	
R0.1 (%)	49,90	ASTM D7405:2020
R3.2 (%)	48,90	
R diff (%)	2,01	

O ligante asfáltico oriundo do RAP apresentou uma temperatura máxima de PG de 82 °C. Os elevados valores de viscosidade e o baixo valor de penetração indicam um elevado grau de rigidez. Esse aumento da rigidez encontrado no ligante do RAP estão de acordo com os resultados encontrados na literatura (ARRUDA, 2021; LOPES *et al.*, 2014; MELO NETO,2022; UNGER FILHO, 2019). A elevada rigidez que o RAP apresenta, revela a necessidade da utilização de agentes rejuvenescedores do ligante asfáltico do RAP para melhorar o desempenho das misturas com relação ao trincamento por fadiga.

Com relação ao ensaio de MSCR, o principal parâmetro a ser observado é o percentual de recuperação (as recuperações sob a tensão de 0,1 KPa e de 3,2KPa se exibiram acima de 48%), estes valores de recuperação são significativos já que o ensaio foi realizado em uma temperatura relativamente alta. Na tensão de 0,1 kPa é habitual que se observe alguma recuperação causada pelo próprio comportamento viscoelástico do ligante asfáltico, já que as

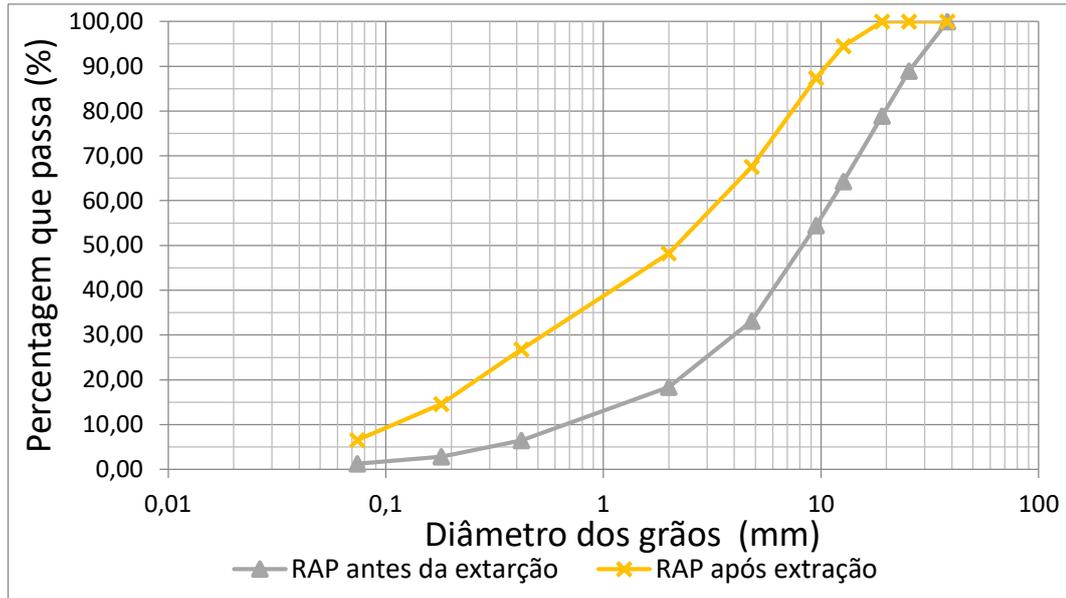
deformações são bem menores. Já na tensão de 3,2 kPa são esperados valores muito próximos de zero na ausência de modificadores de ligante asfáltico.

Gaspar (2019), analisou 6 materiais fresados, ou RAPs, de diferentes localidades, todos provenientes de revestimentos asfálticos que se encontravam deteriorados e passaram por manutenção, e verificou que os RAPs de apenas duas localidades exibiram alguma recuperação, de 8,6% e 12,6%, apresentando fortes indícios da presença de polímero nesses RAPs. Portanto, os resultados dos ensaios MSCR do ligante do RAP desta pesquisa se demonstraram diferente do esperado, indicando a presença de algum modificador ou material polimérico no RAP, já que apresentaram *R%* elevados e valores baixos de *Jnr*. A densidade máxima medida (Gmm), de acordo com a norma ASTM D2041/D2041M:2019, foi de 2,5 g/cm³. Além disso, foi realizada a granulometria do RAP, conforme a metodologia do DNER-ME 083:1998, antes e após extração do ligante e são apresentadas na Tabela 15 e na Figura 17.

Tabela 15 – Granulometria do RAP

Quantidade passante acumulada (%)			
Peneira	Peneira (mm)	RAP com ligante	RAP após extração do ligante
1 1/2"	38,1	100	100
1"	25,4	100	100
3/4"	19,1	97,1	100
1/2"	12,7	41,29	95,43
3/8"	9,5	6	99,76
Nº 4	4,8	2,01	51,6
Nº 10	2	1,46	0,54
Nº 40	0,42	1,07	0,07
Nº 80	0,18	0,9	0,05
Nº 200	0,074	0,66	0,03

Figura 17 – Curva granulométrica do RAP



Percebe-se que as curvas obtidas após a extração do ligante são mais ricas em finos que as curvas antes da extração. Esse comportamento pode ser explicado pela presença de “falsos grãos” que acontecem devido a união de pequenas partículas com ligante asfáltico e após a extração do ligante, as partículas se separam. Em virtude disso, a escolha da granulometria com extração ou sem a extração de ligante é um fator importante e que deve ser considerado em uma mistura asfáltica reciclada.

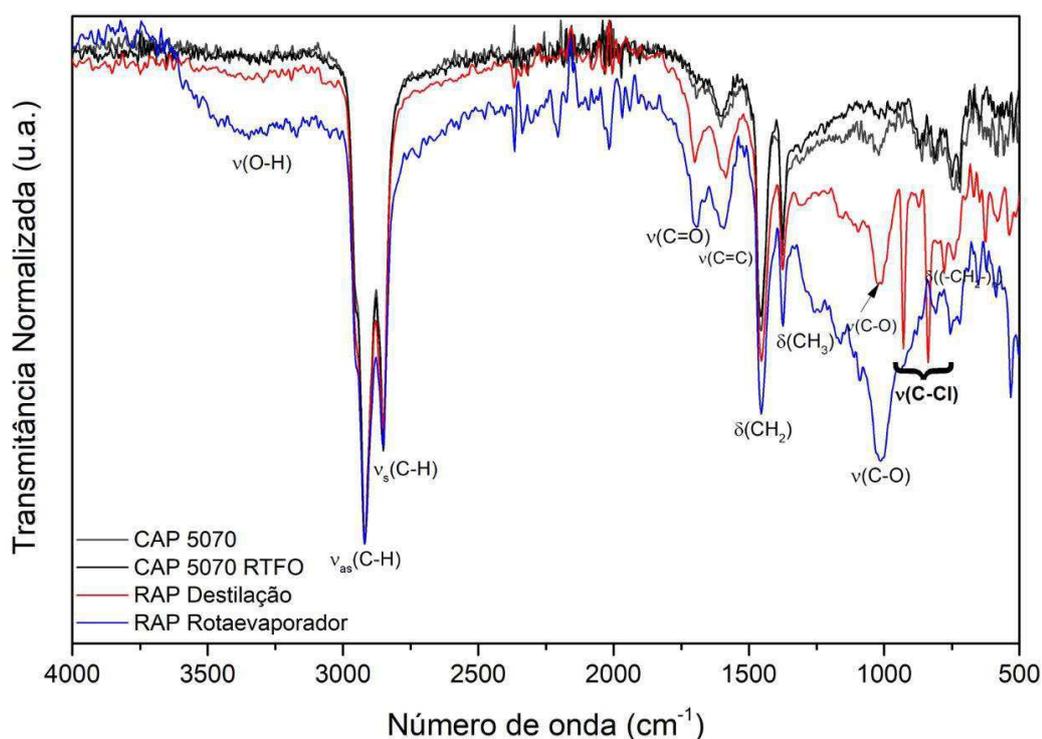
3.6.2. Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier do RAP

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier é uma técnica de caracterização química usada para determinar a presença de grupos funcionais químicos e modos vibracionais presentes nas suas formulações. O procedimento é baseado na incidência de radiação infravermelha, que é parcialmente absorvida pelo material. Cada grupo funcional absorve um comprimento de onda já conhecido, de forma que é possível identificá-los a partir da análise do espectro gerado, o procedimento foi realizado conforme a ASTM D 7653:2018.

Os ensaios foram realizados no LAMMEN – Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica – ECT da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O equipamento utilizado foi um Espectrômetro Bruker Vertex 70, como sonda ATR., em uma

faixa entre 4000 a 400 cm^{-1} e sinal de Transmitância ou Absorbância. Após o processo de extração e recuperação do ligante do RAP e com intuito de verificar se as amostras ainda continham o solvente tricloroetileno junto ao ligante asfáltico foi realizada a análise por meio do ensaio de FTIR. A Figura 18 apresenta os resultados do ensaio de FTIR para as amostras de: CAP 50/70 puro, CAP 50/70 puro após RTFO, ligante do RAP após destilação simples, ligante do RAP após recuperação por rotaevaporador.

Figura 18 – Resultados do ensaio de FTIR para o ligante extraído do RAP



Observa-se que os picos mais importantes e recorrentes encontrados para o CAP 50/70 puro foram picos de alta intensidade referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3000 e 2800 cm^{-1} . Picos entre 2000 e 1700 cm^{-1} indicando bandas harmônicas para aromáticos substituídos, bem como pequenos picos para grupos carbonilas (C=O) em pequena quantidade entre 1760 e 1700 cm^{-1} . Pico em torno de 1600 cm^{-1} é indicativo de insaturações (C=C) em anéis, juntamente com picos em torno de 1475 cm^{-1} , sendo este último geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno ($\text{-CH}_2\text{-}$) em 1455 cm^{-1} .

Além disso, o CAP 50/70 puro também apresentou um pico de média intensidade em 1455 cm^{-1} referente a deformação angular de grupos metileno ($\text{-CH}_2\text{-}$), em conformidade com

os picos deste grupo para deformação axial (2919 e 2850 cm^{-1}). O pico em 1375 cm^{-1} é referente a deformação angular em grupos metila ($-\text{CH}_3$), sendo esta espécie química também detectada em conformidade com picos de deformação axial em 2951 e 2867 cm^{-1} . Pico em torno de 720 cm^{-1} referente a vibração do tipo rocking para cadeias saturadas acima de 4 carbonos, $(\text{CH}_2)_n$, com $n \geq 4$.

Para o ligante do RAP após destilação simples foram encontrados picos referentes a funções orgânicas relacionadas a oxidação: carbonilas de cetonas em 1700 cm^{-1} e pico em 1020 cm^{-1} para estiramento simétrico de C-O em éteres. Com relação ao espectro do solvente tricloroetileno (TCE) ou tricloroetano foram encontrados a presença desses picos em 930, 845 e 780 cm^{-1} referente as vibrações nas ligações C-Cl e C-H (fora do plano) do solvente. A presença destes picos nos espectros de RAP indicam que ainda existe solvente nas amostras. Logo, mesmo após todo o procedimento de recuperação pelo processo de destilação do ligante do RAP não foi possível realizar a completa separação do solvente do ligante asfáltico.

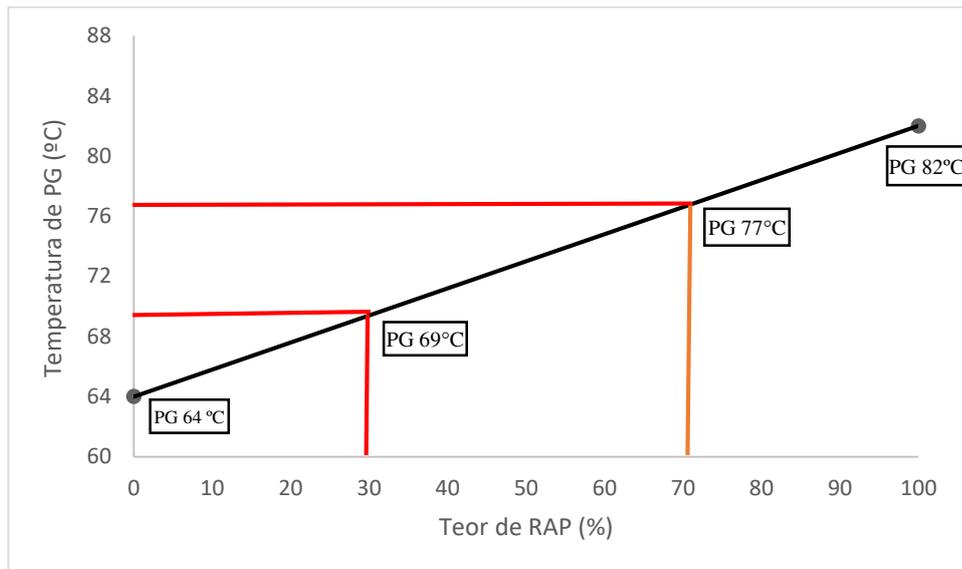
Para o ligante do RAP após recuperação pelo rotaevaporador, percebe-se que o procedimento de recuperação foi eficaz. Pois, os picos em 930, 845 e 780 cm^{-1} referente as vibrações nas ligações C-Cl e C-H, que indicam a presença de solvente não são mais encontradas. Portanto, a recuperação do ligante do RAP pelo rotaevaporador foi satisfatória. Além disso, sem a presença do solvente é possível perceber o quanto o ligante do RAP está oxidado, pois a área compreendida entre as linhas dos espectros do ligante do RAP após a recuperação pelo rotaevaporador é maior do que todas as outras amostras analisadas, e as vibrações nas ligações O-H, C=O e C-O, que representam os picos de oxidação estão mais acentuadas.

Dentro desse contexto, verifica-se que a análise do desempenho de misturas asfálticas recicladas por meio do comportamento reológico dos ligantes extraídos de misturas que já passaram pelo processo de usinagem e compactação são mais trabalhosas. Isso ocorre devido as dificuldades e necessidades de procedimentos como a extração e recuperação do ligante. Portanto, avaliar as propriedades de ligantes que já foram misturados aos demais componentes da mistura asfáltica é uma tarefa que envolve alguns cuidados. Em virtude disso, esta pesquisa optou realizar a análise das MARMs por meio do comportamento mecânico, já que este se revela mais eficiente e ainda possibilita reproduzir melhor o efeito que os pavimentos asfálticos enfrentam em campo.

3.6.3. Blending charts

Bohn (2017) avaliou misturas asfálticas com até 50% de RAP na técnica morna, os resultados indicaram que o desempenho das misturas asfálticas mornas é equivalente às convencionais a quente. Portanto, baseado no trabalho de Bohn (2017) e com o objetivo de determinar o máximo teor possível de RAP em uma mistura asfáltica reciclada morna, foi adotado para este trabalho, os teores de 0, 30 e 70% de RAP. O ligante asfáltico escolhido (ligante 50/70) de acordo com o que, geralmente, é utilizado na região Nordeste do Brasil. Portanto, como o teor de ligante do RAP e o grau do ligante virgem são fixos, o blending chart foi utilizado para determinar o grau dos ligantes misturados (Figura 19).

Figura 19 - Blending chart



Verifica-se que o PG dos ligantes misturados são de: 69°C para a mistura com 30% de RAP e 77 °C para a mistura com 70% de RAP. Esse aumento do PG com o aumento do teor de RAP tende a aumentar a rigidez das misturas asfálticas. Essa elevada rigidez que o ligante do RAP apresenta, indica a necessidade do uso de um ligante virgem mais macio ou adição de agente rejuvenescedor no ligante asfáltico para melhorar o desempenho das misturas com relação principalmente ao trincamento por fadiga.

3.6.4. Grau de ativação do ligante do RAP (DoA)

Para análise do DoA foi proposto no âmbito do RILEM TC 264 RAP, um método laboratorial que foi desenvolvido por Pires (2018), com pequenas adaptações no presente trabalho. Essa análise teve por objetivo determinar a quantidade mínima de ligante do RAP que pode ser considerada ativa na formulação de uma nova mistura asfáltica contendo materiais fresados. Este procedimento destinou-se a rotular o RAP com base em seu Grau de Ativação do ligante (DoA) obtido logo após a mistura e compactação em uma faixa de temperatura que variou entre: 70°C, 100°C, 140°C, 170°C e 190°C, sendo moldadas 3 amostras por temperatura. Porém, sabe-se que não é comum utilizar temperaturas acima de 170°C na usinagem de misturas asfálticas, mas optou-se por incluir a temperatura de 190°C para complementar a análise dos resultados. Além disso, essa metodologia também teve como objetivo eliminar a necessidade da extração e recuperação do ligante para caracterizar o RAP, onde o procedimento estimou o DoA conforme a temperatura a qual ele foi submetido durante o processo de usinagem.

Para realizar esta classificação, considerou-se o efeito da temperatura como fator primário na ativação do ligante oxidado. Diante disso, procurou-se eliminar a influência de fatores como a umidade do RAP, o tempo de mistura e a aplicação de agentes rejuvenescedores. O procedimento consistiu em submeter amostras contendo 100% de RAP ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, moldadas com o material condicionado em diferentes temperaturas. Assim, o ganho de resistência do material com o aumento da temperatura fornece um indicativo da quantidade de ligante asfáltico que foi ativada.

De forma detalhada, o procedimento para preparação das amostras consistiu na execução das seguintes etapas:

- O RAP foi colocado em estufa a 40°C por 48 horas para secagem;
- Em seguida foram preparadas amostras do material, para serem utilizadas para a compactação de corpos de prova Marshall, com aproximadamente 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura;
- Cada uma das amostras de RAP foi condicionada em estufa por 4 horas na temperatura desejada;
- Cada amostra foi misturada e revolvida manualmente por 60 segundos para homogeneização e espalhamento do ligante asfáltico ativado, mantendo-se a temperatura em que foram condicionadas;

- Finalmente, as amostras foram compactadas utilizando o compactador Marshall, com 50 golpes em cada face.

Em seguida, foi determinado o volume de vazios dos corpos de prova e a densidade aparente foi determinada por meio da norma ASTM D3203:2017 para misturas abertas (com volume de vazios maior que 10%). Os volumes de vazios foram calculados com base na densidade máxima teórica obtida na caracterização dos materiais. Finalmente, foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral seguindo a norma DNIT ME-136:2018.

Para avaliação do grau de ativação do ligante asfáltico, Pires (2018) utiliza o parâmetro $DoA\%$, relacionando o valor de RT obtido em cada temperatura de ensaio ($RT_{X^{\circ}C}$) com o valor obtido para a temperatura de $170^{\circ}C$ ($RT_{170^{\circ}C}$). Apesar desse autor considerar que a $170^{\circ}C$ se alcança uma ativação de 100% do ligante asfáltico presente no RAP, já que a essa temperatura se alcançaria o valor máximo de RT. Para este trabalho, devido principalmente à inclusão da temperatura de $190^{\circ}C$, os resultados nem sempre alcança a máxima resistência na temperatura de $170^{\circ}C$. O cálculo do parâmetro $DoA\%$ foi realizado de acordo com a Equação 10, na qual $RT_{máx}$ é o valor máximo de RT obtido para toda a faixa de temperaturas analisada.

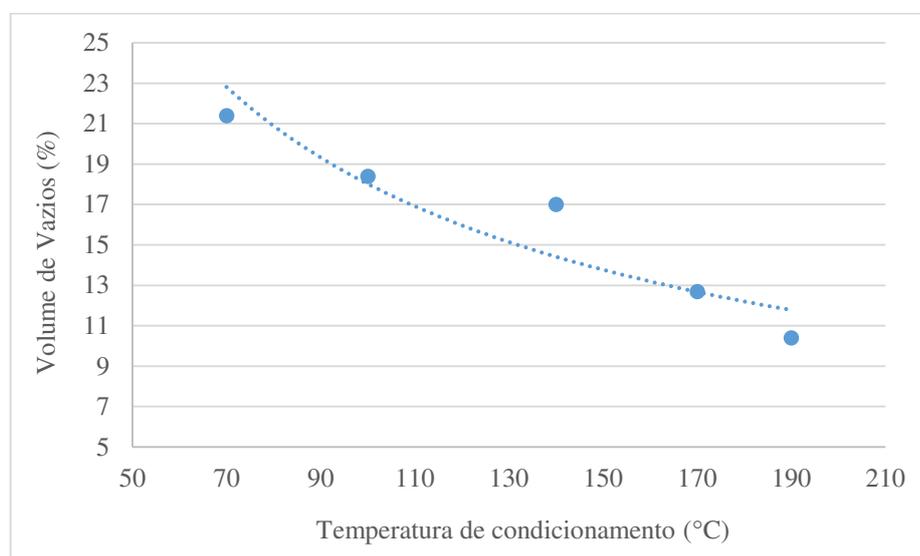
$$DoA \% = 100 * \frac{RT_{X^{\circ}C}}{RT_{máx}} \quad \text{Equação 10}$$

A Tabela 16, a Figura 20 e a Figura 21 apresentam os resultados do parâmetro $DoA (\%)$ com base no parâmetro de resistência à tração, calculado para as amostras contendo 100% de RAP.

Tabela 16 – Grau de ativação do RAP utilizado neste trabalho

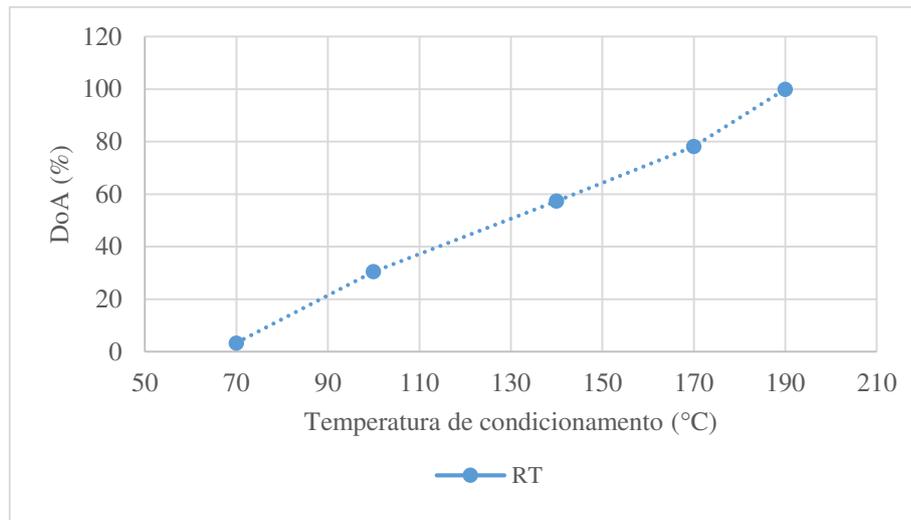
Temp. (°C)	Densidade (g/cm ³) ASTM D3203-17	Volume de vazios (%) ASTM D3203-17	RT (MPa) DNIT ME-136/2018	Altura do CP (mm)	Diâmetro do CP (mm)	DOA (%) - RT
70	1,978	21,4	0,06	76,25	101,71	3,38
100	2,055	18,4	0,58	74,91	101,73	30,51
140	2,090	17,0	1,09	70,22	101,64	57,39
170	2,197	12,7	1,48	68,61	101,79	78,19
190	2,256	10,4	1,90	66,21	101,62	100,00

Figura 20 – Volume de vazios da mistura de RAP



Como apresentado na Figura 20, percebe-se uma tendência de redução do volume de vazios com o aumento da temperatura de condicionamento. Diante disso, verifica-se que os materiais foram compactados com maior facilidade conforme ocorreu a elevação da temperatura, aumentando a ativação do ligante asfáltico presente no RAP. O ligante asfáltico ativado, com viscosidade reduzida, lubrifica as partículas de agregado e preenche os vazios ao longo do processo de compactação, colaborando com a redução dos vazios.

Figura 21 – Resultados do parâmetro DoA (%)



De acordo com a Figura 21, verifica-se que 100% do ligante do RAP foi ativado a uma temperatura de 190°C. Isso indica que, devido a tendência quase linear do aumento da resistência à tração com a elevação da temperatura de compactação, possivelmente o ligante presente neste RAP exigiria uma temperatura mais elevada para ser completamente ativado. Gaspar (2019), observou resultado semelhante, onde em uma das amostras de RAP analisadas pelo autor, o parâmetro DoA(%) atingiu o pico apenas na temperatura máxima, de 190°C, sugerindo que ele aumentaria indefinidamente com o aumento da temperatura.

De acordo com os resultados do estudo do parâmetro DoA (%), não se deve considerar que 100% do ligante do RAP é ativado. Já que o ligante do RAP foi ativado apenas na temperatura de 190°C, e temperaturas de usinagem excessivas podem resultar em outros efeitos além da ativação do ligante, como a sua oxidação e o surgimento de trincas por fadiga. Além disso, a oxidação do ligante do RAP aumentou a rigidez das misturas e possibilitou que o material suportasse picos de resistência a tração mais elevados, no entanto, esse aumento de rigidez pode contribuir para redução da resposta viscosa da mistura que pode afetar de forma diferente a resistência residual da mesma, após o pico de carregamento. Portanto, a dosagem das misturas recicladas desta pesquisa, foram realizadas considerando que o ligante do RAP atua como “partial blending”.

3.7. Dosagem das misturas asfálticas recicladas

A pesquisa consistiu em realizar a dosagem da mistura de referência com 0% de RAP e com o ligante asfáltico convencional o ligante 50/70. Em seguida, foram avaliadas as MARQs com o ligante convencional, variando-se apenas o teor de fresado em 30% e 70%. As granulometrias das MARQs e das MARMs são iguais quando se mantém constantes as quantidades de fresado durante as dosagens, portanto, não foram realizadas as dosagens para as misturas recicladas modificadas pelos aditivos de MAMs. Foram adotadas como referências os resultados das MARQs. No entanto, para as misturas com adição de zeólita natural foi necessário a verificação dos parâmetros voluméricos. Já que, de acordo com o fabricante, o teor de 0,3% de zeólita é adicionado em peso de mistura asfáltica e não em peso de ligante asfáltico. As nomenclaturas das dosagens das misturas asfálticas estudadas estão resumidas na Tabela 17.

Tabela 17 – Nomenclaturas das dosagens das misturas asfálticas estudadas

Identificação	Tipo de mistura	Teor de RAP
MQ0	MARQ (Referência)	0%
MQ30	MARQ	30%
MQ70	MARQ	70%
MW0	MARM - WARMGRIP	0%
MW30	MARM - WARMGRIP	30%
MW70	MARM - WARMGRIP	70%
MOG0	MARM – ÓLEO DE GIRASSOL	0%
MOG30	MARM - ÓLEO DE GIRASSOL	30%
MOG70	MARM - ÓLEO DE GIRASSOL	70%
MZ0	MARM - ZEÓLITA	0%
MZ30	MARM - ZEÓLITA	30%
MZ70	MARM - ZEÓLITA	70%

Para a realização das dosagens das misturas asfálticas, foi empregada a metodologia SUPERPAVE. A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório segundo a norma ASTM D 6925:2009 (Standard Test Method

for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor).

3.7.1. Dosagem da mistura asfáltica de referência

Para a dosagem da mistura asfáltica de referência foi realizada a escolha de três composições granulométricas com os agregados disponíveis, uma superior, uma intermediária e uma inferior (Figura 22) que se encontram dentro da Faixa C de granulometria do DNIT, incluindo os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de Restrição. Na Tabela 18 são apresentadas as proporções dos agregados nas granulometrias.

Figura 22 - Curvas granulométricas: superior, intermediária e inferior

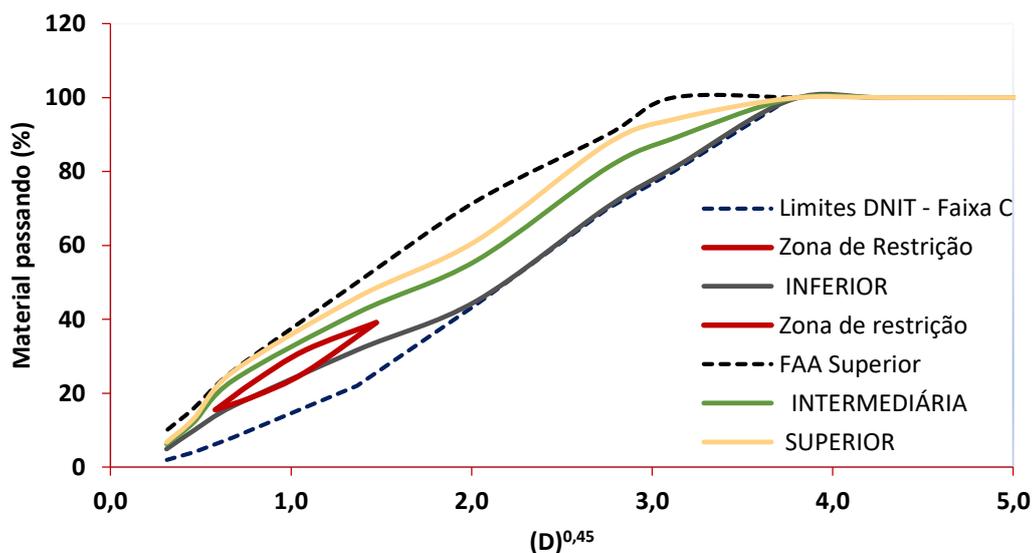


Tabela 18 - Proporções dos agregados nas granulometrias

Curva	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de pedra	Fíler
Inferior	26%	35%	0%	38%	1%
Intermediária	15%	35%	6%	42%	2%
Superior	8%	37%	7%	46%	2%

Após a definição da curva granulométrica, foi estimado um Teor Central (TC) de 5% de ligante asfáltico. Em seguida, foram moldados 18 corpos de prova, sendo 6 corpos de prova para cada curva granulométrica. A mistura, ainda não compactada, permaneceu em estufa por um período de 2 horas antes da compactação de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a mistura. Foram realizadas as sequências de pesagens a fim de se obter os parâmetros volumétricos de volume de vazios (Vv), vazios no agregado mineral (VAM) e densidade máxima medida (Gmm) obtida pelo método Rice Test, preconizado pela norma americana ASTM D2041/D2041M:2019. A Tabela 19 apresenta os parâmetros volumétricos obtidos para as curvas inferior, intermediária e superior.

Tabela 19 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de ligantes iniciais calculados

Mistura	Ligante %	%Gmm NINICIAL	%Gmm NPROJETO	%Gmm NMÁXIMO	VAM (%)	Vv(%)
Inferior	5,0	87,38	94,53	96,06	14,31	5,56
Intermediária	5,0	85,91	94,30	95,44	13,11	4,97
Superior	5,0	86,48	92,96	93,77	13,70	7,04
Critérios da dosagem	-	<89%	96%	<98%	13 mín	4%

A curva escolhida foi a intermediária em virtude do seu volume de vazios ser o mais próximo de 4%, como demonstra a Tabela 19. Para o volume de vazios de 4% foi encontrado o teor de ligante inicial de 5,7%. Então, por meio deste teor foram compactados os corpos de prova com variações nas seguintes proporções: $\pm 0,5\%$ e $+1\%$. A Tabela 20 apresenta os parâmetros volumétricos obtidos em função dos teores de ligantes iniciais calculados.

Tabela 20 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos teores de ligantes iniciais calculados

Teor de ligante %	%GMM N_{PROJETO}	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)	Massa específica(g/cm³)
5,2	95,75	14,18	4,00	71,69	2,515
5,7	97,91	13,18	2,09	70,49	2,498
6,2	98,92	13,40	1,08	73,09	2,479
6,7	100,23	13,44	0,23	71,40	2,459
Critérios da dosagem	96	13 mín	4,00	65 a 75	-

Portanto, para um volume de vazios de 4,0% o teor de ligante utilizado para a mistura de referência foi de 5,2%.

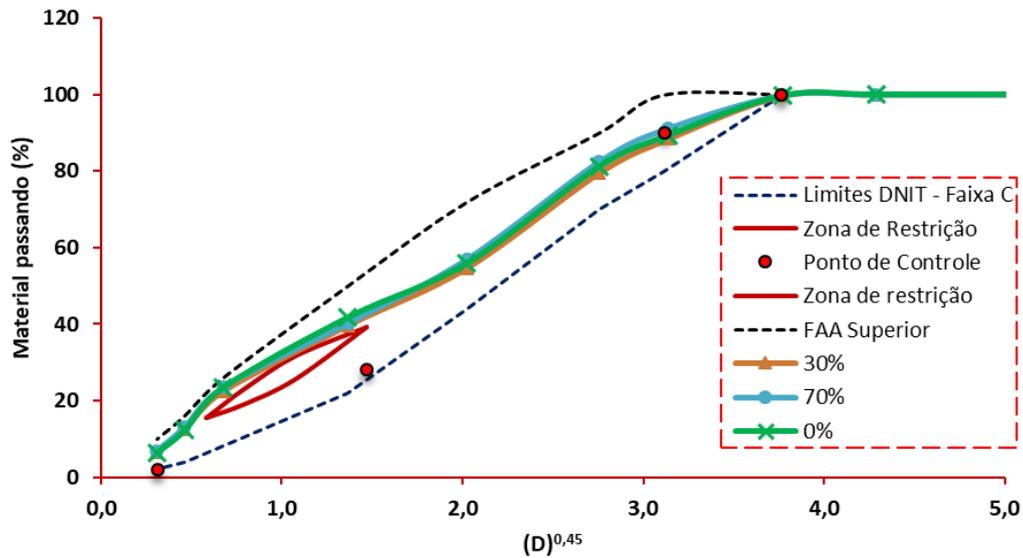
3.7.2. Dosagem das misturas asfálticas recicladas

Para as misturas recicladas foi utilizada como parâmetro a curva intermediária que atendeu aos critérios da dosagem SUPERPAVE da mistura de referência. A Tabela 21 e a Figura 23 apresentam as proporções de agregados nas granulometrias e as curvas granulométricas finais das misturas com os teores de 0, 30 e 70% de RAP.

Tabela 21 - Proporções de agregados nas granulometrias das misturas recicladas

RAP	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de pedra	Fíler
0%	15%	35%	6%	42%	2%
30%	14%	26%	3%	25%	2%
70%	7%	16%	2%	3%	2%

Figura 23 – Curvas granulométricas das misturas recicladas



Após a escolha das curvas granulométricas, foi realizada a compactação SUPERPAVE visando obter um projeto de mistura com volume de vazios de 4%. Em seguida foi realizado o ensaio para determinação da densidade da mistura por meio do método de Rice Test. As porcentagens dos teores de ligantes novos para as misturas recicladas foram obtidos por meio do teor de ligante do material fresado de 5,6%, obtido na caracterização do RAP. Na Tabela 22 são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas: volume de vazios (VV), volume de vazios nos agregados minerais (VAM), e a relação betume/vazios (RBV). Estes parâmetros permitiram a definição do teor de projeto, o qual foi usado na composição das misturas asfálticas recicladas para a avaliação das propriedades mecânicas. Observa-se que, conforme a Norma da ASTM D2041/D2041M:2019, que as misturas atenderam às especificações.

Tabela 22 - Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas

Mistura	Teor de ligante virgem (%)	Teor de ligante total (%)	%GMM	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)
0% (Ref)	5,20	5,2	95,75	14,18	4,0%	71,69
30% RAP	3,72	5,4	95,05	16,24	4,1%	74,76
70%RAP	2,28	6,2	94,10	16,85	4,2%	75,10
Critérios da dosagem	-	-	96	13 mín	4,00	65 a 75

Por meio da Tabela 22 verifica-se que, a quantidade de ligante virgem adicionada às misturas, com base nos vazios de 4%, foi superior ao teor de ligante de 5,2% que foi adicionado na mistura de referência com 0% de RAP. Este fato pode ser observado principalmente para a mistura com 70% de RAP, isso indica de que a ativação do ligante não foi completa. Logo, o ligante presente no RAP atua como “partial blending”, ou seja, apenas uma parcela do ligante do RAP interage com o ligante asfáltico virgem. Assumindo-se que as misturas deveriam ter 5,2% de teor de ligante total, observa-se que a mistura contendo 30% de RAP teve cerca de 96,16% do ligante do RAP ativado, já a mistura com 70% de RAP teve 80,77% do ligante do ativado.

Zhao *et al.* (2015) também indicaram que a taxa de mobilização do ligante do RAP diminuiu com o aumento da porcentagem de RAP na mistura, que pode ser próxima de 100% em baixos teores de RAP (10% e 20%). No entanto, quando o percentual da RAP aumentou de 30% para 80% a taxa caiu de 73% para 24%. Além disso, essa ativação incompleta do ligante do RAP também pode ser justificada devido ao parâmetro DoA, calculado para a mistura contendo 100% de RAP (item 3.6.4.), ter sido ativada a uma temperatura muito elevada (190°C), já que as temperaturas utilizadas na usinagem das misturas asfálticas foram abaixo de 170°C.

3.7.2.1. *Parâmetros volumétricos das MARMs com zeólita natural*

As proporções de agregados nas granulometrias das misturas recicladas com adição de zeólita natural são apresentadas na Tabela 23, que foram baseadas nos teores ótimos obtidos com os dados das misturas asfálticas recicladas a quente de referência.

Tabela 23 - Teor de projeto da mistura com zeólita

RAP	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de pedra	Filer	Zeólita
0%	15%	35%	6%	41,7%	2,0%	0,3%
30%	14%	26%	3%	26,7%	2,0%	0,3%
70%	7%	16%	2%	4,7%	2,0%	0,3%

Finalmente obteve-se os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas com adição de zeólita natural (Tabela 24). De acordo com a Norma da ASTM D2041/D2041M:2019, as misturas com adição de zeólita natural atenderam às especificações.

Tabela 24 - Parâmetros da dosagem com zeólita natural

Mistura	Teor de projeto de CAP virgem (%)	Teor de projeto de ligante total (%)	% GMM	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)
0% (Ref)	5,20	5,2	96,18	13,53	4,1%	70,64
30% RAP	3,72	5,4	95,21	16,01	4,2%	74,76
70%RAP	2,28	6,2	94,74	16,85	4,4%	75,10
Crítérios da dosagem	-		96	13 mín	4,00	65 a 75

Para as MARMs modificadas com zeólita natural, percebeu-se que apesar do aumento da trabalhabilidade que adição de zeólita proporcionou nas misturas, também não foi possível obter 100% de ativação do ligante do RAP. Verifica-se que os parâmetros da Tabela 22 e da Tabela 24 são semelhantes. Porém, as zeólitas foram adicionadas às misturas em peso de mistura, diferente dos aditivos WarmGrip e óleo de girassol que foram adicionados às misturas em peso de ligante. Portanto, já que a granulometria das misturas apresentou uma modificação, foi realizada uma verificação dos parâmetros volumétricos das misturas com zeólita natural.

3.7.3. Temperaturas de usinagem e compactação

Segundo o NCHRP Report 648 (2010), as temperaturas de usinagem compactação das misturas asfálticas são determinadas dentro das faixas de viscosidade de 170 ± 20 cP e 280 ± 30

cP, respectivamente. Logo, as temperaturas de usinagem e compactação para a MQ0 foram obtidas por meio da curva de viscosidade do ligante virgem CAP 50/70 (153°C). Os agregados virgens foram aquecidos convencionalmente, 10°C acima da temperatura normal do ligante (à 163°C). A mistura não-compactada permaneceu em estufa, à temperatura de compactação por um período de 2 horas antes da compactação, com o objetivo de simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem.

Devido a elevada viscosidade do ligante extraído do RAP, não é possível determinar uma temperatura de usinagem para o ligante do RAP com as temperaturas ensaiadas. Logo, com base na literatura (OLIVEIRA, 2013; GENNESSEAU, 2015; BOHN, 2017), tanto para as MARQs quanto para as MARMs o RAP foi aquecido até atingir a temperatura de 110°C, durante um período de 2 horas, de modo a simular o pré-aquecimento em usinas adaptadas com tambor secador especial para material reciclado.

Para as MARQs, a determinação da temperatura do ligante virgem CAP 50/70 foi obtida pelo ensaio de viscosidade (153°C). Os agregados virgens foram aquecidos convencionalmente, 10°C acima da temperatura normal do CAP (à 163°C), finalmente essas misturas apresentaram uma temperatura final de compactação de 142°C.

Para as MARMs a determinação das temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes asfálticos modificados com as tecnologias de MAMs não pôde ser realizada por meio da curva de viscosidade *versus* temperatura. Pois, a mesma não consegue analisar o efeito da redução da viscosidade que é provocada tanto pela maior trabalhabilidade que os aditivos químicos e orgânicos proporcionam, quanto pela microespumação do ligante asfáltico formados nos processos que utilizam a tecnologia de asfalto espumado. Baseado no trabalho de Wargha Filho (2013), as temperaturas aplicadas para as misturas com os ligantes modificados com óleo de girassol e Warmgrip foram reduzidas em 20 °C da temperatura obtida no ensaio de viscosidade, com o objetivo de simular a temperatura de uma típica MAM. Já as misturas modificadas com zeólita natural seguiram as recomendações de aplicação do fabricante. A Tabela 25 apresenta as temperaturas utilizadas na produção dos corpos de provas para realização dos ensaios mecânicos.

Tabela 25 - Temperaturas de usinagem e compactação

Temperatura	MARQ	MARM + WarmGrip	MARM + óleo de girassol	MARM + zeólita
RAP	110	110	110	110
Ligante	153	133	127	155
Agregados virgens (°C)	163	143	137	130
Compactação (°C)	142	120	110-120	90-100

Verifica-se que as temperaturas das misturas com o WarmGrip apresentaram as condições intermediárias entre os aditivos testados. As misturas modificadas com zeólitas apresentaram um maior aquecimento do ligante, mas como as zeólitas são incorporadas nas misturas em temperatura ambiente e as mesmas possuem a capacidade de liberar água, elas apresentaram as menores temperaturas de compactação contribuindo para serem usadas quando for necessárias maiores distâncias de transporte. Já as misturas com o óleo de girassol indicaram as maiores reduções de temperatura do ligante proporcionando o melhor custo benefício e melhor resposta para o meio ambiente.

3.8. Ativação do ligante do RAP das misturas asfálticas recicladas

Por meio dos resultados da dosagem das misturas asfálticasa recicladas, verificou-se que a quantidade de ligante virgem adicionada às misturas, com base nos vazios de 4%, foi acima da calculada. Onde, a mistura com 30% e 70% de RAP tiveram 96,16% e 80,77%, respectivamente, do ligante do RAP ativado. Este fato comprova a hipótese de que a ativação do ligante do RAP não foi completa. Conforme apresentado na pesquisa da NCHRP Synthesis 495 (2016), 77% dos órgãos rodoviários estaduais dos EUA consideram 100% de ativação do ligante do RAP (STROUP-GARDINER, 2016). No entanto, essa consideração pode ocasionar misturas asfálticas com deficiência de ligante.

Dentro desse contexto, o presente trabalho, realizou um estudo do percentual de ativação do ligante do RAP, considerando que 100% do ligante do RAP seria ativado. A quantidade de ligante virgem na mistura foi calculada em função do percentual de remobilização considerado. Portanto, quanto maior o percentual de RAP, menor a quantidade de ligante virgem adicionada. Foram realizados a compactação por meio da metodologia SUPERPAVE e o ensaio de dano

por umidade induzida. As temperaturas de usinagem e compactação foram as apresentadas na Tabela 25. Para a compactação das misturas recicladas com 70% de RAP, verificou-se uma dificuldade em realizar a mistura, indicando redução no percentual de ligante, o que pode elevar o número de vazios das misturas e conseqüentemente redução da resistência ao dano por umidade.

O ensaio de dano por umidade induzida foi realizado com base no procedimento de dosagem da MARQ seguindo os critérios adotados pela metodologia SUPERPAVE, codificado como NCHRP 9-12. Onde, McDaniel e Anderson (2001) sugerem uma última verificação do teor de ligante definido por meio do ensaio de suscetibilidade à umidade induzida (AASHTO T 283:2014).

O teor de ligante considerado para as misturas é de 5,2%, em massa de ligante com relação à massa total da mistura. A Tabela 26 apresenta as propriedades das misturas recicladas quente e morna, considerando 100% de ativação do ligante do RAP.

Tabela 26 – Propriedades das misturas recicladas considerando 100% de ativação do ligante do RAP

Mistura	Ligante virgem adicionado (%)	Ligante total adicionado(%)	Volume de vazios (%)	RRT (%)
MQ0	5,2	5,2	7,0	72
MQ30	3,52	5,2	6,9	74
MQ70	1,28	5,2	10,2	40
MW30	3,52	5,2	6,4	85
MW70	1,28	5,2	6,7	80
MOG30	3,52	5,2	7,2	74
MOG70	1,28	5,2	8,3	60
MZ30	3,52	5,2	6,7	76
MZ70	1,28	5,2	8,4	55

Observa-se que as misturas com 30% de RAP reduziram o volume de vazios e melhoraram a resistência ao dano por umidade. Porém, as misturas com 70% apresentaram um aumento do volume de vazios e os corpos de prova situaram fora do intervalo preconizado por norma com um volume de vazios de $7 \% \pm 1 \%$, com exceção da mistura MW70. Em virtude disso, as misturas com 70% de RAP apresentaram uma maior redução da resistência ao dano por

umidade. Verifica-se também que as MARMs apresentaram maior rejuvenescimento para o ligante do RAP, mesmo tendo sido compactadas em temperaturas inferiores que a mistura de referência.

As misturas que atenderam a especificação da AASHTO T 283:2014, em que o valor da RRT (%) deve ser no mínimo de 80%, foram as misturas com 30% e 70% de RAP dos ligantes modificados com o aditivo WarmGrip. Constata-se, portanto, as propriedades adesivas que este aditivo de MAM proporcionou nas misturas com alto teor de RAP. Segundo Zubaran (2014), esses aditivos surfactantes podem ser amplamente utilizados para aumentar a adesão (ativa e passiva) entre a superfície do agregado (hidrófilo) e a superfície do asfalto (hidrofóbico).

O estudo mecânico de ativação do ligante do RAP nas misturas asfálticas recicladas mostrou que, principalmente para misturas com alto teor de RAP, projetar misturas asfálticas recicladas com a suposição de ativação total do ligante do RAP “full blending” pode resultar em misturas com teor insuficiente de ligante e mais suscetíveis a danos por umidade. Portanto, quantificar a atividade do ligante proveniente do RAP, baseado nas características de cada RAP, é essencial para o desempenho adequado do pavimento.

3.9. Caracterização mecânica

Para caracterização mecânica foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado), Vida de Fadiga e Flow Number (FN), Módulo Dinâmico (MD). Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.9.1. Resistência à tração indireta

O ensaio de RT foi realizado de acordo com o método de ensaio ME 136/2018 do DNIT. Em seguida, utilizando-se uma prensa mecânica, foram aplicadas forças de compressão por meio de frisos metálicos com comprimento igual ao do corpo de prova, até a ruptura completa

do corpo de prova, segundo um plano diametral vertical. O deslocamento aplicado durante a realização do ensaio corresponde a uma razão de $0,8 \pm 0,1$ mm/s.

3.9.2. Dano por umidade induzida

O ensaio foi realizado de acordo com a norma do DNIT 180/2018 com o intuito de avaliar o potencial de deslocamento da película de asfalto em misturas asfálticas sob a ação da água em ciclos de gelo e degelo. Além disso, esse ensaio serve para avaliar a adesividade do ligante asfáltico considerando o efeito deletério da água sobre propriedades de resistência mecânica da mistura asfáltica.

Nesse estudo, para cada teor de RAP e tipo de misturas, foram moldados corpos de prova e divididos em dois grupos (condicionados e não condicionados). Em seguida, foi realizada a compactação dos CPs, com volume de vazios de $7 \pm 1\%$, segundo a metodologia SUPERPAVE.

Os CPs foram condicionados, colocando-os em um recipiente com água destilada e aplicando-se o vácuo com uma pressão de 250-650mmHg para saturação dos vazios entre 70 e 80%. Retirou-se os CPs e em seguida as amostras foram colocadas dentro de sacos plásticos, adicionando 10ml de água e colocados em uma geladeira a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período de 16hrs. Após esse período, colocou-se o CP em imersão a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 ± 1 h. Ao retirar, deixou-se o CP ainda envolto no saco plástico submerso em água a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ para estabilização da temperatura.

Já os CPs não condicionados foram envelopados em sacos plásticos, de modo a ficarem hermeticamente fechados e deixados em banho de água a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 2 horas. Finalmente, realizou-se o ensaio de Resistência à Tração no CP, e encontrando assim os resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras com condicionamento e das amostras não condicionadas. O resultado deste ensaio é dado pela Resistência Retida à Tração, calculada conforme a Equação 11.

$$RRT (\%) = \frac{RTc}{RTnc} \times 100 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

RTc = Resistência à tração indireta das amostras condicionadas (MPa);

RTnc = Resistência à tração indireta das amostras não-condicionadas (MPa).

3.9.3. Módulo de Resiliência (MR)

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado conforme os procedimentos descritos na especificação DNIT 135/2018 – ME. O MR corresponde a relação entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável, por ciclo.

O ensaio foi realizado na prensa hidráulica UTM-25 e consistiu na aplicação de pulso de cargas com frequência de 1Hz, de duração 0,1 s e repouso de 0,9 s, no plano diametral vertical do corpo de prova. Essa carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, e os LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) medem o deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal). A força utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência foi correspondente a 10% da Resistência à Tração. O resultado final foi a média de 3 CPs, expresso em MPa.

3.9.4. Vida de fadiga

Nesta pesquisa, a vida de fadiga de misturas asfálticas recicladas foi realizada de acordo com o método de ensaio do DNIT 183/2018 - ME. A vida de fadiga de um corpo de prova corresponde a um número de solicitações que uma determinada carga levaria a mistura asfáltica a se romper. Durante o ensaio de fadiga são aplicadas cargas de compressão diametralmente ao CP, submetendo este a um estado biaxial de tensões, sendo que seções verticais do CP ficam sujeitas a esforços de compressão e seções horizontais, por sua vez, a esforços de tração. A vida de fadiga no ensaio à tensão controlada pode ser expressa em relação às tensões, ou com base na deformação resiliente inicial (ϵ_i).

O ensaio ocorreu na câmara da prensa UTM-25, por compressão diametral à tensão controlada, numa frequência de pulso de 1 Hz, sendo 0,1s para a aplicação da carga haversine (semi-seno reverso) e 0,9s de repouso, a temperatura de ensaio foi de 25°C. De acordo com a norma DNIT 183/2018, deve-se realizar o ensaio com quatro cargas diferentes, de forma a gerar quatro níveis de tensão cujos valores estejam entre 5% e 40% da resistência à tração indireta da

mistura asfáltica. Nesta pesquisa, escolheu-se utilizar 32,5%; 35%; 37,5% e 40% da RT de cada uma das misturas estudadas. Para cada nível de tensão, foram ensaiados três CPs.

De acordo com Mocelin (2018), os ensaios de fadiga são tipicamente interpretados por meio de curvas que relacionam os níveis de tensão aplicados com o N das amostras, ajustadas por uma função exponencial, chamada de lei ou modelo de fadiga, também conhecidas como curvas de Wöhler. Após a determinação dos valores de N das amostras, plotou-se os gráficos dos números de ciclos (N) versus a diferença de tensões no centro da amostra ($\Delta\sigma$) e números de ciclos (N) versus a deformação de tração inicial (ε_i) em um gráfico log-log, para todos os níveis de tensão avaliados. Por meio de regressão linear, ajustou-se uma linha de tendência aos dados de cada mistura, a qual segue o modelo de previsão de fadiga de Wöhler (Equação 12 e Equação 13). De acordo com a norma do DNIT, essas regressões lineares devem apresentar R^2 mínimo de 0,8.

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1} \quad \text{Equação 12}$$

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

N = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\Delta\sigma$ = diferença algébrica entre tensão horizontal de tração e vertical de compressão no centro da amostra;

ε_i = deformação resiliente inicial;

K_i, n_i = constantes obtidas por meio da regressão dos resultados experimentais (em escala log).

A diferença de tensão no centro do CP ($\Delta\sigma$) refere-se à subtração entre a tensão de compressão gerada pelo carregamento e a respectiva tensão de tração horizontal, conforme apresentado na Equação 14 e Equação 15.

$$\Delta\sigma = 4 \sigma_t \quad \text{Equação 14}$$

Sabendo que,

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi t d} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$\Delta\sigma$ = diferença das tensões (MPa);

σ_t = tensão de tração no centro do corpo de prova (MPa);

F = carga aplicada (N);

t = espessura do corpo de prova (mm);

d = diâmetro do corpo de prova (mm).

A deformação resiliente inicial no centro do corpo de prova (ϵ_i) é calculada de acordo com a Equação 16.

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_t}{MR} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

σ_t = tensão de tração no centro do corpo de prova;

MR = módulo de resiliência (MPa).

3.9.5. Resistência à deformação permanente

O ensaio uniaxial de carga repetida foi realizado para medir a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas seguindo o método de ensaio DNIT 184:2018. Neste ensaio utilizou-se corpos de prova cilíndricos, três amostras de cada grupo, com altura de aproximadamente 150 mm e 100 mm de diâmetro moldados no CGS, com volume de vazios variando de $7 \pm 0,5\%$. Antes de iniciar o ensaio, os CPs foram aquecidos em estufa a 60°C durante 3 horas.

O procedimento foi realizado usando a Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) da marca IPC Global®. O ensaio consiste em aplicar um carregamento uniaxial cíclico compressivo de 204 kPa no formato haversine, com 0.1 s de aplicação e 0.9 s de repouso. O critério de parada do ensaio foi o alcance de 7.200 ciclos de carregamento (3 horas de ensaio)

ou uma deformação de 50.000 microstrains, na qual as amostras invariavelmente já alcançam a ruptura.

3.9.6. Módulo Dinâmico (MD)

O módulo dinâmico é o valor normal do módulo complexo, calculado dividindo-se a máxima tensão pela deformação axial recuperável para um material sujeito a uma carga senoidal. Tanto o ensaio de módulo dinâmico quanto o ensaio de módulo de resiliência oferecem estimativas da rigidez da mistura asfáltica. As principais diferenças desses ensaios são que o MD considera as parcelas elásticas e não elásticas das deformações, e utilizam-se carregamentos axiais senoidais, enquanto no módulo de resiliência utilizam-se carregamentos de ondas quadradas em compressão diametral e só a parcela elástica é considerada no cálculo do módulo.

A realização do ensaio seguiu a norma do DNIT 416:2019 e foi realizado por meio da aplicação de uma tensão de compressão senoidal em um corpo de prova de 150 mm de altura e de 100 mm de diâmetro, em temperaturas e frequências de carga especificadas pela norma. A tensão aplicada e a deformação axial recuperável resultante da amostra foram medidas e usadas para o cálculo do módulo dinâmico. Para a obtenção das curvas mestras, o ensaio foi realizado nas temperaturas de 4 °C, 20°C e 40°C com o carregamento com frequências de 0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz. O ensaio foi realizado para cada uma das combinações de temperatura e frequência de carregamento, começando com a temperatura mais baixa e procedendo para a mais alta. Por meio da realização do ensaio, foi possível fazer comparações entre as curvas mestras das misturas avaliadas, de acordo com suas inclinações. Maiores inclinações ocorrem para materiais mais elásticos.

3.9.7. Análise estatística

Para os ensaios mecânicos de RT, RRT, MR, e FN desta pesquisa, foram realizadas análises de variância (ANOVA) e teste Tukey, com objetivo de obter uma melhor interpretação dos dados coletados.

3.9.7.1. Análises de variância (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é uma fórmula estatística usada para comparar as variâncias entre as médias de grupos diferentes. O método permite identificar fatores e interações mais significativos em termos do teste estatístico F de Snedecor. Na ANOVA o objetivo do teste é obter o valor de F calculado (F calc), dado pela Equação 17, e compará-lo ao F tabelado (F tab).

$$F \text{ cal} = \frac{QM}{QM \text{ erro}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

QM é quadrados médios, obtido por meio da Equação 18;

QM erro é o erro dos quadrados médios

$$QM = \frac{SQ}{GL} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

SQ é a soma dos quadrados, obtido pela Equação 19;

GL é o grau de liberdade.

$$SQ = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

x é o parâmetro observado;

n é o número de observações.

Se o F calc for maior que o F tab, para um dado nível de significância p (5% utilizado neste trabalho), então a hipótese é rejeitada, na hipótese inversa os dados apresentam significância para o modelo e, conseqüentemente o modelo é aceito. A probabilidade de se cometer um erro pode ser controlada pela seleção do nível de significância do teste de hipóteses (p), pois o nível de significância do teste é, na realidade, a probabilidade de se rejeitar ou aceitar a hipótese, quando ela é verdadeira, sendo então a probabilidade de se cometer um erro.

3.9.7.2. *Teste Tukey*

O teste Tukey é utilizado para testar todo e qualquer contraste entre duas médias, sendo uma ferramenta recomendada para comparar dois ou mais grupos. O teste de Tukey pode ser descrito como a Equação 19.

$$\Delta = q \frac{\sqrt{QMR}}{\sqrt{J}} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

q é amplitude total estudada;

QMR é o desvio padrão residual do ensaio;

J é o número de repetições das médias confrontadas no contraste.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da reologia empírica e fundamental dos ligantes asfálticos puro e modificados pelos aditivos de misturas asfálticas mornas. Além disso, são analisados os efeitos da adição destes aditivos nos ligantes asfálticos modificados sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas mornas.

4.1. Reologia empírica

Na Tabela 27 apresentam-se os resultados dos ensaios de reologia empírica dos ligantes asfálticos puro e modificados por aditivos de MAMs.

Tabela 27 – Resultados dos ensaios de reologia empírica dos ligantes asfálticos puro e modificados

		Ensaios antes do RTFO			
		Ligante 50/70	Ligante + WarmGrip	Ligante + óleo	Ligante + zeólita
Penetração (0.1 mm)		66,3	59,3	92,8	38,0
Ponto de amolecimento		48,3	50,5	46,2	52,5
Índice de susceptibilidade térmica (IST)		-0,97	-0,66	-0,64	-1,19
Viscosidade rotacional (cP)	135 °C	375,00	377,50	295,00	451,43
	150 °C	187,50	189,00	152,50	217,24
	177 °C	69,25	70,00	67,75	77,30
		Ensaios após RTFO			
Penetração (0.1 mm)		29	38,8	55,0	23,0
Porcentagem de Penetração retida (%)		43,7	65,3	59,3	60,5
Ponto de amolecimento		53,5	54,3	50,3	55,8
Variação do ponto de amolecimento		5,3	3,8	4,1	3,3
Viscosidade rotacional (cP)	135 °C	531,3	535,0	476,3	524,9
	150 °C	255,0	255,5	229,5	231,5
	177 °C	88,8	88,0	81,8	80,8
Variação de massa do ligante (%)		0,064	0,062	0,102	0,098

Com relação ao ensaio de penetração antes do RTFO, foi possível verificar que o ligante modificado com óleo de girassol aumentou os valores de penetração. Já os ligantes modificados com o WarmGrip e com zeólita natural reduziram a penetração, quando comparados ao ligante puro.

O procedimento de RTFO simula o envelhecimento de um ligante asfáltico devido a uma combinação de reações de oxidação e volatilização. Após o procedimento de RTFO, verificou-se que os ligantes foram envelhecidos e por isso apresentaram redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento. Isto indica que o teor de asfaltenos aumentou, enquanto o teor de aromáticos e resinas diminuiu com o envelhecimento. O aumento do teor de asfaltenos leva o asfalto a tornar-se mais rígido, ou seja, mais duro (JONI *et al.*, 2019). Este aumento da rigidez do ligante asfáltico pode melhorar a resistência à deformação permanente, porém, pode ocasionar problemas de trincamento e trincas por fadiga (GE *et al.*, 2017).

Após o procedimento de RTFO, observou-se uma redução nos valores de penetração do ligante modificado com zeólita natural, enquanto que os ligantes modificados com óleo de girassol e WarmGrip apresentaram um aumento, quando comparados ao ligante puro. Este fato indica que o óleo de girassol e o WarmGrip diminuíram a rigidez do ligante após o procedimento de envelhecimento.

O parâmetro de porcentagem de penetração retida analisa a sensibilidade aos fatores que causam o envelhecimento a curto prazo de um ligante. De acordo com a norma do DNIT 095:2006 o valor mínimo é de 55%, assim quanto maior o parâmetro maior a resistência do ligante a oxidação. O ligante asfáltico puro apresentou a penetração retida inferior ao preconizado por norma, indicando que ele tem maior tendência de oxidação e aumento de rigidez. Enquanto que o óleo de girassol, o WarmGrip e a zeólita natural atuaram melhorando esta propriedade, atendendo ao especificado por norma com penetração retida superior ao valor mínimo. Isto indica que esses aditivos de MAMs apresentam efeito rejuvenescedor e podem suavizar o ligante envelhecido do RAP.

Com relação ao ensaio de ponto de amolecimento, os resultados indicaram que os valores atenderam ao preconizado pela norma do DNIT 095:2006, que estabelece 46°C como valor mínimo para ligantes classificados como 50/70. O ligante modificado com óleo de girassol proporcionou redução na temperatura de ponto de amolecimento, já os ligantes modificados com o WarmGrip e zeólita apresentaram aumento dessa propriedade, quando comparados ao ligante puro. A variação do ponto de amolecimento para o ligante puro se encontra dentro do limite da norma, DNIT 095/2006 – ME, que determina um limite máximo de variação de 8°C do ponto de amolecimento após RTFO. De acordo com o estabelecido para o ligante 50/70, os ligantes modificados com WarmGrip, óleo de girassol e zeólita também se enquadram dentro do especificado. Percebe-se que a maior variação de temperatura ocorreu para a amostra com ligante puro, que apresentou o limite máximo de 5,3°C.

Com relação ao Índice de Susceptibilidade Térmica (IST), a norma do DNIT 095:2006 estabelece valores do IST entre -1,5 e +0,7. Portanto, o valor do IST para o ligante asfáltico puro atendeu a especificação. Os ligantes modificados também atenderam a especificação, levando em consideração o estabelecido para o ligante 50/70. Entretanto, este parâmetro é limitado, uma vez que é baseado em medidas empíricas, como penetração e ponto de amolecimento, e pode confundir as dependências de tempo e de temperatura ou serem válidos apenas para faixas restritas de temperatura.

Observou-se um aumento no índice de susceptibilidade térmica dos ligantes modificados com zeólita, após o procedimento de RTFO. Esse aumento diante da baixa variação de massa, após o envelhecimento, em que apresentou baixa volatilização dos ligantes, pode indicar a transformação de maltenos em asfaltenos, com a zeólita ocupando os espaços antes ocupados pelos maltenos. A mistura modificada com WarmGrip se mostrou mais resistente às variações de temperaturas, pois elas apresentaram índices de susceptibilidade térmica mais baixos. O desempenho em altas ou em baixas temperaturas é melhor quando comparadas com o ligante puro, tendo em vista o baixo índice de susceptibilidade térmica.

Com relação a variação de massa, o ligante puro e os ligantes modificados com os aditivos de MAMs estão em conformidade com a norma DNIT 095:2006, que preconiza variações de massa inferiores a 0,5%. Percebe-se que as variações de massa se mantiveram inferiores a 0,10%.

De acordo com os resultados da Tabela 27, observa-se que a viscosidade do ligante modificado com o WarmGrip, antes e após o RTFO, permaneceu praticamente inalterada quando comparada ao ligante puro. Sabe-se que a incorporação de aditivos químicos melhora a trabalhabilidade e facilitam a compactação das misturas sem alterar a sua viscosidade. Este fato pode ser explicado devido os aditivos surfactantes serem responsáveis pela redução adicional da tensão superficial, e promoverem a diluição do filme interfacial formado pelo surfactante, que impede a elevação significativa da viscosidade do ligante.

Verifica-se que ocorreu a redução da viscosidade do ligante, antes e após o RTFO, para o ligante modificado com o óleo de girassol, sendo o único aditivo que apresentou redução efetiva da viscosidade, este fato era esperado já que os aditivos orgânicos agem diminuindo a viscosidade do ligante. O óleo de girassol reduz a viscosidade a alta temperatura do ligante asfáltico, que ocasiona algumas mudanças na relação asfaltenos e maltenos. O asfaleno é responsável pela resposta viscosa do ligante, e a composição de maltenos é responsável pela resposta elástica, portanto, provavelmente ocorreu redução de asfaltenos e aumento de maltenos

para os ligantes modificados pelo óleo de girassol. Este possui óleos intermicelares aromáticos, que ao ser misturado ao ligante asfáltico em elevadas temperaturas torna o ligante mais mole, causando a redução da viscosidade a alta temperatura do ligante asfáltico. De acordo com Moghadas Nejad *et al.* (2013), em misturas asfálticas que utilizam RAP deve-se utilizar um teor ligante asfáltico macio ou um ligante asfáltico com menor viscosidade, visando assim aumentar o teor de RAP nas misturas asfálticas. Essa baixa viscosidade é desejável durante as operações de usinagem porque um fluido de baixa viscosidade tem maior trabalhabilidade do que aquele com alta viscosidade.

Com relação ao ligante modificado com zeólita, ocorreu um pequeno aumento da viscosidade em comparação com o ligante puro, esse fato não era esperado já que a zeólita é um aditivo que contém água e causa espumação do ligante atuando na redução da viscosidade. No entanto, a utilização de zeólitas como aditivo de MAM é baseado na liberação de vapor de água quando as zeólitas são aquecidas, isto significa que não necessariamente subentende que ocorra redução permanente da viscosidade do ligante, mas na realidade uma redução momentânea dela.

Portanto, verifica-se que os três tipos de aditivos de MAMs têm efeitos diferentes nos índices convencionais de ligante asfáltico. O WarmGrip é um aditivo de MAM à base de surfactante, e o componente surfactante reduz a tensão superficial do ligante, mas não reduz a viscosidade do ligante. Em virtude disso os resultados apresentam valores próximos ao ligante puro, ou seja, apresentou pequena redução de 10,6% para o ensaio de penetração e aumento de 4,55% para o ponto de amolecimento em comparação com o ligante 50/70 puro, porém, como o esperado, o ligante modificado com WarmGrip praticamente não apresentou alteração da viscosidade. Resultados semelhantes foram apresentados por Wargha Filho *et al.* (2014), onde observaram que o ligante asfáltico modificado com o Gemul® (aditivo químico) apresentou valores de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade muito próximos daqueles encontrados para o CAP puro antes do RTFO. Bohn (2017), utilizou o Evotherm® (aditivo químico) para a produção de MARMs e também não verificou diferenças no ensaio de viscosidade quando comparado com o ligante puro.

O óleo de girassol é um aditivo orgânico de MAM que reduz a viscosidade do ligante, aumenta a penetração e reduz o ponto de amolecimento. Pontos de amolecimento menores são, de certa forma, interessantes, tendo em vista que esses modificadores podem ser empregados para uso em misturas asfálticas recicladas, confirmando a redução da rigidez a temperaturas

menores. Os resultados indicaram que ocorreu aumento da penetração para ligante modificado com óleo de girassol de 39,97%, e a redução do ponto de amolecimento foi de 4,35% em comparação com o ligante 50/70 puro, e ainda possibilitou a redução da viscosidade. Essa redução de viscosidade do ligante asfáltico também contribuiu para a recuperação da sua forma original após sofrer deformação por uma carga. Comportamento semelhante ao desta pesquisa foi observado por outros estudos de MAMs com ligantes modificados por óleos (CARVALHO, 2018; GUERRA, 2019; & SUN *et al.*, 2016a).

A zeólita natural é um aluminossilicato de sódio que contém uma grande quantidade de água cristalina, que libera água cristalina para espumar o asfalto. Quando a água cristalina volatiliza, a zeólita atua como enchimento e adsorve o componente leve do asfalto, o efeito de adsorção aumenta a consistência do asfalto. Os resultados indicaram que os índices de penetração diminuíram em 42,68%, enquanto o ponto de amolecimento aumentou 8,69% em comparação com o ligante 50/70 puro. Zhang *et al.* (2020) apresentaram resultados semelhantes ao desta pesquisa, assim como observado para a zeólita natural (aditivo à base de espuma), os ligantes modificados com Aspha-min (aditivo à base de espuma) apresentaram redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento em comparação com o ligante asfáltico puro de referência. Amoni (2019) sintetizaram a zeólita A, a partir das cinzas volantes (FA) produzidas em usina termoelétrica, para avaliar o seu potencial como aditivo de mistura asfáltica morna (MAM). Os resultados também corroboraram ao desta pesquisa, onde, apesar da adição de 1% de zeólita não ter alterado os valores de penetração, ponto de amolecimento e IST, a adição de 5 e 10% de cinza reduziu a penetração e aumentou o ponto de amolecimento. O fato da zeólita ZFA não ter alterado os parâmetros de penetração e ponto de amolecimento pode estar associado com a pequena quantidade de material adicionado ao ligante asfáltico (1% de ZFA), quando comparado com a quantidade de cinza adicionada (5 e 10%).

4.2. Reologia fundamental

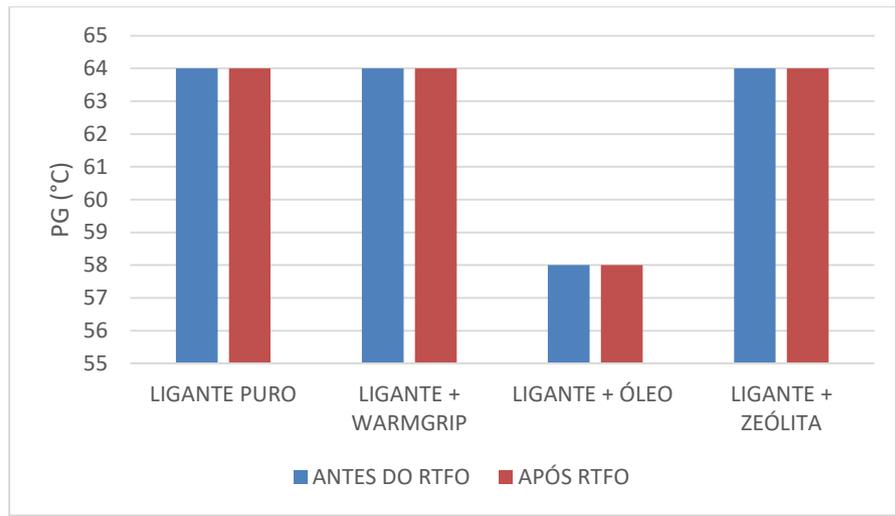
4.2.1. Grau de desempenho (PG)

A Figura 24 apresenta os resultados das temperaturas de PG e PG contínuo dos ligantes asfálticos antes e após o processo de RTFO. Nesta pesquisa foi dispensada a realização do

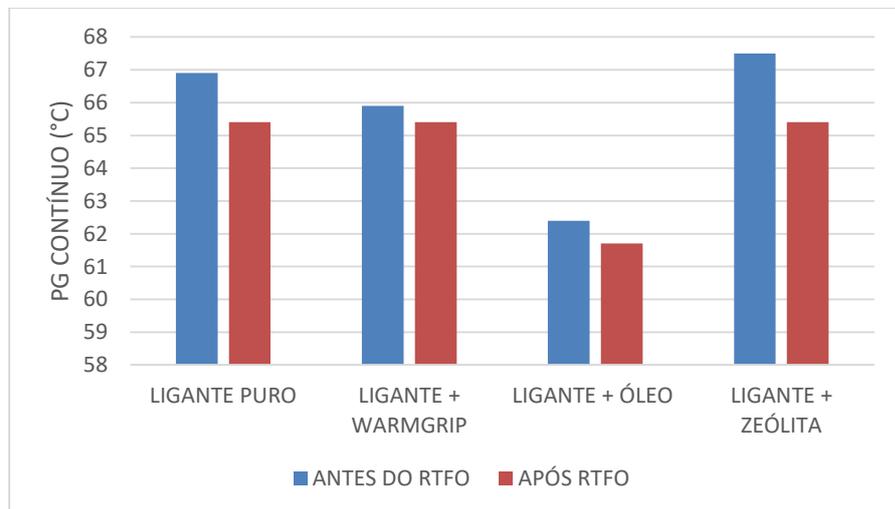
ensaio para se determinar a temperatura mínima de PG, tendo em vista que a maior parte do território brasileiro possui um clima tropical e com temperaturas médias de 25°C.

Figura 24 – Grau de desempenho dos ligantes asfálticos puro e modificados: a) PG, b) PG contínuo

a)



b)



Verifica-se que os ligantes modificados com o WarmGrip e zeólita natural apresentaram os mesmos valores de PG. Logo, estes aditivos mantiveram as propriedades do ligante mesmo em temperaturas mais altas, isto indica que o comportamento mecânico das misturas modificadas com WarmGrip e zeólita preservarão as características das misturas com o ligante

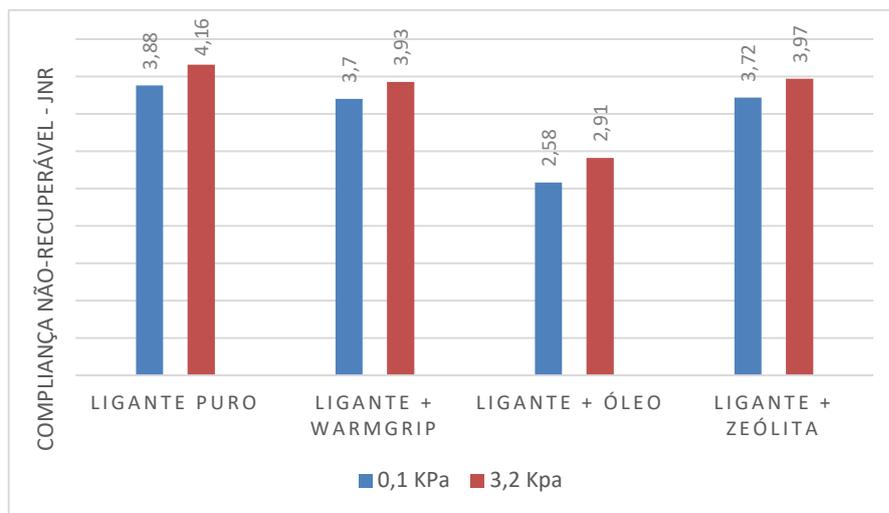
50/70 puro, mantendo a mesma rigidez. Enquanto que o ligante modificado com óleo apresentou uma redução de 6°C quando comparado com o CAP 50/70, portanto, o ligante modificado por óleo ficou mais suscetível ao efeito da oxidação e teve aumento da deformabilidade e redução da rigidez frente a altas temperaturas.

No entanto, como a amostra do ligante modificado por óleo apresentou a redução de um degrau na temperatura de PG (58°C), isto possibilita que o aditivo pode ser utilizado como um redutor de viscosidade e apresente comportamento rejuvenescedor para uso em misturas asfálticas recicladas. Estes resultados poderão ser corroborados com os resultados dos ensaios mecânicos nas misturas asfálticas recicladas. Sabe-se que misturas asfálticas com elevados teores de RAP necessitam do uso de ligantes mais macios e menos viscosos a fim de rejuvenescer o ligante asfáltico oxidado presente no material. Portanto, o óleo de girassol se apresentou como uma boa alternativa para ser utilizado como um modificador com características rejuvenescedoras. Esses valores são semelhantes aos encontrados por Melo Neto *et al.* (2022) que utilizaram o óleo de algodão e copaíba como rejuvenescedores do ligante asfáltico, pois as misturas com este aditivo apresentaram redução da temperatura e uma menor rigidez.

4.2.2. MSCR

A realização do ensaio MSCR avalia a compilância não-recuperável (Jnr), este parâmetro fornece dados da suscetibilidade ao acúmulo de deformação permanente. Logo, quanto menor o valor do Jnr, maior a resistência à deformação permanente. A Figura 25 apresenta o resumo destes resultados para as tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa.

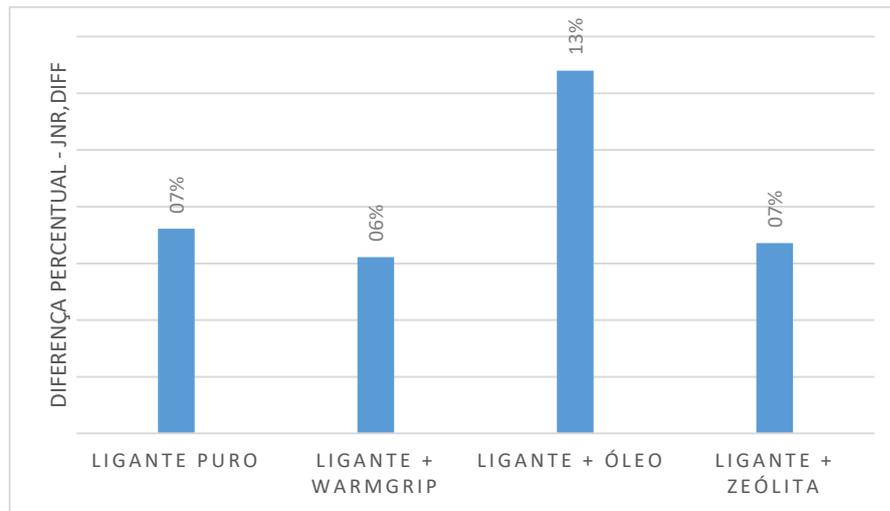
Figura 25 - Resultados dos ensaios de MSCR *Jnr*



Por meio dos resultados obtidos, verifica-se que a modificação do ligante asfáltico com o óleo de girassol resultaram em menores valores de *Jnr* em relação ao CAP 50/70, o que demonstra a influência benéfica desse aditivo de MAMs na resistência à deformação permanente. No entanto, esse resultado foi encontrado para o ensaio executado na temperatura de PG de 58°C que se encontra 6°C abaixo do CAP puro, ou seja, tais valores podem não ser satisfatórios se utilizados a uma temperatura maior que 58°C. Já os aditivos modificados com WarmGrip e zeólita natural mantiveram os valores de *Jnr* muito próximos da mistura de referência, porém, o ensaio foi realizado na temperatura de PG de 64°C. Verifica-se também que o *Jnr* aumentou quando a tensão cisalhante passou de 0,1 kPa para 3,2 kPa.

Na Figura 26 estão ilustrados os valores da diferença percentual entre o *Jnr* à 0,1 kPa e 3,2 kPa (*Jnr,diff*) que indica a sensibilidade apresentada pelo ligante asfáltico ao aumento da tensão. Os valores de *Jnr, diff* para os ligantes asfálticos puro e modificados têm a função de mostrar a sensibilidade dos materiais ao aumento dos níveis de tensão e deve permanecer abaixo de 75%, conforme AASHTO M320 (2017). Portanto, todas as amostras são consideradas adequadas para uso em pavimentação. A menor diferença percentual foi obtida para o ligante modificado com WarmGrip.

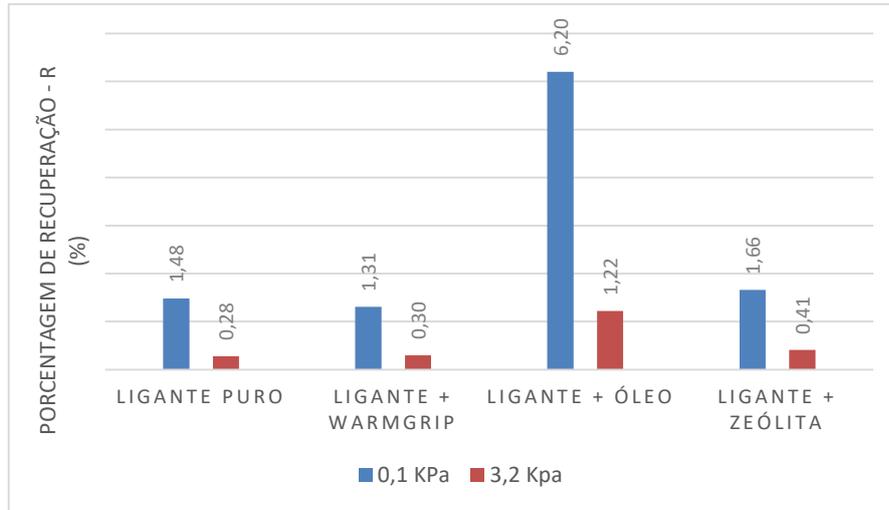
Figura 26 - Diferença percentual - Jnr,diff



O ensaio de MSCR também avalia o percentual de recuperação (%R), este parâmetro indica a capacidade de retorno elástico que a amostra possui ao ser submetida a períodos de aplicação de tensão e relaxamento. Os percentuais de recuperação estão ilustrados na Figura 27. De acordo com Domingos e Faxina (2015), maiores porcentagens de recuperação indicam que o ligante asfáltico pode recuperar uma parcela maior de sua deformação total ao final de cada ciclo de carga-descarga, o que favorece a resistência do material a deformação permanente.

Behnood e Olek (2017) observaram que para ligantes não modificados o percentual de recuperação é muito próximo de zero, principalmente na tensão de 3,2 kPa e para temperaturas a partir de 64°C. Portanto, os ligantes modificados com WarmGrip e zeólita mantiveram praticamente as propriedades do CAP 50/70, já o ligante com óleo de girassol apresentou maior porcentagem de recuperação favorecendo a resistência a deformação permanente.

Figura 27 - Resultados dos ensaios de MSCR R%

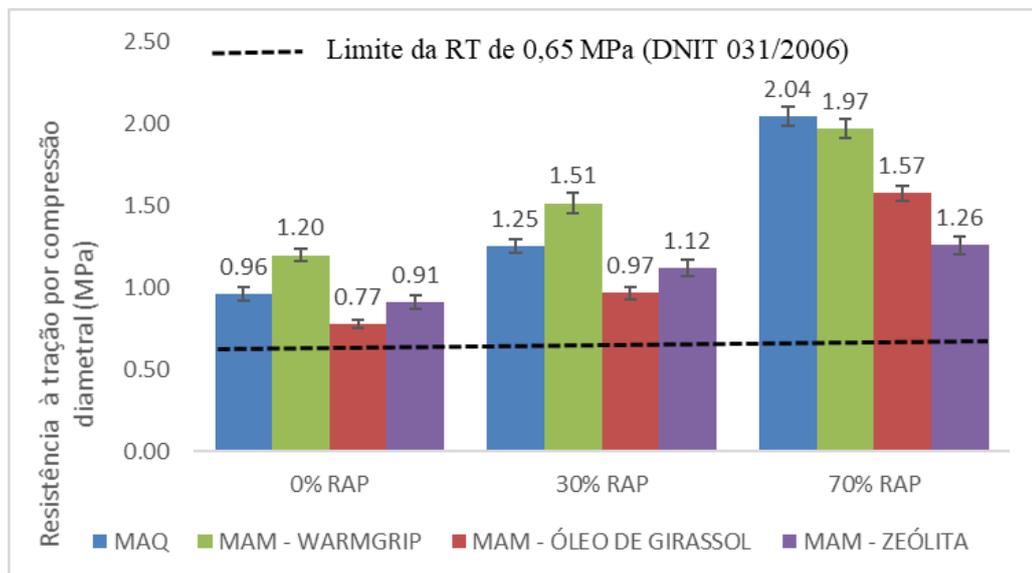


4.3. Caracterização mecânica

4.3.1. Resistência à tração indireta por compressão diametral

A Figura 28 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas estudadas nesta pesquisa.

Figura 28 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Todas as misturas atenderam ao critério da norma do DNIT - ME 031:2006, de um valor mínimo de 0,65 MPa (a 25°C), em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento. Observa-se que a resistência à tração aumentou conforme foi elevado o teor de RAP nas misturas. Uma resposta semelhante foi relatada por outros autores (FAKHRI & AHMADI, 2017; OMRANIAN *et al.*, 2018), onde um aumento no valor de RT foi observado com teor crescente de RAP para misturas asfálticas com e sem aditivos de MAMs.

Entende-se que o aumento do percentual de RAP na composição das misturas tendem a proporcionar aumento da rigidez delas. Isso ocorre devido ao processo de oxidação, o teor de ligante do RAP endurece durante sua vida útil, tornando a rigidez das misturas asfálticas recicladas maior em comparação com as misturas convencionais. Além disso, essa elevação da rigidez pode ser negativa para a mistura, uma vez que o aumento da resistência ocorreu devido ao acréscimo do percentual de ligante oxidado do RAP, que torna as misturas mais frágeis e propensas a trincas por fadiga. Portanto, são esperadas uma maior resistência à fadiga para as MARMs modificadas com os aditivos de óleo de girassol e zeólita devido a menor rigidez apresentada no ensaio de RT.

De forma geral, os aditivos de MAMs utilizados nesta pesquisa diminuíram o valor da RT quando comparados entre os mesmos teores de RAP das misturas a quente, com exceção para as misturas modificadas com WarmGrip nos teores de 0% e 30% de RAP. Os valores de RT mais baixos indicam seu comportamento flexível. Essa redução da RT está associada com a diminuição da temperatura de compactação e que resulta na redução da capacidade de carga das misturas (OMRANIAN *et al.*, 2018). Ainda de acordo com estes autores, esta redução também pode ser atribuída à capacidade que a MAM tem de compensar os efeitos do ligante envelhecido presente no RAP.

Singh *et al.* (2018) avaliaram o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas, com variação de 0 a 40% de RAP, contendo aditivos de MAMs à base de cera e à base de produtos químicos. De forma geral, as misturas asfálticas modificadas pelos aditivos de MAMs apresentaram redução da RT. Por exemplo, as misturas com 30% de RAP e cera apresentaram redução no valor da RT de aproximadamente 23%, enquanto que as misturas com 30% de RAP e o aditivo químico apresentaram uma redução de aproximadamente 10%. De acordo com esses autores, essa tendência demonstra que os aditivos de MAMs podem promover um impacto negativo na resistência. No entanto, essa redução na resistência, que ocorre devido a diminuição da rigidez, pode contribuir para que as misturas com alto teor de RAP apresentem rigidez mais

próxima da mistura de referência. Portanto, mesmo as resistências das misturas modificadas com zeólita apresentarem os valores mais baixos de RT, isso possibilita que as MARMs modificadas por esse aditivo e contendo um teor de até 70% de RAP sejam incorporadas em novas misturas asfálticas, sem prejudicar o seu desempenho em campo.

Sengoz & Oylumluoglu (2013) avaliaram a utilização de misturas asfálticas recicladas em diferentes teores (variação de 0 a 50% de RAP) com três aditivos de produção de MAMs (orgânico, químico e um aditivo a base de água). As misturas com RAP apresentaram maior RT, quando comparadas com a mistura de referência. Além disso, as misturas com 10%, 20% e 30% de RAP, com os aditivos químico, a base de água e orgânico, respectivamente, apresentaram bom desempenho em termos de estabilidade e deformação. Entre os aditivos de MAMs utilizados juntamente com a adição de RAP ideal, verificou-se que o aditivo orgânico possibilitou a maior taxa de utilização do RAP (30%) dentro da mistura asfáltica, este fato pode ter ocorrido devido à estrutura de cristalização da MAM auxiliada pelo aditivo orgânico e materiais de RAP. Portanto, o aditivo orgânico atuou rejuvenescendo o ligante do RAP e as misturas modificadas com esse aditivo e 30% de RAP, provavelmente, apresentaria a maior resistência a vida de fadiga.

As descobertas desta pesquisa estão de acordo com os resultados relatados por Kavussi & Motevalizadeh (2021), onde, as MARMs a base de espuma de asfalto apresentou os valores de RT inferiores aos da mistura a quente de controle. Rashwan e Williams (2012) também relataram que foi possível executar as MARMs modificadas com o uso do EvothermTM e que apresentaram valores de rigidez mais baixos.

Com relação as misturas asfálticas recicladas modificadas com o óleo de girassol, verificou-se redução da resistência à tração de 22,4% e 23,04% para os teores de 30% e 70% de RAP, respectivamente, em relação às misturas asfálticas sem rejuvenescedor. Esses resultados corroboram com o estudo de Pradhan e Sahoo (2020), onde foi observado uma redução de 15,24% no valor de RT para a mistura reciclada com 40% de RAP e o agente rejuvenescedor óleo de undeira (*Calophyllum inophyllum*) em relação à mistura reciclada com 40% de RAP e sem agente rejuvenescedor. Além disso, Girimath e Singh (2019) apontam que os bio-óleos ricos em componentes leves têm um bom efeito rejuvenescedor e podem suavizar o ligante envelhecido, reduzindo sua viscosidade. Nesta pesquisa, também foi possível observar que o óleo de girassol reduziu a viscosidade do ligante asfáltico o que contribuiu para suavizar o ligante do RAP.

A Tabela 28 apresenta a análise de variância (ANOVA) de dois fatores, realizada com nível de significância (α) de 5%, para o ensaio de RT. Onde, são indicadas as variáveis: SS que é a soma dos quadrados, GL o grau de liberdade, MS se refere aos quadrados médios ANOVA, F é a significância global do modelo e o valor de P ($100-P$) é a confiança do modelo.

Tabela 28 - ANOVA da resistência à tração por compressão diametral das amostras

	SS	GL	MS	F	p
Teor	3.49505	2	1.74753	440,24	0.000000
Aditivo	1.43416	3	0.47805	120,43	0.000000
Teor*aditivo	0.49793	6	0.08299	20.91	0.000000
Erro	0.09527	24	0.00397		

Ao analisar o resultado de p ($p < 0,05$), é possível afirmar que a interação entre teor e aditivo apresentaram diferenças estatisticamente significantes. Portanto, a interpretação dos dados da interação tem que predominar sobre os fatores (teor de RAP e tipo de aditivo de MAM) isolados, ou seja, as combinações dos efeitos provocados pelos dois fatores influenciaram na RT. Por meio da análise do grau de liberdade, será possível obter a quantidade de grupos, ou variáveis, que apresentam comportamentos distintos entre si. Para uma análise complementar, a ANOVA, foi realizado o teste de comparação múltipla, o teste Tukey. Os resultados obtidos nessa nova análise estão indicados na Tabela 29.

Tabela 29 - Teste Tukey para a interação dos fatores teor de RAP e tipo de aditivo de MAM (RT)

Tukey teste; variável RT								
Grupos homogêneos, $\alpha = 0.05$								
Erro: entre MS = 0.00397, df = 24								
Teor (%)	Aditivo	RT	1	2	3	4	5	6
0	Óleo de girassol	0.77				d		
0	Zeólita	0.91		b		d		
0	Pura	0.96		b	c			
30	Óleo de girassol	0.97		b	c			
30	Zeólita	1.12	a		c			
0	WarmGrip	1.20	a					
30	Pura	1.25	a					
70	Zeólita	1.26	a					
30	WarmGrip	1.51					e	
70	Óleo de girassol	1.57					e	
70	WarmGrip	1.97						f
70	Pura	2.04						f

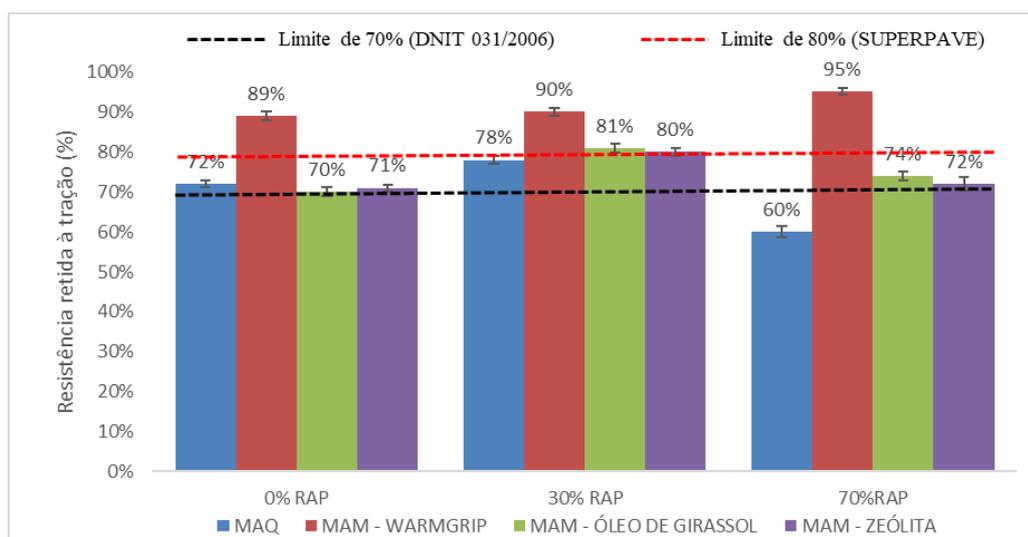
Verifica-se por meio da Tabela 29 que médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade. Portanto, as misturas com 0% de RAP com os ligantes modificados pelo óleo de girassol e zeólita natural não apresentaram diferenças estatisticamente significantes e exibiram os menores valores de resistência à tração. Já as misturas com 70% de RAP pura e com o ligante modificado pelo WarmGrip apresentaram os maiores valores de resistência à tração, isto indica que essas misturas apresentaram rigidez semelhantes.

Percebe-se também que os resultados de RT para as misturas com até 30% de RAP dos ligantes modificados pelo óleo de girassol e pela zeólita apresentaram os valores mais próximos da mistura de referência (MQ0), este fato demonstra que os aditivos de óleo de girassol e zeólita atuaram reduzindo a rigidez das misturas recicladas. Além disso, as misturas com zeólita com 30 e 70% de RAP, a mistura pura com 30% de RAP e a mistura com WarmGrip e 0% de RAP não apresentaram diferenças ao nível de 5% de significância. Portanto, o aditivo da zeólita natural permitiu a maior incorporação de RAP nas misturas (70%) e apresentou rigidez semelhante a mistura com 30% de RAP com ligante asfáltico puro.

4.3.2. Dano por umidade induzida

A Figura 29 apresenta os resultados dos valores de Resistência Retida à Tração (RRT).

Figura 29 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida



Para a metodologia SUPERPAVE, o valor de RRT mínimo para que a susceptibilidade à umidade da mistura asfáltica seja considerada aceitável é 80%. Apenas as MARMs com o aditivo WarmGrip e as misturas contendo 30% de RAP MARM modificadas com óleo de girassol e zeólita natural satisfizeram esse critério. Entretanto, para a especificação de serviço DNIT 031/2006, que preconiza uma RRT mínima de 70% para misturas asfálticas, todas as misturas, com exceção da MARQ com 70% de RAP, atenderam a esse critério.

Segundo Goli & Latifi (2020), a resistência retida à tração da mistura asfáltica é uma característica importante que representa as propriedades coesivas e adesivas do ligante e da interface ligante-agregado, portanto, quanto maior a RRT melhor será a resistência à ação deletérea da água. Os aditivos de MAMs combinados com os teores de RAP, analisados nesta pesquisa, atuaram melhorando essa propriedade. Esse aumento na resistência umidade foi observado principalmente porque o ligante envelhecido do RAP e os agregados do RAP apresentaram uma ligação mútua mais forte do que o ligante asfáltico virgem e o agregado natural impedindo assim a entrada de água na interface. Esse aumento da resistência à umidade das misturas asfálticas recicladas também pode ter ocorrido devido os agregados reciclados já serem revestidos com ligante asfáltico. Assim, a penetração de água é limitada nas partículas de RAP, o que as torna mais resistentes à desagregação do que as misturas asfálticas convencionais. Cooper *et al.* (2017) também observaram melhor resistência à suscetibilidade à umidade no caso de misturas recicladas em comparação com à mistura asfáltica convencional.

Além disso, sabe-se que o agregado empregado neste trabalho é o granítico, reconhecido por ter fraca adesividade com o ligante asfáltico. Logo, o aditivo WarmGrip, atuou melhorando essa propriedade possibilitando a produção de misturas mais duráveis, especialmente na região Nordeste, onde este tipo de agregado prevalece. Esse aumento da resistência ao dano por umidade verificado neste aditivo (aditivo químico) também foi relatado por Liu, Yan, & Liu (2018). Estes autores certificam que aditivos químicos como Cecabase, Rediset e Evotherm podem ser usados para melhorar as propriedades de adesão. Porém, é necessária uma consideração cuidadosa, pois ocorre uma redução na tensão superficial do asfalto sem modificar as propriedades reológicas. Além disso, os aditivos químicos, devido às suas extremidades polarizadas, podem atrair os materiais (agregados) com cargas opostas e aumentar as propriedades de adesão (BEHNOOD, 2020).

A MQ70 apresentou o valor mais baixo de RRT com uma redução de 16,67% quando comparada com a mistura de referência. De acordo Kavussi & Motevalizadeh (2021), esta redução dos valores de RRT de misturas contendo 70% de RAP evidencia a falta de adesividade e coesão dessas misturas com alto teor de fresado. Porém, a redução da resistência ao dano por umidade apresentada por esses autores, também pode ter ocorrido devido o teor reduzido de ligante virgem, que pode ter causado ligação inadequada entre as partículas agregadas e o mástique asfáltico.

A zeólita natural, foi o aditivo de MAM que permitiu que as misturas fossem compactadas nas temperaturas mais baixas, em torno de 100°C, e ainda assim apresentou um bom desempenho de RRT. Pois, considerando a MARM com zeólita natural contendo 70% de RAP e comparando MARQ convencional de mesmo teor de RAP, a mistura com zeólita ainda apresentou um valor de RRT 20% superior.

Arega *et al.* (2014) avaliaram a influência do teor de água, tipo de ligante e dispositivo de formação de espuma na qualidade dos ligantes asfálticos espumosos. Para isso, utilizaram ferramentas de medição de distância a laser e ultrassônica em combinação com imagens digitais da superfície espumada para quantificar e entender melhor a expansão e a deterioração dos ligantes asfálticos espumados ao longo do tempo. Os resultados indicaram que o teor de água e o tipo de ligante têm influência na taxa de expansão máxima e na taxa de colapso das espumas. Maiores teores de água foram associados a taxas de expansão mais altas, mas também a taxas de colapso mais rápidas.

Além disso, sabe-se que o agregado úmido em contato com o ligante pode aumentar a suscetibilidade à ação deletéria da água em uma MAM, devido à falta de afinidade eletroquímica entre o ligante e a superfície do agregado. Porém, o uso de cal hidratada pode ser utilizada como um agente adesivo nos processos de asfalto espumado das MAMs para reduzir a suscetibilidade à umidade (KAVUSSI & HASHEMIAN, 2012; DIAB *et al.*, 2016). You *et al.* (2018a) relataram que o impacto da formação de espuma sobre o desempenho mecânico das misturas produzidas é desprezível. No entanto, nesta pesquisa, as misturas com zeólitas indicaram um melhor comportamento mecânico, já que este aditivo proporcionou redução da rigidez das misturas recicladas.

Shu *et al.* (2012) apresentaram um resultado promissor sobre a susceptibilidade a umidade com a utilização de asfalto espumado e a incorporação de RAP. Eles demonstraram que a resistência ao dano por umidade dessas misturas é adequadamente semelhante ao que foi observado em uma mistura a quente convencional. No entanto, Li *et al.* (2013) afirmaram que, quando a tecnologia de asfalto espumado é usada para a produção de misturas de reciclagem a frio, o conteúdo de RAP deve ser limitado, visando atingir o desempenho desejado. Estes resultados divergentes podem ser atribuídos a alguns fatores, como por exemplo, se o RAP antigo apresentou algum problema de adesividade e stripping, a ocorrência deste problema na mistura de reciclagem é bastante plausível (FAKHRI & AHMADI, 2017).

Rahman *et al.* (2021a) avaliaram o potencial a danos por umidade induzida em uma MAM de asfalto espumado contendo RAP e compararam com uma mistura asfáltica quente contendo as mesmas quantidades de RAP. Para isso foram realizados os ensaios de resistência retida à tração (conforme a AASHTO T 283:2014), o teste Moisture Induced Sensitivity Test (MIST) e o teste de Hamburg Wheel Tracking (HWT), sendo este último obtido pela inclinação da zona terciária do gráfico de deformação permanente em função do número de passagens da roda, também conhecida como inclinação de stripping. Verificou-se que o condicionamento MIST simula melhor o dano induzido pela umidade e pode capturar a tendência de misturas asfálticas a danos por umidade mais distintamente em comparação com o método AASHTO T 283:2014, devido à aplicação de cargas cíclicas. Para todos os testes realizados a MAM exibiu maior potencial de dano induzido por umidade devido à menores temperaturas de mistura e compactação em comparação com a mistura a quente. No entanto, o aumento no conteúdo de RAP reduziu o potencial de dano por umidade induzida para a MAM. Portanto, a menor rigidez da MAM pode ser compensada com a adição do ligante envelhecido do RAP.

Lopes *et al.* (2014) avaliaram misturas a quente e mornas, modificadas com um aditivo químico da marca CECABASE RT[®], contendo altas taxas de RAP (50% de RAP). Os resultados mostraram que a MARQ com 0% de RAP e as MARMs com 0 e 50% de RAP têm boa resistência à ação da água, apresentando valores de RRT maiores que 89%, indicando sensibilidade muito baixa à ação deletéria da água. Para a MARQ com 50% de RAP, verificou-se que sua sensibilidade à água foi insignificante (98%). De acordo com os resultados e a repetibilidade do teste (0,078), o uso de RAP ou a técnica de reciclagem morna não aumentaram a sensibilidade à água. Logo, esses resultados de dano por umidade enfatizam a importância da contribuição da reciclagem e da redução da temperatura.

Pradhan e Sahoo (2020) verificaram a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas recicladas entre diferentes teores de RAP (30, 40, 50, 60 e 70) com o rejuvenescedor do tipo óleo de undeira. Assim como os resultados obtidos nesta pesquisa, os autores apontaram que a incorporação de 30-40% de RAP acarretaram aumento da resistência retida à tração das misturas, mas à medida que se aumentou o teor de RAP a partir de 50% os valores reduziram. Todas as misturas asfálticas avaliadas apresentaram uma RRT acima de 80%.

A Tabela 30 apresenta a análise de variância (ANOVA) de dois fatores, realizada com nível de significância (α) de 5%, para o ensaio de RRT.

Tabela 30 - ANOVA da resistência retida à tração por compressão diametral das amostras

	SS	GL	MS	F	p
Teor	0.01965	2	0.00982	73.2	0.000000
Aditivo	0.26270	3	0.08757	652.2	0.000000
Teor*aditivo	0.05616	6	0.00936	69.7	0.000000
Erro	0.00322	24	0.00013		

Ao analisar os resultados de p ($p < 0,05$), presentes nas tabelas, é possível afirmar que as composições apresentaram diferenças estatisticamente significantes quanto aos parâmetros observados. Isto demonstra que não é possível prever o comportamento desta variável (RRT) por meio dos teores de RAP e tipo de aditivo de MAM separadamente, pois a interação desses fatores é significativa para o modelo. Assim como no ensaio de RT, foi realizado o teste Tukey. Os resultados obtidos nessa nova análise estão indicados na Tabela 31.

Tabela 31 - Teste Tukey para a interação dos fatores teor de RAP e tipo de aditivo de MAM (RRT)

Tukey teste; variável RRT
 Grupos homogêneos, alpha = 0.05
 Erro: entre MS = 0.013, df = 24

Teor (%)	Aditivo	RRT	1	2	3	4	5	6
70	Pura	0.60					e	
0	Óleo de girassol	0.70	a					
0	Zeólita	0.71	a	b				
30	Zeólita	0.72	a	b				
70	Zeólita	0.72	a	b				
0	Pura	0.72	a	b				
70	Óleo de girassol	0.74		b				
30	Pura	0.78			c			
30	Óleo de girassol	0.81			c			
0	WarmGrip	0.89				d		
30	WarmGrip	0.90				d		
70	WarmGrip	0.95						f

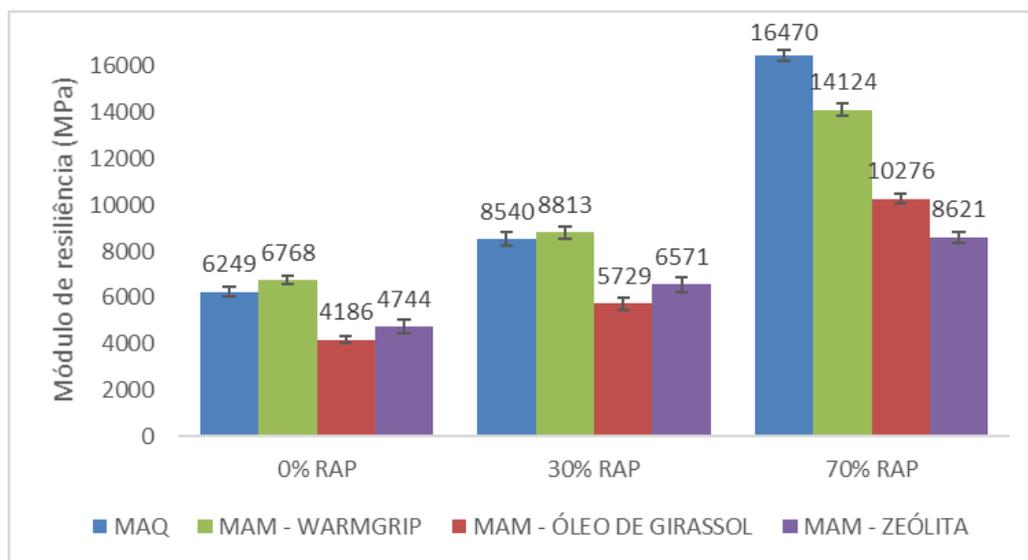
As médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade. Portanto, observa-se que a mistura pura com 70% de RAP apresentou diferenças estatisticamente significantes no valor da RRT, quando comparada com as outras misturas analisadas, e ainda exibiu a menor RRT. Este fato comprova que misturas asfálticas com alto teor de RAP não podem ser utilizadas sem a adição de um agente rejuvenescedor ou de um ligante asfáltico mais macio.

Verifica-se também por meio da Tabela 31 que as misturas com WarmGrip apresentaram as maiores resistências ao dano por umidade. A mistura com WarmGrip e 70% de RAP apresentou um comportamento estatisticamente diferente das demais misturas. Logo, pode-se comprovar as propriedades de adesividade que este aditivo possui.

4.3.3. Módulo de resiliência

A Figura 30 apresenta os resultados dos valores médios do ensaio de módulo de resiliência (MR) a 25°C, referentes à 10% da carga da RT das misturas estudadas nesta pesquisa.

Figura 30 – Resultados do ensaio de MR



Verifica-se a influência do RAP na rigidez das misturas, o módulo de resiliência, assim como a resistência à tração, aumentou com o aumento do teor de RAP nas misturas. O maior aumento da rigidez ocorreu para a mistura com o CAP puro. Esta tendência também foi verificada por Shu *et al.* (2012), onde o módulo de resiliência aumentou com o aumento da proporção de RAP.

Muitos estudos relataram que o uso de RAP afetou positivamente o módulo de resiliência das misturas independente da tecnologia de MAM (BEHBAHANI, AYAZI & MONIRI, 2017; RONDÓN, HERNÁNDEZ & REYES, 2015). Verifica-se também que a adição de ligante do RAP aumentou a rigidez das MARMs. De acordo com Martinho, Picado-Santos & Capitão (2017), esse aumento da rigidez pode tornar as misturas rígidas e quebradiças que afetam negativamente o desempenho em baixas temperaturas das MARMs. Por outro lado, deve-se levar em conta que a taxa de trinca por fadiga e maior suscetibilidade à fratura das misturas asfálticas não é determinada apenas pela rigidez, mas também por parâmetros como valores de módulo resultantes da caracterização viscoelástica, número de vazios, adesão e coesão da mistura.

Fakhri & Ahmadi (2017) verificaram que a 25° C, a adição de 20% e 40% de RAP nas MAMs causa 35,4% e 87,8% de aumento no módulo de resiliência, respectivamente. Segundo esses autores, este resultado pode ser justificado porque a mistura de ligantes novos e antigos formam um ligante mais rígido. Além disso, foi evidenciado que à medida que a temperatura aumentou, a adição de RAP na mistura asfáltica também aumentou o módulo resiliente.

De acordo com Goli & Latifi (2020), as misturas a quente e mornas contendo RAP têm módulo de resiliência mais elevados do que as misturas asfálticas convencionais. Pois, o ligante envelhecido do RAP tem maior rigidez, e a mistura do ligante envelhecido com o ligante virgem que é adicionado para produzir as misturas contendo RAP resulta em um módulo de resiliência mais alto.

As misturas dos ligantes modificados com o WarmGrip mantiveram os valores mais próximos das misturas com o ligante puro. Portanto, o uso do WarmGrip associado à redução da temperatura não apresentou influência nos resultados de rigidez das MARMs. Resultado semelhante foi relatado por Ayazi, Moniri & Barghabany (2017), em que o uso de RAP nas MAMs com Sasobit intensificaram a rigidez das misturas. No entanto, Behbahani, Ayazi & Moniri (2017), revelaram que o uso do aditivo de MAM Zycotherm reduziu a rigidez das misturas MARMs. Além disso, como o apresentado para as misturas modificadas com o WarmGrip desta pesquisa, Behbahani, Ayazi & Moniri (2017) evidenciaram que o Sasobit mais rígido poderia resistir melhor a deformação permanente do que as misturas Zycotherm mais macias.

As misturas nos teores de 30 e 70% de RAP modificadas com óleo de girassol e zeólita natural foram as que apresentaram os módulos mais próximos da mistura de referência. Isso demonstra que a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação desses aditivos de MAMs atuaram de forma positiva diminuindo a rigidez das misturas. Além disso, percebe-se as propriedades rejuvenescedoras do óleo de girassol e da zeólita, pois houve a remobilização do ligante envelhecido durante a reciclagem do RAP, contribuindo para a redução da rigidez do ligante do RAP. Esta redução da rigidez, colabora para que o RAP mesmo em elevadas porcentagens seja incorporado em novas misturas asfálticas e utilizados em camadas de suporte de um pavimento.

Portanto, avaliando apenas os resultados de RT, RRT e MR, são indicados o uso do óleo ou da zeólita em preferência ao Warmgrip para a produção de misturas com elevados teores de RAP, já que esses aditivos reduziram a rigidez das misturas recicladas e apresentaram uma maior capacidade de rejuvenescimento do ligante envelhecido do RAP. Ao contrário do que foi observado para o WarmGrip, pois este apresentou rigidez semelhantes ao de uma mistura reciclada a quente convencional.

A Tabela 32 apresenta a análise de variância (ANOVA) de dois fatores, realizada com nível de significância (α) de 5%, para o ensaio de MR.

Tabela 32 - ANOVA do módulo de resiliência das amostras

	SS	GL	MS	F	p
Teor	3.064352E+08	2	1.532176E+08	2291.48	0.000000
Aditivo	1.119512E+08	3	3.731705E+07	558.10	0.000000
Teor*aditivo	3.772503E+07	6	6.287506E+06	94.03	0.000000
Erro	1.604736E+06	24	6.686400E+04		

Ao analisar os resultados de p ($p < 0,05$), é possível afirmar que a interação entre os fatores teor e aditivo apresentaram diferenças estatisticamente significantes quanto aos parâmetros observados. Logo, a interpretação dos dados da interação tem que predominar sobre os fatores isolados. Assim como no ensaio de RT, também foi realizado o teste Tukey. Os resultados obtidos nessa nova análise estão indicados na Tabela 33.

Tabela 33 - Teste Tukey para a interação dos fatores teor de RAP e tipo de aditivo de MAM (MR)

Tukey teste; variável MR
Grupos homogêneos, alpha = 0.05
Erro: entre MS = 66864, df = 24

Teor (%)	Aditivo	MR	1	2	3	4	5	6	7
0	Óleo de girassol	4186			c				
0	Zeólita	4544			c				
30	Óleo de girassol	5729				d			
0	Pura	6249	a			d			
30	Zeólita	6571	a						
0	WarmGrip	6768	a						
30	Pura	8540		b					
70	Zeólita	8621		b					
30	WarmGrip	8813		b					
70	Óleo de girassol	10276					e		
70	WarmGrip	14124						f	
70	Pura	16470							g

Percebe-se que os módulos de resiliência das misturas com WarmGrip e 0% de RAP e a mistura com zeólita e 30% de RAP, não diferem significativamente da mistura de referência (MQ0). As misturas com 0% de RAP modificadas pelos aditivos de óleo de girassol e zeólita são similares entre si e apresentaram os menores módulos, isto confirma a menor rigidez dessas misturas, assim como ocorreu no ensaio de RT. A mistura pura e as misturas com ligantes modificados com óleo de girassol e WarmGrip, no teor de 70% de RAP, apresentaram

diferenças estatisticamente significantes. Isto indica que a rigidez dessas misturas se comportaram de maneira diferentes.

Verifica-se, portanto, a seguinte tendência para o comportamento dos quatro tipos de misturas analisadas, nos ensaios de RT, RRT e MR: as misturas com o ligante modificado com WarmGrip apresentam, geralmente, desempenho mecânico semelhante ao das misturas com o ligante puro. Já as misturas com ligantes modificados com óleo de girassol e zeólita natural tendem a apresentar comportamento semelhantes.

4.3.4. Vida de fadiga

Nas Figuras 31 a 36 são apresentados os gráficos de vida de fadiga sob duas formas: em termos de diferença de tensões (log-log de N versus $\Delta\sigma$) e em termos de deformação específica (log-log de N versus ϵ_i). Nesses gráficos também são apresentadas as linhas de tendência logarítmicas que foram ajustadas aos resultados (curvas de Wöhler), as quais representam o modelo de fadiga das misturas asfálticas. A partir das equações das linhas de tendências, K1 e n1 e K2 e n2 apresentados no item 3.8.4., bem como seus R², conforme apresentados na Tabela 34.

Figura 31 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP das misturas asfálticas de referências

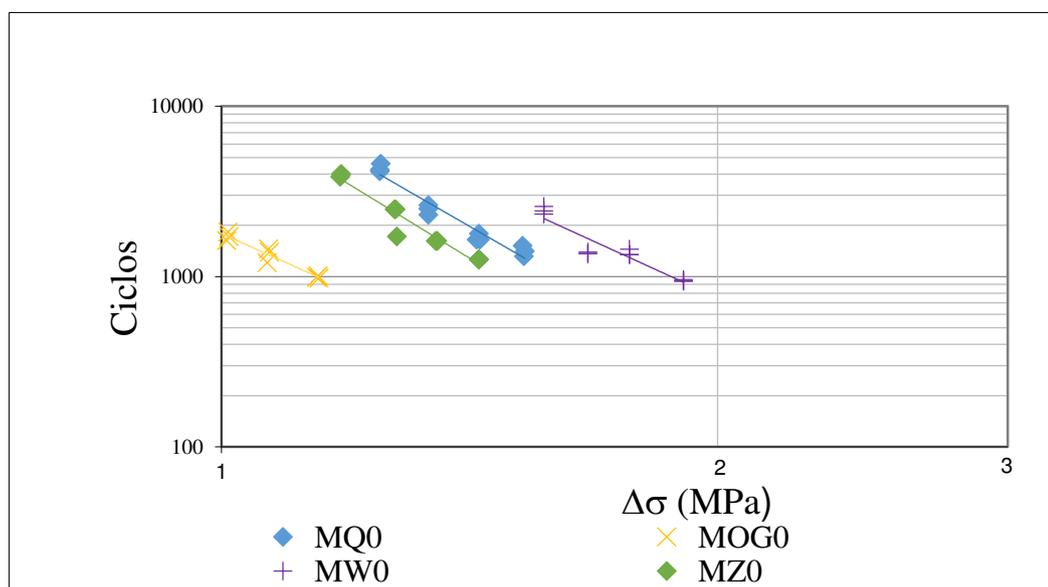


Figura 32 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial das misturas asfálticas de referências

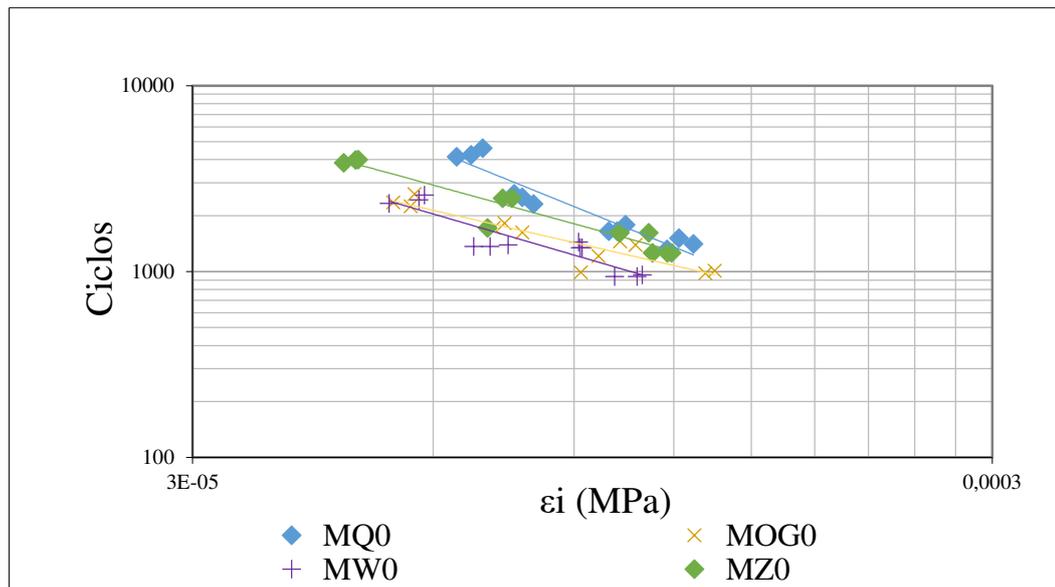


Figura 34 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial das misturas asfálticas com 30% de RAP

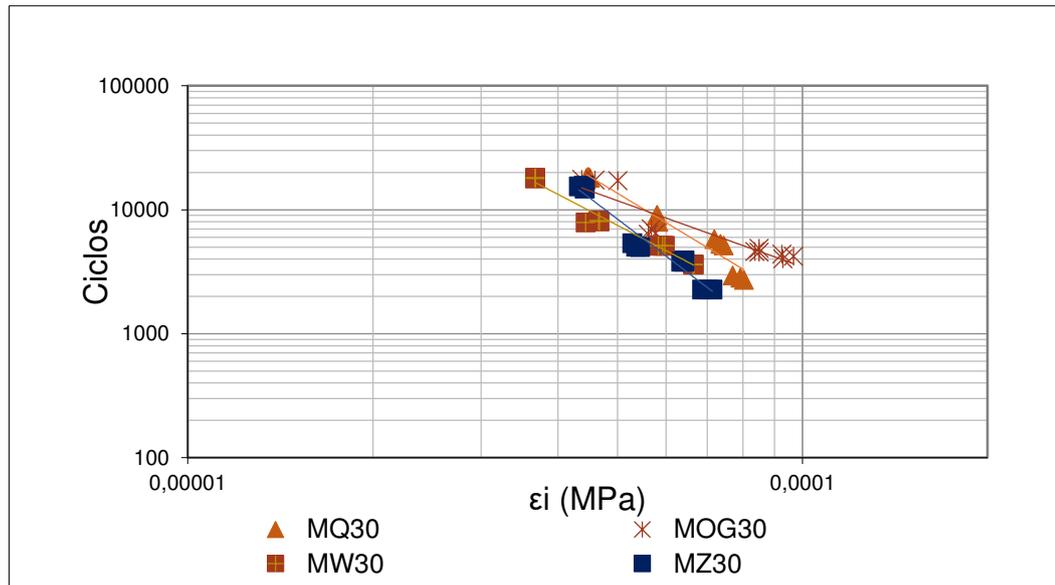


Figura 35 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP das misturas asfálticas com 70% de RAP

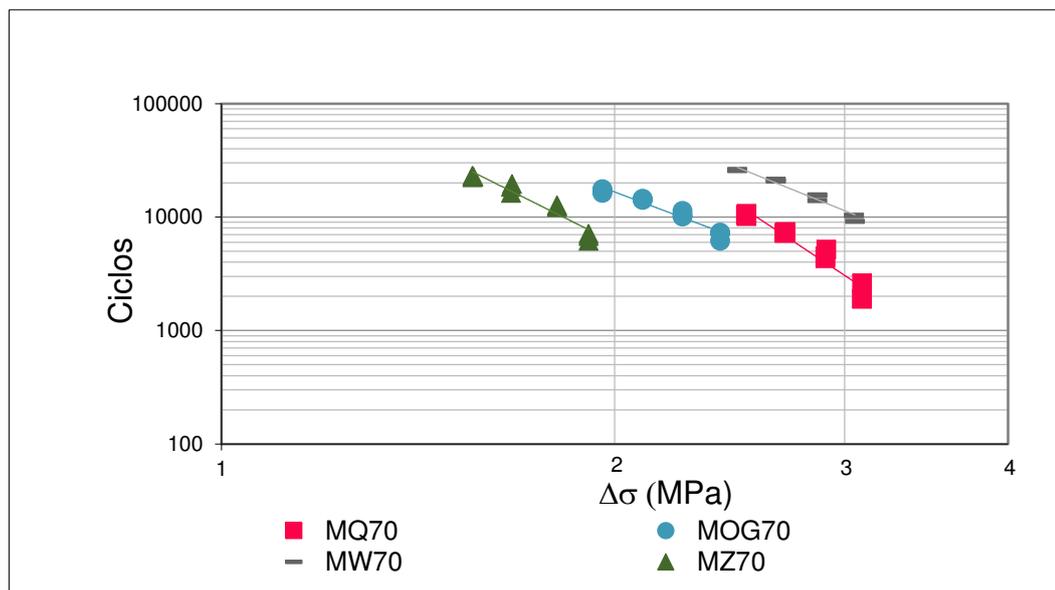


Figura 36 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial das misturas asfálticas com 70% de RAP

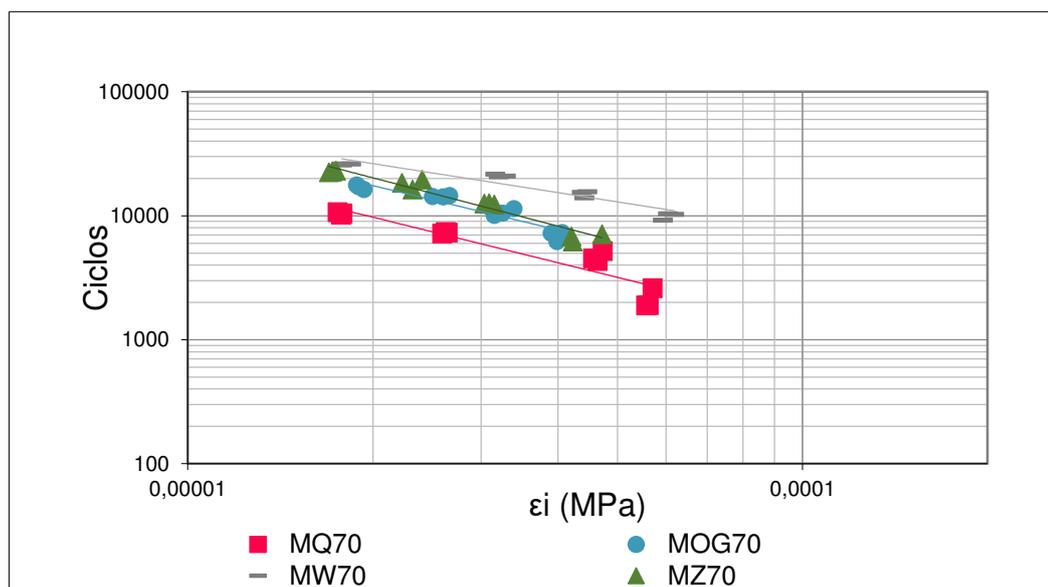


Tabela 34 - Equações características das curvas de vida de fadiga das misturas

Mistura	$\Delta\sigma \times N$			$\epsilon_i \times N$		
	R^2	K_1	n_1	R^2	K_2	n_2
MQ0	0.924	13521	5.558	0.878	3×10^{-4}	1.701
MQ30	0.992	1×10^6	8.877	0.947	2×10^{-9}	2.997
MQ70	0.938	1×10^7	7.639	0.863	0.0182	1.219
MW0	0.875	16020	4.415	0.820	0.0104	1.254
MW30	0.950	3×10^6	7.784	0.973	6×10^{-8}	2.583
MW70	0.967	2×10^6	4.642	0.899	5.9966	0.775
MOG0	0.968	1791	4.357	0.842	0.1473	0.986
MOG30	0.862	51446	6.440	0.830	3×10^{-4}	1.772
MOG70	0.938	335909	4.336	0.887	0.047	1.185
MZ0	0.944	10020	5.929	0.921	0.0306	1.179
MZ30	0.943	257785	8.592	0.953	5×10^{-13}	3.775
MZ70	0.918	315961	5.732	0.940	0.0168	1.294

Na Tabela 34 verifica-se que todas as misturas apresentaram bons coeficientes de determinação e satisfizeram ao preconizado na norma do DNIT183/2018 que especifica um valor mínimo de R^2 igual a 0.80. O modelo que explicou melhor a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média, R^2 mais próximo de 1, foi a MQ30 apresentando o valor de 0.992. Já mistura MW0 exibiu o menor R^2 com o valor de 0.820.

Para o ensaio de vida de fadiga adotado nesta pesquisa, esperava-se que as misturas com maiores valores de rigidez apresentem linhas de tendência posicionadas acima dos resultados encontrados para as misturas que apresentem rigidezes menores. Observa-se por meio das análises da Figura 31, Figura 33 e Figura 35 que o número de ciclos necessários para uma dada deformação aumentou a medida em que o teor de incorporação de RAP também aumentou. Este comportamento pode ser observado tanto para as misturas recicladas a quente quanto para as misturas recicladas modificadas com os aditivos de MAMs. Portanto, a rigidez das misturas está diretamente associada ao desempenho à fadiga.

De acordo com os valores das diferenças de tensões, a saber: nível baixo = 1,0 MPa, nível intermediário = 1,5 MPa e nível elevado = 2,0 MPa, para as curvas de Wöhler analisadas em trechos. No nível baixo de diferença de tensões, as misturas MQ0 e MZ0 apresentaram maior resistência à fadiga. No nível intermediário de diferença de tensões as misturas MQ30 e MZ70 apresentaram maiores resistências à fadiga. No nível elevado de diferença de tensões as misturas MW30, MOG70 e MW70 apresentaram maior resistência à fadiga. Este resultado indica que no nível elevado de diferenças de tensão, as misturas com 30 e 70% de RAP modificadas pelos aditivos de WarmGrip e óleo de girassol suportaram um maior número de ciclos até a ruptura.

As misturas asfálticas recicladas com maior rigidez apresentaram uma maior resistência à fadiga. O elevado teor de RAP proporcionou aumento da rigidez das misturas asfálticas e conseqüentemente aumento das resistências às deformações permanentes, tornando as misturas mais adequadas para serem utilizadas nas categorias de tráfego pesado de veículos. Esses resultados se apresentam diferente do esperado, uma vez que uma menor rigidez das misturas deveria ser mais favorável para uma maior resistência à fadiga.

Rahman *et al.* (2021b) verificaram que a incorporação de RAP aumentou a rigidez de misturas asfálticas que resultou em uma menor resistência à fadiga. Além disso, as misturas com granulometrias mais finas evidenciaram uma maior resistência à fissuração do que misturas com granulometrias mais grossas, devido as diferenças nos mecanismos de propagação da fenda. Assim como o observado nesta pesquisa, para misturas mais finas, as trincas se propagaram por meio dos agregados, enquanto que para misturas mais grossas as trincas se propagaram na sua maioria por meio do mastic. Portanto, sabendo que as misturas com alto teor de RAP tendem a apresentar uma granulometria mais fina, estas podem ter influenciado no aumento da resistência da vida de fadiga das misturas recicladas estudadas nesta pesquisa.

As misturas MOG30 e MZ30 apresentaram o comportamento mais próximo da mistura de referência (MQ0), com relação ao desenvolvimento de falha por fadiga. Esse comportamento era esperado, pois as misturas recicladas modificadas com os aditivos de óleo de girassol e zeólita natural apresentaram redução da rigidez das misturas no ensaio de resistência à tração e módulo de resiliência.

De acordo com a Equação 16 a deformação resiliente inicial da mistura é inversamente proporcional ao seu módulo de resiliência. Analisando esses resultados por trechos das curvas de Wöhler, conclui-se que, para deformações resilientes baixas, as misturas MW70, MZ70 e MOG70 exibem melhor desempenho. Conforme ocorre o aumento das deformações resilientes, as misturas com 30% de RAP tendem a suportar um maior número de aplicações de carga (N), seguidas das misturas sem adição de RAP. Estes resultados estão de acordo com o módulo de resiliência das misturas asfálticas recicladas estudadas, já que as misturas contendo 70% de RAP apresentaram os valores de MR mais elevados, seguidos das misturas recicladas com 30% de RAP e finalmente as misturas asfálticas sem adição de RAP.

Nesta pesquisa, os aditivos de MAMs atuaram no comportamento das misturas asfálticas recicladas como agentes rejuvenescedores do ligante asfáltico oxidado do RAP. Esses aditivos melhoraram o desempenho à fadiga das misturas proporcionando a restauração da viscoelasticidade e propriedades de craqueamento térmico do ligante envelhecido. Apesar da melhora que o WarmGrip, o óleo de girassol e a zeólita proporcionaram na resistência à fadiga, as misturas com alto teor de RAP se apresentaram mais rígidas que a mistura de referência.

Lu & Saleh (2016) apresentaram resultados semelhantes aos desta pesquisa, de acordo com esses autores o aumento na proporção RAP melhorou a rigidez à flexão, porém reduziu o número de ciclos até a falha por fadiga para as misturas com Evotherm e Sylvaroad. O RAP tornou a MAM mais rígida, porém mais frágil. Outra razão para a redução da vida de fadiga das misturas pode ter sido o teor de ligante. Já que o teor ótimo de ligante da MAM e da MAM-RAP foi menor que o da mistura a quente, e o teor ótimo de ligante das misturas MAM-RAP reduziu com o aumento do teor de RAP. Pois, a medida que o teor de ligante aumenta, a espessura do filme ligante entre os agregados também aumenta, reduzindo a tensão no filme ligante e conseqüentemente possibilitando o aumento da vida de fadiga.

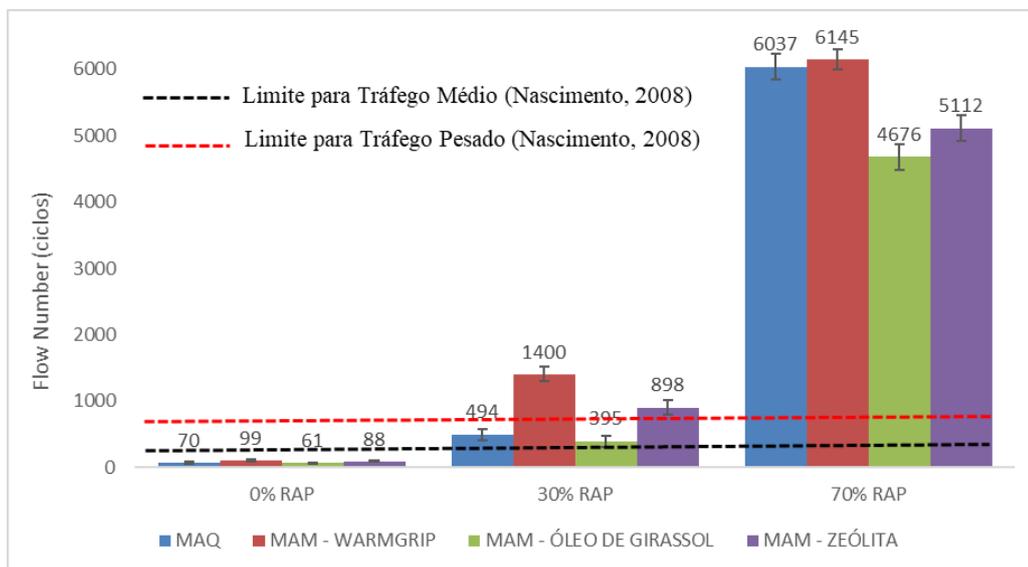
Frigio *et al.* (2016) compararam diretamente o comportamento da fadiga em misturas recicladas com a utilização de aditivos de MAM, calcularam o valor de deformação horizontal

relacionado a um número alvo de ciclos de 10^5 (selecionado como vida de fadiga alvo), considerando representativo da deformação prevista após um nível de tráfego extenso. Os resultados obtidos para todas as MARMs e para a MARQ de referência foram muito semelhantes. Assim, a menor rigidez das MAMs envelhecidas a longo prazo em comparação com a mistura produzida à temperatura padrão não ofereceu nenhum benefício em termos de resistência geral à fadiga. Ao mesmo tempo, temperaturas de usinagem mais baixas não implicaram em efeitos prejudiciais em termos de desempenho de fadiga a longo prazo.

4.3.5. Resistência à deformação permanente

A Figura 37 apresenta os valores médios do *Flow Number* (FN) para as misturas asfálticas estudadas.

Figura 37 - Valores do flow number obtidos pelo ensaio uniaxial de carga repetida



Por meio da análise do ensaio de FN é possível afirmar que as misturas se comportaram de maneira similar quanto à influência do teor de fresado, pode-se constatar que o incremento desse material proporcionou um ganho importante na resistência à deformação permanente. Bohn *et al.* (2020), também verificaram essa influência que o teor de fresado exerce na mistura asfáltica. De acordo com esses autores, existe a possibilidade de redução dos custos na aquisição

de ligantes modificados por polímeros, geralmente utilizados para melhorar a resistência à deformação permanente, para produção de novas misturas utilizando-se apenas uma mistura com ligante convencional incorporada com um percentual de 50% de RAP.

West, Willis & Marasteanu (2013) também relataram que altos teores de RAP aumentaram substancialmente o módulo dinâmico das misturas asfálticas, bem como sua resistência a deformação permanente medida pelo teste de Flow Number. Diante disso, esses autores observaram que “um teste de deformação permanente para misturas de alto teor de RAP parece desnecessário, a menos que um grau mais suave de ligante virgem ou um agente rejuvenescedor seja usado. Segundo o Projeto NCHRP Report 927 (2020), que analisou formas de utilização de agentes rejuvenescedores para facilitar misturas asfálticas recicladas com altos teores de RAP e RAS (Telhas de asfalto recicladas), a resistência a deformação permanente de misturas com alto teor de RAP e RAS não é uma preocupação, a menos que doses mais altas de agentes rejuvenescedores sejam utilizados. Portanto, para misturas asfálticas recicladas que utilizam agentes rejuvenescedores é importante garantir que uma linha de base de resistência a deformação permanente não seja comprometida (ZHOU *et al.* 2019).

Nascimento (2008) estipulou valores mínimos limites para tráfego médio e pesado, de 300 e 750 ciclos, respectivamente. De acordo com esses parâmetros, percebe-se que as misturas asfálticas com CAP 50/70 puro e com ligantes modificados com os aditivos de MAMs obtiveram valores inferiores a 300 ciclos. Após a incorporação de 30% de RAP nas misturas todas elas passaram a se enquadrar em pelo menos em tráfego médio ($300 < FN < 750$), já as MAMs com 30% de RAP e com os aditivos WarmGrip e zeólita natural apresentaram valor superior a 750, podendo serem utilizadas pra rodovias com tráfego pesado. Todas as misturas com 70% de RAP se encaixam dentro do limite para tráfego pesado ($FN > 750$).

As misturas com 70% de RAP e com os ligantes modificados por óleo de girassol e zeólita natural apresentaram redução da rigidez, em comparação com a MAQ e 70% de RAP. Desse modo, esses aditivos atuaram como agentes rejuvenescedores do ligante envelhecido do RAP, ou seja, elevados percentuais de RAP pôde ser utilizado nas misturas asfálticas devido aos aditivos de MAMs terem tornado o ligante asfáltico mais macio.

Segundo Chen *et al.* (2021), as MAMs com adição de RAP promovem o aumento do flow number das misturas, corroborando com os resultados apresentados neste trabalho. Nesse contexto, pode-se indicar que a influência do teor de ligante envelhecido do RAP torna as misturas mais rígidas e, conseqüentemente, menos suscetíveis a sofrerem deformação plástica.

Além disso, de acordo com a literatura (BOHN *et al.*, 2020; LU & SALEH, 2016; RODEZNO *et al.*, 2015) as misturas asfálticas recicladas mornas apresentam valores de FN menores que as misturas convencionais. Neste trabalho, considerando a mistura a quente com 70% RAP de referência e analisando o efeito dos aditivos de MAMs nas misturas recicladas observa-se os seguintes resultados: o aditivo de óleo de girassol apresentou uma redução de 21,24%, a mistura com zeólita apresentou uma redução de 13,9%. No entanto, a mistura com o WarmGrip apresentou um pequeno aumento do FN de 3,5%, mas considerando o desvio-padrão da amostra esse aumento é considerado desprezível.

Resultado semelhante foi apresentado por Kim *et al.* (2017), onde as classificações para a resistência a deformação permanente do mais resistente ao menos resistente foram as misturas com 50% de RAP, 15% de RAP, 50% de RAP com um ligante macio e a mistura de referência com 0% de RAP. Portanto, os resultados indicaram que a adição de RAP melhorou a resistência a deformação permanente. A mistura de 0% RAP apresentou um nível de resistência semelhante ao da mistura de 50% RAP com um ligante macio. Este estudo testifica que o uso de ligante envelhecido do RAP com um alto PG, especialmente para misturas com alto teor de RAP, pode ser compensado com a utilização de um grau inferior de um ligante virgem.

Diante disso, é importante realizar um estudo dos aditivos de MAMs utilizados como rejuvenescedores para misturas recicladas. Pois, apesar do óleo de girassol e a zeólita natural terem reduzido a rigidez das misturas recicladas com alto teor de RAP, o WarmGrip não apresentou essa mesma tendência de redução da rigidez quando comparado com a mistura de referência. Além disso, de acordo com Zhang & Bahia (2021), apesar do alto de RAP/RAS ter melhorado a resistência a deformação permanente e a suscetibilidade à umidade em comparação com a mistura de controle, alguns dos agentes rejuvenescedores utilizados, mostraram um aumento preocupante no potencial de suscetibilidade à umidade das misturas com alto teor de RAP/RAS. A Tabela 35 apresenta a análise de variância (ANOVA) de dois fatores, realizada com nível de significância (α) de 5%, para o ensaio de FN.

Tabela 35 - ANOVA da resistência a deformação permanente das amostras

	SS	GL	MS	F	p
Teor	207456252	2	103728126	6112.671	0.000000
Aditivo	3284399	3	1094800	64.516	0.000000
Teor*aditivo	3202556	6	533759	31.454	0.000000
Erro	407265	24	16969		

Ao analisar os resultados de p, presentes nas tabelas, é possível afirmar que as composições apresentaram diferenças estatisticamente significantes quanto aos parâmetros observados. Logo, o comportamento desta variável (FN) é indicado por meio da interação dos fatores teores de RAP e tipo de aditivo de MAM. Assim como no ensaio de RT, foi realizado o teste Tukey. Os resultados obtidos nessa nova análise estão indicados na Tabela 36.

Tabela 36 - Teste Tukey para a interação dos fatores teor de RAP e tipo de aditivo de MAM (FN)

Tukey teste; variável FN
Grupos homogêneos, alpha = 0.05
Erro: entre MS = 16969, df = 24

Teor (%)	Aditivo	FN	1	2	3	4	5	6	7
0	Óleo de girassol	61	a						
0	Pura	70	a						
0	Zeólita	88	a						
0	WarmGrip	99	a						
30	Óleo de girassol	395	a	b					
30	Pura	494		b					
30	Zeólita	898				d			
30	WarmGrip	1400					e		
70	Óleo de girassol	4676						f	
70	Zeólita	5112							g
70	Pura	6037			c				
70	WarmGrip	6145			c				

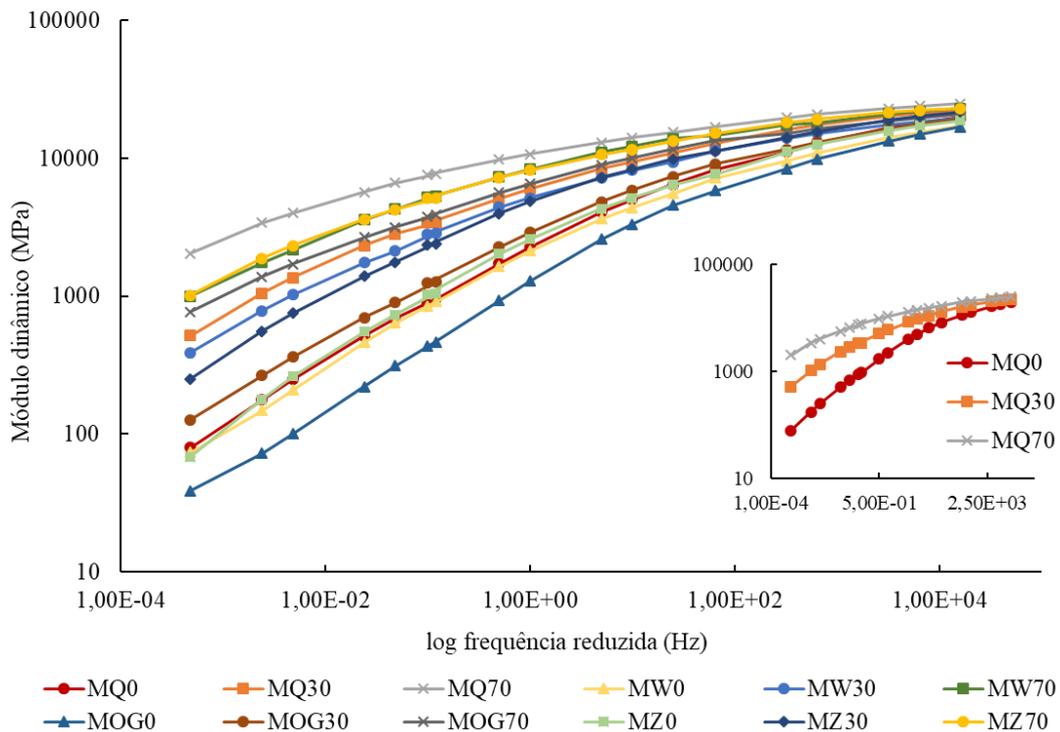
Percebe-se por meio da Tabela 36 que a mistura pura no teor de 0% RAP não apresentou diferenças estatisticamente significantes quando comparada com outras MAMs neste mesmo teor de RAP. Este fato indica que os aditivos de MAMs analisados não apresentaram influência na resistência à deformação permanente dessas misturas. As misturas puras e modificadas com óleo de girassol no teor de 30% de RAP apresentaram semelhanças, enquanto que as outras misturas neste mesmo teor diferem entre si. Verifica-se também que as misturas com 30 e 70% de RAP apresentaram aumento nos resultados de FN, isto demonstra a influência que o teor de RAP exerce na resistência a deformação permanente das misturas.

Além disso, verifica-se que a resistência à deformação permanente das misturas com 70% de RAP pura e modificadas pelo WarmGrip não apresentaram diferenças estatisticamente significantes e ainda exibiram os maiores resultados de FN. Este resultado indica que o aditivo WarmGrip não proporcionou um rejuvenescimento das propriedades das misturas recicladas com alto teor de RAP.

4.3.6. Módulo dinâmico

Na Figura 38 apresentam-se as curvas mestras determinadas no ensaio de módulo dinâmico em temperatura de referência de 20°C, utilizando três temperaturas (4, 20 e 40°C) e seis frequências (0.1; 0.5; 1; 5; 10 e 25Hz), são chamadas isothermas de módulo dinâmico.

Figura 38 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico para misturas asfálticas na temperatura de referência de 20°C



O módulo dinâmico pode ser designado como a máxima tensão para a amplitude de deformação aplicada, refletindo a rigidez dos corpos de prova avaliados para as misturas asfálticas estudadas, por temperatura de ensaio. Devido à susceptibilidade das misturas asfálticas, associada ao comportamento viscoelástico do ligante, a mesma responde de forma diferente a carregamentos estáticos e dinâmicos. Sendo assim, para carregamentos lentos as respostas são mais viscosas, e para carregamentos rápidos as respostas são mais elásticas, conseqüentemente, o módulo dinâmico tende a crescer para frequências maiores. Para as misturas avaliadas nesta pesquisa, observa-se que à medida em que se diminui a temperatura de ensaio e aumenta a frequência, o módulo dinâmico se eleva. Comportamento semelhante foi

observado por Bohn *et al.* (2017) e Bordin *et al.* (2018), portanto, conforme aumentou a frequência, a rigidez das misturas também aumentou.

Por meio das isotermas é possível verificar que os valores, aumentam com a adição de material fresado na mistura, sendo, ainda, os menores valores encontrados para as misturas sem RAP, o que corrobora com os resultados obtidos no ensaio de MR. Portanto, conforme elevou o teor de RAP também foi elevado a rigidez das misturas. Esta mesma tendência de variação foi observada em todas as MARMs estudadas.

As MAMs sem o RAP apresentaram módulos muito similares quando comparadas com a MQ0. Já as misturas nos teores de 30 e 70% de RAP apresentaram uma tendência diferente, com módulos maiores que a mistura de referência. O maior valor de módulo dinâmico encontrado foi para a MQ70. Os resultados desta pesquisa corroboram com os estudos realizados por Kim *et al.* (2017), onde, em geral, a adição de aditivos MAMs não pareceu alterar significativamente os valores do módulo dinâmico em relação ao da mistura de referência. Porém, a adição de 15% de RAP à mistura proporcionou o aumento da rigidez. Esse aumento da rigidez, tornou a mistura mais quebradiça do que uma mistura que não tenha RAP. Esse efeito torna-se mais significativo quando a diferença nos PGs do ligante RAP e ligante virgem torna-se maior.

O aumento da rigidez das misturas com adição de RAP está relacionado ao aumento da viscosidade do ligante oxidado. As MARMs apresentaram uma redução do MD quando comparadas com as MARQs de mesmo teor de RAP, sendo o menor valor para as misturas modificadas com o óleo de girassol, que apresentou a maior redução da viscosidade do ligante. Logo, percebe-se que os aditivos de MAMs atuaram rejuvenescendo o ligante asfáltico do RAP diminuindo assim os módulos das misturas. Além disso, verifica-se que a redução das temperaturas de usinagem e compactação que os aditivos de MAMs proporcionaram não prejudicaram a interação do ligante envelhecido do RAP com o ligante novo.

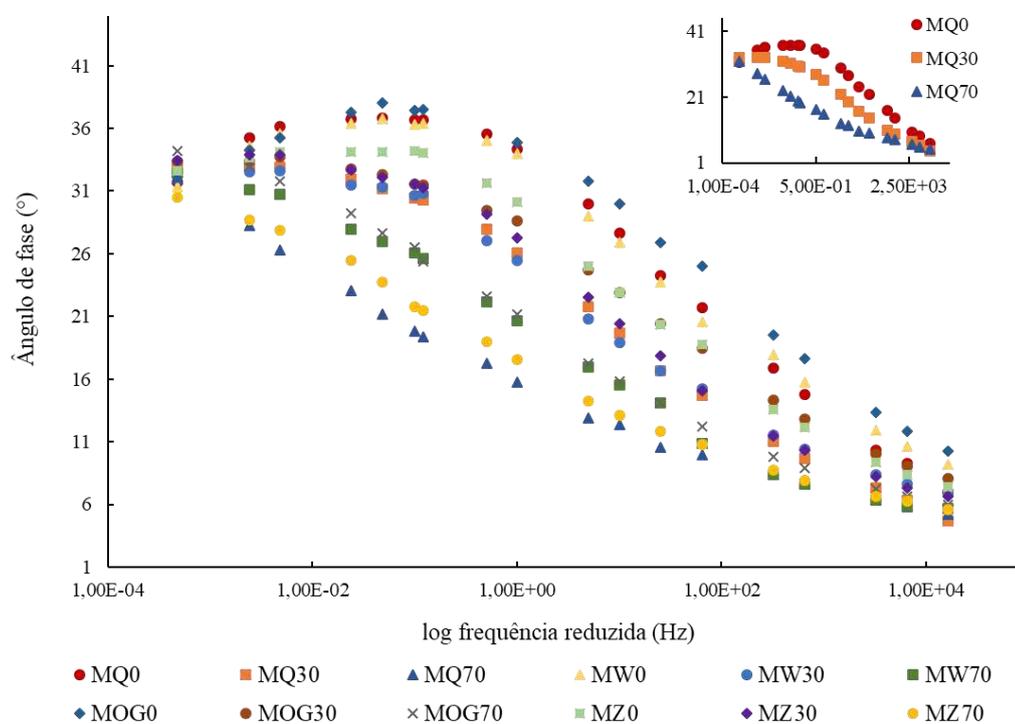
Segundo Zhang, Huchet, & Hobbs (2019), geralmente, a temperatura de mistura mais alta e os tempos de mistura mais longos são benéficos para produzir uma mistura com RAP mais homogênea, porque a temperatura mais alta e o tempo de mistura suficiente são essenciais para a ativação do ligante do RAP, quebra de aglomerados de RAP e mistura homogênea entre o ligante do RAP e ligantes virgens. Ainda de acordo com esses autores, uma mistura de RAP homogênea tende a ter maior valor de rigidez, melhor resistência ao trincamento por fadiga, e melhor estabilidade ao dano por umidade. Logo, para atingir o mesmo nível de homogeneidade

de mistura, uma mistura RAP que é produzida a uma temperatura de produção mais baixa requer um tempo de mistura maior. No entanto, como verificado nesta pesquisa, a redução das temperaturas de usinagem das MARMs, e a produção destas no mesmo tempo que as MARQs, não prejudicaram a ativação do ligante do RAP, o aumento da rigidez das misturas e a resistência ao dano por umidade.

Tarbox & Daniel (2012) avaliaram o envelhecimento a longo prazo em misturas contendo de 0% a 40% de RAP. Os resultados de módulo dinâmico indicaram que o efeito de endurecimento devido ao envelhecimento de misturas com RAP é menor que em misturas sem RAP. Além disso, o envelhecimento reduziu o ângulo de fase das misturas asfálticas, tornando o comportamento mais elástico. Portanto, a longo prazo as misturas com RAP apresentam melhor comportamento.

A Figura 39 apresenta os ângulos de fase referentes ao log das frequências reduzidas de carregamento de todas as misturas asfálticas analisadas nesse estudo, com base na temperatura de referência da curva de 20°C, que foi utilizada para aplicação do fator de correção. O ângulo de fase pode ser definido como o intervalo de tempo entre a tensão aplicada e a tensão de resposta, este parâmetro representa a viscoelasticidade das misturas asfálticas. Para materiais puramente elásticos o ângulo de fase (φ) tem valor de 0°, e materiais puramente viscosos têm $\varphi=90^\circ$.

Figura 39 - Curvas mestras de Ângulo de fase para misturas asfálticas na temperatura de referência de 20°C



Ao se analisar as curvas mestras de ângulo de fase, nota-se que os menores valores, em quase todo o espectro de frequência, são para as misturas com 70% de RAP, misturas estas que apresentaram ter maior rigidez pela Figura 38. De maneira geral, as misturas com o material fresado exibem uma maior elasticidade e resistência à deformação permanente. As misturas recicladas mornas e convencionais se comportaram de maneira equivalente, no qual verificou-se a tendência que conforme aumentou o teor de RAP maior foi a parcela elástica das misturas. Essas misturas apresentaram comportamento diferente do esperado, visto que o ligante do RAP tende a deixar as misturas mais rígidas.

Centofante (2016) apresentou resultado semelhante ao desta pesquisa, onde foi possível verificar que o ângulo de fase diminuiu, à temperatura constante, à medida em que se aumenta a frequência de carregamento. Segundo essa autora, as misturas contendo fresado, ou seja, mais rígidas, apresentaram os menores valores, já que dissipam menos energia viscosa ao longo dos carregamentos.

Segundo Nemati *et al.* (2020) antes do pico do ângulo de fase, a combinação de baixas frequências e altas temperaturas faz com que o ligante flua para os vazios de ar da mistura, e um filme fino de asfalto é depositado ao redor do agregado. O ligante não tem capacidade

elástica, portanto o comportamento da mistura receba forte influência do esqueleto mineral . Sendo assim, o comportamento desta porção da curva mestre do ângulo de fase é controlada pela rigidez do agregado e fluxo do ligante asfáltico. Em baixas temperaturas o ângulo de fase diminui, sugerindo que a maior parte da energia é dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, portanto, a relação do ângulo de fase com baixas temperaturas e altas frequências é atribuída ao ligante, seguindo a tendência do mesmo. Portanto, as misturas contendo os altos teores de RAP tiveram uma maior influência dos agregados oriundos da granulometria do RAP e apresentaram uma maior elasticidade que os agregados virgens utilizados na mistura de referência.

A mistura de referência (MQ0) apresenta menor rigidez que que uma típica mistura contendo RAP, a incorporação dos aditivos de MAMs utilizados neste trabalho atuaram restaurando a viscoelasticidade dos ligantes presentes nas misturas asfálticas recicladas. Ou seja, apresentaram ângulos de fase mais próximos da mistura de referência. Sendo o melhor comportamento para as misturas com o ligante modificado com o óleo de girassol. Esse comportamento corrobora com os resultados obtidos nos ensaios reológicos dos ligantes modificados. Onde, o ligante asfáltico modificado com o óleo de girassol apresentou a maior redução de viscosidade apontando uma maior redução da rigidez, dentre as amostras analisadas.

No estudo de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero, Bohn *et al.* (2020) encontraram essa mesma tendência de aumento das elasticidades nas misturas modificadas com RAP. Segundo esses autores, os menores valores de ângulo de fase, em quase todo o espectro de frequência, foram apresentados pelas misturas com 50% de RAP, de ambos os ligantes. Ainda, nas frequências mais baixas as misturas modificadas por polímero CAM 60/85 apresentaram melhor comportamento, com menor ângulo de fase, ou seja, são mais elásticas mesmo em condições de altas temperaturas e, possivelmente, apresentam maior resistência às deformações permanentes. Quanto ao teor de fresado, observou-se também que as misturas apresentaram um visível aumento da parcela elástica quando utilizado RAP, em conjunto com ligante modificado por polímero.

Wang *et al.* (2021) realizaram estudos reológicos em seis tipos de ligantes asfálticos, podendo-se citar: dois ligantes virgens 50/70, 160/220, e quatro ligantes extraídos do RAP e das misturas WMA-1 (projetadas com 40% de RAP e 0,3% de Sasobit), WMA-1 (envelhecidas artificialmente a longo prazo), e as misturas WMA-2 (projetadas com 40% de RAP recicladas e 0,2% de Sasobit). Verificou-se que os ligantes do RAP e WMA-1 envelhecidos por

35 h PAV se localizaram na região de alto módulo de complexo e baixo ângulo de fase, enquanto o ligante 160/220 apresentou comportamento oposto. Uma tendência semelhante à do ligante virgem 50/70 foi observada para os dois ligantes extraídos das MAMs. Isto indica que a combinação do ligante macio 160/220, ligante do RAP e aditivos de MAMs foi capaz de alcançar propriedades de misturas semelhantes ao material virgem.

Os resultados dos ensaios mecânicos de vida de fadiga, resistência à deformação permanente e módulo dinâmico indicam o comportamento benéfico dos aditivos de óleo de girassol e da zeolita em preferência ao Warmgrip para a produção de misturas com elevados teores de RAP. Pois, assim como observado nos resultados de RT, RRT e MR, esses aditivos proporcionaram maior redução da rigidez das misturas recicladas. No entanto, o WarmGrip resistiu ao maior número de ciclos de fadiga até a falha.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste tópico serão apresentadas as conclusões obtidas por meio desta pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras envolvendo o mesmo objeto de estudo.

5.1. Considerações finais

O estudo do percentual de ativação do ligante do RAP nas misturas asfálticas recicladas revelou que projetar misturas asfálticas recicladas com a suposição de ativação total do ligante do RAP, pode resultar em misturas com teor insuficiente de ligante e mais suscetíveis a danos por umidade. Portanto, esses resultados indicam que os projetistas devem evitar a consideração de que ocorre 100% de ativação do ligante do RAP, visto que o cenário de ativação parcial é mais realista ($0% < DoA < 100%$).

Os resultados baseados nas reologias empíricas e fundamentais apontaram para o efeito rejuvenescedor dos aditivos de MAMs incorporados no ligante asfáltico. Podendo-se destacar o óleo de girassol que proporcionou reduções da viscosidade do ligante e da temperatura máxima de PG. Além disso, o óleo de girassol proporcionou menores valores de Jnr em comparação ao ligante 50/70, o que possibilitou a influência benéfica desse aditivo de MAMs no desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas.

A elevação do teor de RAP ocasionou aumento da rigidez das misturas asfálticas recicladas, esse fato pode ser explicado devido ao acréscimo do teor de ligante oxidado oriundo do RAP. Ao mesmo tempo, a incorporação do RAP proporcionou um incremento da resitência ao dano por umidade induzida, vida de fadiga e resistência à deformação permanente das misturas asfálticas.

Considerando o método de produção de MAM (orgânico, químico e asfalto espumado) mais adequado para compor misturas asfálticas recicladas, observou-se que tanto o aditivo orgânico (óleo de graxol) quanto o aditivo da tecnologia de asfalto espumado (zeólita natural) possibilitaram uma redução da rigidez das misturas asfálticas recicladas, atuando assim como rejuvenescedores do ligante do RAP. No entanto, o aditivo químico (WarmGrip) atuou melhorando a adesividade das misturas asfálticas, mesmo nas misturas com alto teor de RAP, prolongando a vida útil do pavimento, protegendo-o contra desgaste e danos causados pela

umidade. Além disso, esse aditivo também pode ser empregado como um aditivo melhorador de adesividade de misturas asfálticas.

As misturas asfálticas recicladas apresentaram melhor desempenho mecânico com relação ao aumento da resistência à tração indireta, dano por umidade induzida, resistência de deformação permanente e vida de fadiga.

5.2. Conclusão

De maneira geral, as misturas asfálticas recicladas com até 30% de RAP proporcionaram melhor desempenho mecânico em todos os ensaios realizados em relação à mistura asfáltica de referência. O óleo de girassol e a zeólita natural se apresentaram como bons agentes rejuvenescedores do ligante do RAP. Pois, esses aditivos permitiram a incorporação de até 70% de RAP nas misturas asfálticas sem prejuízos ao desempenho mecânico. Portanto, este estudo experimental fornece evidências sobre a possível aplicação de maiores taxas de RAP reciclado combinado com as tecnologias de MAMs. Ao mesmo tempo, deve-se levar em consideração que apenas misturas asfálticas recicladas foram preparadas e testadas em ambiente de laboratório. Materiais adicionais e trabalhos de experimentação expandidos precisam ser avaliados e executados, respectivamente, para apoiar ainda mais as descobertas atuais com o objetivo final de liderar a pesquisa em direção à conquista de infraestrutura verde e sustentável.

5.3. Sugestões a pesquisas futuras

Com a finalidade de aprofundar os resultados encontrados nessa pesquisa, propõe-se para trabalhos futuros:

- Utilizar a técnica de cromatografia SARA nos aditivos de MAMs para quantificar as propriedades de rejuvenescimento desses aditivos nas misturas com o ligante envelhecido do RAP;
- Realizar o ensaio de fadiga à tração direta cíclica com aplicação do modelo S-VECD nas misturas asfálticas recicladas para obter a curva de dano e avaliar o desempenho a fadiga independente das condições de ensaio;

- Realizar um estudo ambiental com as misturas asfálticas recicladas por meio de um indicador de sustentabilidade ambiental;
- Comparar as propriedades do ligante virgem utilizado nas misturas asfálticas com amostras de ligantes extraídas das misturas asfálticas recicladas quentes e das misturas asfálticas recicladas mornas com diferentes percentuais de material fresado em suas composições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABED, A.; THOM, N.; LO PRESTI, D. (2018). *Design Considerations of High RAP-Content Asphalt Produced at Reduced Temperatures*. *Materials and Structures*, 51(4). DOI: 10.1617/s11527-018-1220-1

ABSON, G. (1933). *Method and Apparatus for the Recovery of Asphalt*. *Proceedings from ASTM II*, 33, pp. 704–714.

ABUHASSAN, Y., ALIN, M., IQBAL, T., NAZZAL, M., & ABBAS, A. R. (2019). *Effect of Extraction Solvents on Rheological Properties of Recovered Asphalt Binders*. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 145(1), 04018064. DOI:10.1061/jpeodx.0000096

ALMEIDA-COSTA, A., & BENTA, A. (2016). *Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt*. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2308–2317. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.077

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 283 (2014): *Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage*. Washington, D. C. 2018.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO TP 79/16. *Standard Method of Test For Determining The Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. Washington, D.C., 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 7653:2018. *Standard Test Method for Determination of Trace Gaseous Contaminants in Hydrogen Fuel by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy*. Estados Unidos.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 2041/D2041M – 19 (2019). *Método de teste padrão para densidade e densidade específica máxima teórica de misturas de asfalto*. EUA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 4402/D4402M – 15 (2015). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. EUA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 2872 (2004). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. EUA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 6373-16 (2016). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D4887/D4887M-11 (2016). *Standard Practice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Asphalt Materials*, West Conshohocken, PA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D7313 (2013). *Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixes Using the Disc-Shaped Compact Tension Geometry*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

AMONI, B. C. (2019). *Desenvolvimento de Um Método de Síntese de Zeólita Tipo A Utilizando Cinzas Volantes de Carvão: Avaliação do Uso Como Aditivo de Mistura Asfáltica Morna*. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

ARRA, *Basic Asphalt Recycling Manual, Asphalt Recycling & Reclaiming Association, Annapolis, MD, USA, 2nd edition, 2015.*

ARRUDA, S. M. (2021). *Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, Brasil.

AREGA, Z. A.; BHASIN, A.; LI, W.; NEWCOMB, D. E.; ARAMBULA, E. (2014). *Characteristics of asphalt binders foamed in the laboratory to produce warm mix asphalt*. J. Mater. Civ. Eng. 26. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943- 5533.0000981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916 (2021). *Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro, Brasil.

AYAZI, M. J., MONIRI, A., & BARGHABANY, P. (2017). *Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives*. *Petroleum Science and Technology*, 35(9), 890–895. DOI: 10.1080/10916466.2017.1290655

BAGHAEE MOGHADDAM, T., & BAAJ, H. (2016). *The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review*. Construction and Building Materials, 114, 805–816. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.0

BARMAN, M., GHABCHI, R., SINGH, D., ZAMAN, M., & COMMURI, S. (2018). *An alternative analysis of indirect tensile test results for evaluating fatigue characteristics of asphalt mixes*. Construction and Building Materials, 166, 204–213.

BEHBAHANI, H., AYAZI, M. J., & MONIRI, A. (2017). *Laboratory investigation of rutting performance of warm mix asphalt containing high content of reclaimed asphalt pavement*. Petroleum Science and Technology, 35(15), 1556–1561. DOI: 10.1080/10916466.2017.1316738

BEHNOOD, A. (2020). *A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties*. Journal of Cleaner Production, 120817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120817

BEHNOOD, A., & OLEK, J. (2017). *Stress-dependent behavior and rutting resistance of modified asphalt binders: An MSCR approach*. Construction and Building Materials, 157, 635-646. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.138

BOHN, K. A. (2017). *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero*. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

BOHN, K. A., SPECHT, L. P., BRONDANI, C., CORREA, B. M., PINHEIRO, G. DOS S., EIDT, K. G., BARBOZA JUNIOR, V. DOS S., BOEIRA, F. D., PEREIRA, D. DA S. (2020). *Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero*. Revista Transportes, DOI: 10.14295/transportes.v28i1.1740

BOWER, N., WEN, H., WU, S., WILLOUGHBY, K., WESTON, J., & DEVOL, J. (2015). *Evaluation of the performance of warm mix asphalt in Washington state*. International Journal of Pavement Engineering, 17(5), 423–434. DOI: 10.1080/10298436.2014.993199

BONFIM, V. (2010). *Fresagem de pavimentos asfálticos*. 3ª edi. rev. e atual. – São Paulo: Exceção Editorial.

BORDIN, D. T.; SPECHT, L. P.; ALMEIDA JUNIOR, P. O. B.; CORREA, B. M.; FACCIN, C.; PIRES, G. M.; VASCONCELOS, K.; GASPAR, M. S. (2018). *Avaliação de misturas 100% rap frente à rigidez e à deformação permanente*. In: 32º ANPET, 2018, Gramado.

BRASIL. *Resolução nº 14, 8 de julho de 2021*. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Diário Oficial da União. 8 de julho de 2021. Disponível em:< <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-14-de-8-de-julho-de-2021-331304686>>. Acesso em: 06 set. 2022.

BUTTON J, ESTAKHRI C, WIMSATT A. (2007). *A synthesis of warm-mix asphalt*. Report FHWA/TX-07/0-5597-1. Texas: Texas Transportation Institute.

CAO, X., WANG, H., CAO, X., SUN, W., ZHU, H., & TANG, B. (2018). *Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil*. Construction and Building Materials, 180, 455–463. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.001.

CARVALHO, J. R. (2018). *Estudo do Comportamento do Asfalto Modificado Com Óleo de Girassol Visando à Obtenção de Misturas Mornas*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, Brasil.

CARVALHO, R. L., SHIRAZI, H., AYRES, M., & SELEZNEVA, O. (2010). *Performance of Recycled Hot-Mix Asphalt Overlays in Rehabilitation of Flexible Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2155(1), 55–62. DOI: 10.3141/2155-06

CENTOFANTE, R. (2016). *Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. (2015). *Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação*. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 146p.

CHEN JS, HUANG CC, CHU PY, LIN KY (2007) *Engineering characterization of recycled asphalt concrete and aged bitumen mixed recycling agent*. *Journal of Materials Science*, 42:9867–9876. DOI: 10.1007/s10853-007-1713-8

CHEN, M., LENG, B., WU, S., & SANG, Y. (2014a). *Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders*. *Construction and Building Materials*, 66(0), 286–298. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.033.

CHEN, Y.; CHEN, Z.; XIANG, Q.; QIN, W.; YI, J. *Research on the influence of RAP and aged asphalt on the performance of plant-mixed hot recycled asphalt mixture and blended asphalt*. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, e00722, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00722

CHEN, M., XIAO, F., PUTMAN, B., LENG, B., & WU, S. (2014b). *High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils*. *Construction and Building Materials*, 59(0), 10–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032

CHENG, H., LIU, J., SUN, L., LIU, L., & ZHANG, Y. (2021). *Fatigue behaviours of asphalt mixture at different temperatures in four-point bending and indirect tensile fatigue tests*. *Construction and Building Materials*, 273, 121675. DOI: /10.1016/j.conbuildmat.2020.121675

CHERAGHIAN, G., CANNONE FALCHETTO, A., YOU, Z., CHEN, Y. S., KIM, J, WESTERHOFF, K. H., WISTUBA, MP (2020). *Warm mix asphalt technology: An up to date review*. *Journal of Cleaner Production*, 122128. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122128

CIBER - WIRTGEN GROUP - *Indústria de equipamentos para recuperação e construção de rodovias, e mineração* – Disponível em: <<https://www.ciber.com.br/pt/produtos/usinas-de-asfalto/>>. Acesso em: mai. 2020

COPELAND, A.; D'ANGELO, J.; DONGRÉ, R.; BELAGUTTI, S.; SHOLAR,G. (2010). *Field Evaluation of High Reclaimed Asphalt Pavement-Warm_Mix Asphalt Project in Florida: Case Study*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 179,93-101.2010. DOI: 10.3141/2179-1

COOPER, S.B., MOHAMMAD, L.N., ELSEIFI, M.A. *Laboratory performance of asphalt mixtures containing recycled asphalt shingles, reclaimed asphalt pavement, and recycling agents*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n.3, p. 1-8, 2017.

COSTA, D. B. (2022). *Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade à presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais.

D'ANGELO, J. *et al.* (2007). *Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test*. Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists, v. 76, p. 123.

D'ANGELO, J., HARM, E., BARTOSZEK, J., BAUMGARDNER, G., CORRIGAN, M., COWSERT, J., HARMAN, T., JAMSHIDI, M., JONES, W., NEWCOMB, D., PROWELL, B., SINES, R. AND YEATON, B. (2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration.

DEDENE, C. D., VOLLER, V. R., MARASTEANU, M. O., & DAVE, E. V. (2014). *Calculation of particle heating times of reclaimed asphalt pavement material*. Road Materials and Pavement Design, 15(3), 721–732. DOI:10.1080/14680629.2014.909324

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER (1994) ME 053/94. *Misturas Betuminosas - percentagem de betume*. Rio de Janeiro, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTES – DNIT (2020) ME 429/2020. *Agregados – Determinação da porcentagem de partículas achatadas e alongadas em agregados graúdos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2020) ME 430/2020. *Agregados – Determinação da porcentagem de partículas fraturadas em agregados graúdos – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2006) ME 095/2006. *Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2010) ME 155/2010 – *Material asfáltico – Determinação da penetração*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2010) ME 131/2010 – *Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método anel e bola*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2019) ME 413/2019. *Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2019) ME 415/2019. *Pavimentação – Mistura asfáltica – Teor de vazios de agregados miúdos não compactados – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2020) ME 423/2020. *Pavimentação – Ligante asfáltico – Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2011) ES 159/2011. *Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (1997) ME 054/97. *Equivalente de areia*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2006). *Manual de Restauração de pavimentos asfálticos*. IPR – 720, 310p - 2. Ed. - Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2020) ME 424/2020. *Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2018) ME 136/2018. *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2018) ME 135/2018. *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2018) ME 183/2018. *Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.

_____ DNIT (2006) ME 031/2006. *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, Brasil.

DIAB, A.; SANGIORGI, C.; GHABCHI, R.; ZAMAN, M.; WAHABALLA, A. M. (2016). *Warm Mix Asphalt (WMA) technologies: Benefits and drawbacks—a literature review*. Functional Pavement Design, 1^oed, CRC Press.

DIEFENDERFER, B. K., BOWERS, B. F., SCHWARTZ, C. W., FARZANEH, A., & ZHANG, Z. (2016). *Dynamic modulus of recycled pavement mixtures*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2575, 19–26.

DING, Y.; HUANG, B.; SHU, X. (2016). *Characterizing blending efficiency of plant produced asphalt paving mixtures containing high RAP*. Construction and Building Materials, v. 126, p. 172–178. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.025

DINIS-ALMEIDA, M., CASTRO-GOMES, J., SANGIORGI, C., ZOOROB, S. E., & AFONSO, M. L. (2016). *Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP*. Construction and Building Materials, 112, 1–6. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.108

DOŁŻYCKI, B.; JASKUŁA, P. (2019). *Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), S2095756419301813. DOI: 10.1016/j.jtte.2019.02.002

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. (2015). *Rheological analysis of asphalt binders modified with Elvaloy® terpolymer and polyphosphoric acid on the multiple stress creep and recovery test*. Materials and Structures, v. 48, p. 1405–1416.

DONG, F., YU, X., LIANG, X., DING, G., & WEI, J. (2017). *Influence of foaming water and aging process on the properties of foamed asphalt*. Construction and Building Materials, 153, 866–874. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.161

EAPA. (2014). The use of warm mix asphalt – EAPA position paper. Brussels: European Asphalt Pavement Association. Disponível em: <<https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/EAPA-paper-Warm-Mix-Asphalt-version-2014-1.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2020.

EAPA. (2015). Asphalt in figures 2015. [S.l.]. Disponível em: <<https://eapa.org/wpcontent/uploads/2018/07/2015.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2020.

ELKASHEF, M., PODOLSKY, J., WILLIAMS, R. C., & COCHRAN, E. (2017a). *Preliminary examination of soybean oil derived material as a potential rejuvenator through Superpave criteria and asphalt bitumen rheology*. Construction and Building Materials, 149, 826–836. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.195.

ELKASHEF, M., PODOLSKY, J., WILLIAMS, R. C., & COCHRAN, E. W. (2017b). *Introducing a soybean oil-derived material as a potential rejuvenator of asphalt through rheology, mix characterisation and Fourier Transform Infrared analysis*. Road Materials and Pavement Design, 1–21. DOI: 10.1080/14680629.2017.1345781.

ELKASHEF, M., & WILLIAMS, R. C. (2017). *Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator*. Construction and Building Materials, 151, 345–352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.099.

ELKASHEF, M., WILLIAMS, R. C., & COCHRAN, E. W. (2018). *Physical and chemical characterization of rejuvenated reclaimed asphalt pavement (RAP) binders using rheology testing and pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry*. Materials and Structures, 51(1), 12. DOI:10.1617/s11527-018-1141-z

FAKHRI, M., & HOSSEINI, S.A. (2017). *Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high rap proportion*. Construction and Building Materials, 134, 626–640.

FAKHRI, M., & AHMADI, A. (2017). *Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation*. Construction and Building Materials, 147, 630–638. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.117

FERREIRA, W. L. G., CASTELO BRANCO, V. T. F., VASCONCELOS, K., BHASIN, A., & SREERAM, A. (2021). *The impact of aging heterogeneities within RAP binder on recycled asphalt mixture design*. Construction and Building Materials, 300, 124260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124260

FERROTTI, G., RAGNI, D., LU, X., & CANESTRARI, F. (2017). *Effect of warm mix asphalt chemical additives on the mechanical performance of asphalt binders*. Materials and Structures, 50(5). DOI: 10.1617/s11527-017-1096-5.

FHWA (2018). *Overview of Project Selection Guidelines for Cold In-Place and Cold Central Plant Pavement Recycling*, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.

FRIGIO, F., RASCHIA, S., STEINER, D., HOFKO, B., & CANESTRARI, F. (2016). *Aging effects on recycled WMA porous asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, 123, 712–718. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.063

GAO, J.; YAO, Y.; SONG, L.; XU, J.; YANG, J. (2022). *Determining the maximum permissible content of recycled asphalt pavement stockpile in plant hot-mix recycled asphalt mixtures considering homogeneity: A case study in China*. Case Studies in Construction Materials, v 16, e00961. DOI:10.1016/j.cscm.2022.e00961

GASPAR, M., S. (2019). *Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna*. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

GASPAR, M. S.; VASCONCELOS, K. L.; MANUELA M. L.; BERNUCCI, L. L. B. (2020). *Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling*. Revista Transportes, v. 28, nº 2, p. 87 – 99. DOI:10.14295/transportes.v28i2.2133

GE, D.; YAN, K.; YOU, L.; WANG, Z. (2017). *Modification mechanism of asphalt modified with sasobit and polyphosphoric acid (PPA)*. Construction and Building Materials, v. 143, p. 419- 428.

GENNESSEAU, M. M. L. (2015). *Avaliação da Durabilidade de Misturas Asfálticas a Quente e Mornas Contendo Material Asfáltico Fresado*. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

GIRIMATH, S., SINGH, D. (2019). *Effects of bio-oil on performance characteristics of base and recycled asphalt pavement binders*. Construction and Building Materials, v. 227, p. 116684.

GOLI, H., & LATIFI, M. (2020). *Evaluation of the effect of moisture on behavior of warm mix asphalt (WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP)*. Construction and Building Materials, 247, 118526. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118526

GONG, W., TAO, M., MALLICK, R. B., & EL-KORCHI, T. (2012). *Investigation of Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Mixes through Laboratory Mechanical Testing*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2295(1), 27–34. DOI: 10.3141/2295-04

GONG, M.; YANG, J.; ZHANG, J.; ZHU, H.; TONG, T. (2016). *Physical–chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue*, Construction and Building Materials, 105, 35–45. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.025.

GONÇALVES, B. C. S.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B. (2019). *Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos*. Revista Transportes, v. 28, n. 3, p. 75-90.

GUATIMOSIM, F. V.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B.; JENKINS, K. J. (2016). *Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt*. Road Materials and Pavement Design, 1–15. DOI: 10.1080/14680629.2016.1261726

GUERRA, T. D. (2019). *Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais.

GUO, M., LIU, H., JIAO, Y., MO, L., TAN, Y., WANG, D., & LIANG, M. (2020). *Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review*. Journal of Cleaner Production, 121704. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121704

GUO, N.; YOU, Z.; ZHAO, Y.; TAN, Y.; DIAB, A. (2014). *Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures*. Constr. Build. Mater. 64, 141–149.

GUSMÃO, C. B. (2008). *Evolução temporal da resistência mecânica em laboratório, de misturas simulando a reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland*. 167 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

HAJJ, E., SOULIMAN, M., ALAVI, M., & LORÍA SALAZAR, L. (2013). *Influence of hydrogreen bioasphalt on viscoelastic properties of reclaimed asphalt mixtures*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2371(1), 13–22

HAMZAH, M. O., JAMSHIDI, A., & SHAHADAN, Z. (2010). *Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO2 emission in the asphalt industry*. Journal of Cleaner Production, 18(18), 1859–1865. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.08.002

HANSEN, K. R., COPELAND, A. (2013). *Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2009–2012*. National Center for Asphalt Technology. Information series 138. Lanham, MD.

HANSEN, K. R., COPELAND, A. (2017) *Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage 2015*. 6th Annual Asphalt Pavement Industry Survey

Information Series 138, National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD. https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2015_RAPRAS-WMA_Survey_Final.pdf.

HASSAN, M. M., & KHALID, H. A. (2010). *Fracture Characteristics of Asphalt Mixtures Containing Incinerator Bottom Ash Aggregate*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2180(1), 1–8. DOI:10.3141/2180-01

HERNÁNDEZ, M. I. G. (2018). *Life time prediction for low energy and ecological effects bituminous mixtures*. Construction and Building Materials, 158, 108–113. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.158

HETTIARACHCHI, C., HOU, X., WANG, J., & XIAO, F. (2019). *A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology*. Constr. Build. Mater. 227 (2019), 117096. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117096

HOU, XIANGDAO; HETTIARACHCHI, CHAMOD; XIAO, FEIPENG; ZHAO, ZIFENG; XIANG, QIAN; YONG, DARA (2021). *Blending efficiency improvement and energy investigation of recycled asphalt mixture involved warm mix technology*. Journal of Cleaner Production, 279, 123732. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123732

HUANG, B., SHU, X., & TANG, Y. (2005). *Comparison of Semi-Circular Bending and Indirect Tensile Strength Tests for HMA Mixtures*. Advances in Pavement Engineering. DOI: 10.1061/40776(155)14

HUANG, B., SHU, X., & VUKOSAVLJEVIC, D. (2011). *Laboratory Investigation of Cracking Resistance of Hot-Mix Asphalt Field Mixtures Containing Screened Reclaimed Asphalt Pavement*. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(11), 1535–1543. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000223

HURLEY, G. C., & PROWELL, B. D. (2005a). *Evaluation of Aspha-Min_ Zeolite for Use in Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 05–04. Auburn University, Auburn, Alabama, USA.

HURLEY, G. C., & PROWELL, B. D. (2005b). *Evaluation of Sasobit_ for Use in Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 05-06. Auburn University, Auburn, USA.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. (2006). *Evaluation of Evotherm® for use in warm mix asphalt*. NCAT – National Center for Asphalt Technology – Report Nr. 06-02. Alabama, USA: Auburn University.

IMANINASAB, R.; LORIA-SALAZAR, L. & CARTER, A. (2022). *Integrated performance evaluation of asphalt mixtures with very high reclaimed asphalt pavement (RAP) content*. *Construction and Building Materials*, 347, 128607. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128607

JACQUES, C., DANIEL, J. S., BENNERT, T., REINKE, G., NOROUZI, A., ERICSON, C., MOGAWER, W., and KIM, Y. R. (2016). *Effect of Silo Storage Time on the Characteristics of Virgin and Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2573, 76–85. DOI:10.3141/2573-10

Jl, H. YAO; Z. SUO; Z. YOU; H. LI; S. XU; L. SUN. *Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, D4016003, 2016.

JOHNSON, E.; WATSON, M.; OLSON, R.; MOON, K. H.; TUROS, M.; & MARASTEANU, M. (2013). *Recycled Asphalt Pavement: Study of High-RAP Asphalt Mixtures on Minnesota County Roads*. Minnesota Department of Transportation, Final Report. Disponível: < <https://www.lrrb.org/pdf/201315.pdf> > Acesso em: 15 mai. 2020.

JONI, H. H., AL-RUBAEE, R. H. A., & AL-ZERKANI MAHDI A. (2019). *Rejuvenation of Aged Asphalt Binder Extracted from Reclaimed Asphalt Pavement Using Waste Vegetable and Engine Oils*. *Case Studies in Construction Materials*, e00279. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00279

KASEER, F., MARTIN, A. E., & ARÁMBULA-MERCADO, E. (2019). *Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review*. *Construction and Building Materials*, 211, 974–987. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286

KASEER, F., ARÁMBULA-MERCADO, E., & MARTIN, A. E. (2019). *A Method to Quantify Reclaimed Asphalt Pavement Binder Availability (Effective RAP Binder) in Recycled Asphalt Mixes*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119811882136. DOI:10.1177/0361198118821366

KAVUSSI, A., & HASHEMIAN, L. (2012). *Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes*. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(5), 415–423. DOI: 10.1080/10298436.2011.597859

KAVUSSI, A., & MOTEVALIZADEH, SM (2021). *Fracture and mechanical properties of water-based foam warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement*. *Construction and Building Materials*, 269, 121332. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121332

KIE BADROODI, S., REZA KEYMANESH, M., & SHAFABAKHSH, G. (2020). *Experimental investigation of the fatigue phenomenon in nano silica-modified warm mix asphalt containing recycled asphalt considering self-healing behavior*. *Construction and Building Materials*, 246, 117558. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117558

KIM, M., MOHAMMAD, L. N., & ELSEIFI, M. A. (2012). *Characterization of Fracture Properties of Asphalt Mixtures as Measured by Semicircular Bend Test and Indirect Tension Test*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2296(1), 115–124. DOI:10.3141/2296-12

KIM, Y., R., ZHANG, J., & BAN, H. (2012). *Moisture damage characterization of warm-mix asphalt mixtures based on laboratory-field evaluation*. *Construction and Building Materials*, 31, 204–211. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.085.

KIM, D.; NOROUZI, A.; KASS, S. *et al.* (2017). *Mechanistic performance evaluation of pavement sections containing RAP and WMA additives in Manitoba*. *Constr. Build. Mater.* 133, 39–50. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.035

KUCHIISHI, A. K., SANTOS ANTÃO, C. C. DOS, VASCONCELOS, K., & BERNUCCI, L. L. B. (2019). *Influence of viscoelastic properties of cold recycled asphalt mixtures on pavement response by means of temperature instrumentation*. *Road Materials and Pavement Design*, 1–15. DOI:10.1080/14680629.2019.1633781

LI, X.; ZHOU, W.; LI, M. (2013). *Influence of RAP on performance of cold recycling mixtures with foamed asphalt*. *Shanghai Ligong Daxue Xuebao/Journal Univ, Shanghai Sci. Technol.* 35, 71–76.

LIU, S., SHUKLA, A., & NANDRA, T. (2017). *Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 879–893. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.080

LIU, J., YAN, K., & LIU, J. (2018). *Rheological properties of warm mix asphalt binders and warm mix asphalt binders containing polyphosphoric acid*. *International Journal of Pavement Research and Technology*. DOI: 10.1016/j.ijprt.2018.03.005

LIU, S., ZHOU, S., PENG, A., & LI, W. (2019). *Investigation of physiochemical and rheological properties of waste cooking oil/SBS/EVA composite modified petroleum asphalt*. *Journal of Applied Polymer Science*, 48828. DOI:10.1002/app.48828

LIZÁRRAGA, J. M., RAMÍREZ, A., DÍAZ, P., MARCOBAL, J. R., & GALLEGU, J. (2018). *Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation*. *Construction and Building Materials*, 170, 433–445. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.051

LOPES, M., GABET, T., BERNUCCI, L., & MOUILLET, V. (2014). *Durability of hot and warm asphalt mixtures containing high rates of reclaimed asphalt at laboratory scale*. *Materials and Structures*, 48(12), 3937–3948. DOI:10.1617/s11527-014-0454-9

LO PRESTI, D., VASCONCELOS, K., OREŠKOVIĆ, M., PIRES, G. M., & BRESSI, S. (2019). *On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents*. *Road Materials and Pavement Design*, 1–20. DOI:10.1080/14680629.2019.1607537

LU, D.X.; SALEH, M.; NGUYEN, N.H.T. (2019). *Effect of rejuvenator and mixing methods on behaviour of warm mix asphalt containing high RAP content*, *Constr. Build. Mater.* 197. 792–802. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.205

LU, D.X.; SALEH, M. (2016). *Laboratory evaluation of warm mix asphalt incorporating high RAP proportion by using evotherm and sylvaroad additives*. *Constr. Build. Mater.* 114, 580–587. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.200

LUAN, Y.; MA, T.; WANG, S.; MA, Y.; XU, G.; WU, M. (2022). *Investigating mechanical performance and interface characteristics of cold recycled mixture: Promoting sustainable utilization of reclaimed asphalt pavement*. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133366. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133366

LUZ, P.M.S.G.; MARTINS, S.F.; COSTA, D.B.; LUCENA, L.C.F.L. (2019). *Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição*

de óleos vegetais. Revista Transporte, v. 27, n. 1, p. 141-155. DOI: 10.14295/transportes.v27i1.1594.

MA, Y., POLACZYK, P., XIAO, R., JIANG, X., ZHANG, M., LIU, Y., HUANG, B. (2022). *Influence of mobilized RAP content on the effective binder quality and performance of 100% hot in-place recycled asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, 342, Part B, 127941. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127941

MADRIGAL, D. P.; LANNONE, A.; MARTINEZ, A. H.; GIUSTOZZI, F. (2017). *Effect of mixing time and temperature on cracking resistance of bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement material*. Journal of Materials in Civil Engineering. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001831.

MANGIAFICO, S.; SAUZÉAT, C.; & DI BENEDETTO, H. (2019). *Comparison of different blending combinations of virgin and RAP-extracted binder: Rheological simulations and statistical analysis*. Construction and Building Materials, 197, 454–463. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.217

MANSOURKHAKI, A.; AMERI, M.; HABIBPOUR, M.; AND UNDERWOOD, B., S. (2020). *Chemical Composition and Rheological Characteristics of Binders Containing RAP and Rejuvenator*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(4): 04020026. DOI: 10.1061/ (ASCE) MT.1943-5533.0003016

MARTIN, H., KERSTIN, Z., & JOACHIM, M. (2019). *Reduced emissions of warm mix asphalt during construction*. Road Materials and Pavement Design, 1–10. DOI: 10.1080/14680629.2019.1628426

MARTINHO, F. C. G., PICADO-SANTOS, L. G., & CAPITÃO, S. D. (2017). *Mechanical properties of warm-mix asphalt concrete containing different additives and recycled asphalt as constituents applied in real production conditions*. Construction and Building Materials, 131, 78–89. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.051

MCDANIEL R. S.; SOLEYMANI H.; ANDERSON R. M.; TURNER P.; PETERSON R. (2000) *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in The Superpave Mix Design Method*. NCHRP Web Document 30 (Project D9-12): Contractor's Final Report, National Cooperative Highway Research Program. Washington, DC.

MCDANIEL, R.; ANDERSON, R. M. (2001). *Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method: Technician's manual*. NCHRP Report 452, Project D9-12 FY'97, Transportation Research Board, Washington, DC.

MELLO, D. (2012). *Avaliação da adição de Evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

MELO NETO, O. M. (2022). *Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, Brasil.

MELO NETO, O. M.; MENDONÇA, A. M. G. D.; RODRIGUES, J. K. G.; LIMA, R. K. B.; SILVANI, C.; SILVA, I. M. (2022). *Rheological study of asphalt binder modified by cotton and copaiba oils*. Revista Cubana de Ingeniería, v. 13, e315.

MENSCHING, D. J., DANIEL, J. S., BENNERT, T., MEDEIROS, M. S., ELWARDANY, M. D., MOGAWER, W., ... ALAVI, M. Z. (2014). *Low-temperature properties of plant-produced RAP mixtures in the Northeast*. Road Materials and Pavement Design, 15(sup1), 1–27. DOI:10.1080/14680629.2014.926617

MEOCCI, M., GRILLI, A., LA TORRE, F., & BOCCI, M. (2017). *Evaluation of mechanical performance of cement-bitumen-treated materials through laboratory and in-situ testing*. Road Materials and Pavement Design, 18(2), 376–389. DOI:10.1080/14680629.2016.1213506

MERIGHI, C. F. (2015). *Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu*. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

MOCELIN, M. (2018). *Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico*. Dissertação – Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

MOHD HASAN, M. R., YOU, Z., YIN, H., YOU, L., & ZHANG, R. (2019). *Characterizations of foamed asphalt binders prepared using combinations of physical and*

chemical foaming agents. *Construction and Building Materials*, 204, 94–104. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.156

MOLENAAR, A.A.A.; MOHAJERI, M.; VAN DE VEM, M.F.C. (2014). *Hot Recycling in the Netherlands, Transportation Research Circular Number E-C 188 Application of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt: National and International Perspectives on Current Practice*. Transportation Research Board, Washington D.C, 2014.

MOGHADAS NEJAD, F.; AZARHOOSH, A.; HAMED, G.H.; ROSHANI, H. (2014). *Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements*. *Road Materials and Pavement Design*, 15 (1) 207–219.

MOGAWER, W., BENNETT, T., DANIEL, J. S., BONAQUIST, R., AUSTERMAN, A., & BOOSHEHRIAN, A. (2012). *Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures*. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 183–208.

MONU, K., RANSINCHUNG R.N., G. D., & SINGH, S. (2019). *Effect of long-term ageing on properties of RAP inclusive WMA mixes*. *Construction and Building Materials*, 206, 483–493.

MONTAÑEZ, J., CARO, S., CARRIZOSA, D., CALVO, A., & SÁNCHEZ, X. (2020). *Variability of the mechanical properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) obtained from different sources*. *Construction and Building Materials*, 230, 116968. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116968

MOREA F, MARCOZZI R, CASTANO G (2012). *Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in Warm Mix Asphalts (WMAs)*. *Constr Build Mater* 29:135–141.

MOTTA, R. S. (2011). *Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético*. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – NAPA (2015). *High RAP Asphalt Pavements Japan Practice — Lessons Learned*. Information Series 139. Washington D.C., Estados Unidos.

NASCIMENTO, L. A. H. (2008). *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 204p.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY - NCAT (2014). *Researchers Explore Multiple Uses Of Rejuvenators*. Asphalt Technol. News 26 (1), 7e8.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - NCHRP Report 464. (2001). *The restricted zone in the Superpave aggregate gradation specification*. National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C., USA.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - NCHRP Report 9-57 (2016). *Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures*. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board, Washington, D. C., USA.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - NCHRP 9 – 58 Report 927 (2020). *Evaluating the Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixture with High RAS and RAP Binder Ratios*. Transportation Research Board, Washington, DC., USA.

NAYAK, P., & SAHOO, U. C. (2015). *A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil*. International Journal of Pavement Engineering, 18(7), 595–607. DOI: 10.1080/10298436.2015.1103851

NEMATI, RASOOL; DAVE, ESHAN V.; SIAS, JO E. (2020). *Development of Complex Modulus-Based Rutting Index Parameter for Asphalt Mixtures*. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 146(2), 04020026–. DOI: 10.1061/JPEODX.0000171.

OLIVEIRA, J. A. (2013). *Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em campo*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

OLIVEIRA, J. R. M., SILVA, H. M. R. D., ABREU, L. P. F., & PEREIRA, P. A. A. (2012). *Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 266–275. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.879

OLIVEIRA, J., R., M.; SILVA, H., M., R., D.; ABREU, L., P., F.; GONZALEZ-LEON, J., Á. (2012). *The role of a surfactant based additive on the production of recycled warm mix asphalts—less is more*. *Construction and Building Materials*, 35:693–700. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.141

OLIVEIRA, M. S., FARIAS, M. M., SILVA, J. P. S. (2022). *Fatigue analysis of hot recycled asphalt mixtures with RAP incorporation*. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01132. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01132

OMRANIAN, S. R., HAMZAH, M. O., GUNGAT, L., & TEH, S. Y. (2018). *Evaluation of asphalt mixture behavior incorporating warm mix additives and reclaimed asphalt pavement*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(3), 181–196. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.08.003

PASETTO, M., BALIELLO, A., GIACOMELLO, G., & PASQUINI, E. (2021). *Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.12.007

PICCONI, G.; LOPRENCIPE, G.; ALMEIDA, A.; FIORE, N. (2020). *Evaluation of the Performance of a Warm Mix Asphalt (WMA) Considering Aged and Unaged Specimens*. *Coatings*, 10, 1241.

PINHEIRO, G. S. & VASCONCELOS, K. (2022). *Procedimentos de extração e recuperação de ligantes asfálticos: uma revisão da literatura*. *Transportes*, 21 – 37. DOI: 10.14295/transportes.v30i1.2580

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

PODOLSKY, J. H., SAW, B., ELKASHEF, M., WILLIAMS, R. C., & COCHRAN, E. W. (2020). *Rheology and mix performance of rejuvenated high RAP field produced hot mix asphalt with a soybean derived rejuvenator*. *Road Materials and Pavement Design*, 1–14. DOI: 10.1080/14680629.2020.1719190

PORTUGAL, A. C. X.; L. C. F. L. LUCENA; A. E. F. L. LUCENA; D. B. COSTA; K. A. LIMA (2017). *Rheological properties of asphalt binder prepared with maize oil*. *Construction and building materials*. v. 152, p. 1015-1026. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.077.

PRADHAN, S. K.; SAHOO, U. C. (2020). *Influence of softer binder and rejuvenator on bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material*. International Journal of Transportation Science and Technology. DOI: 10.1016/j.ijtst.2020.12.001

PRADHAN, S. K. (2022). *Short-term and long-term aging effect of the rejuvenation on RAP binder and mixes for sustainable pavement construction*. International Journal of Transportation Science and Technology. DOI: 10.1016/j.ijtst.2022.09.005

RAHMAN, M.A.; ARSHADI, A.; GHABCHI, R.; ALI, S.A.; ZAMAN, M. (2019). *Evaluation of Rutting and Cracking Resistance of Foamed Warm Mix Asphalt Containing RAP*. 129–138. DOI: 10.1007/978-3-319-96241-2_11

RAHMAN, M. A., GHABCHI, R., ZAMAN, M., & ALI, S. A. (2021a). *Rutting and moisture-induced damage potential of foamed warm mix asphalt (WMA) containing RAP*. Innovative Infrastructure Solutions, 6(3). DOI: 10.1007/s41062-021-00528-7

RAHMAN, M. A., ZAMAN, M., ALI, S. A., GHABCHI, R., & GHOS, S. (2021b). *Evaluation of mix design volumetrics and cracking potential of foamed Warm Mix Asphalt (WMA) containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*. International Journal of Pavement Engineering, 1–13. DOI: 10.1080/10298436.2021.1902522

RASCHIA, S., PERRATON, D., CARTER, A., GRAZIANI, A., & VAILLANCOURT, M. (2018). *Effect of reclaimed asphalt gradation on bitumen emulsion mixtures*. Proceedings of the 13th International Society of Asphalt Pavements. Fortaleza, CE (8 p.).

RASHWAN, M. H.; WILLIAMS, R. C. (2012) *An evaluation of warm mix asphalt additives and reclaimed asphalt pavement on performance properties of asphalt mixtures*. In: 90th TRB – Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

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

RIVOIRE JUNIOR, L. (2014). *Avaliação de Misturas Mornas com Emprego de Simulador de Tráfego Linear*. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

RODEZNO, M. C. *et al.* (2015). *Flow Number Test and Assessment of AASHTO TP 79-13 Rutting Criteria: Comparison of Rutting Performance of Hot-Mix and Warm-Mix Asphalt*

Mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2507, p. 100-107. DOI:/10.3141/2507-11

RODEZNO, C.; & JULIAN, G. (2018). *Asphalt Binder Extraction Protocol for Determining Amount and PG Characteristics of Binders Recovered from Asphalt Mixtures*. Report N°. WHRP 0092-16-02. National Center for Asphalt Technology at Auburn University. Auburn, Ala.

RODRÍGUEZ-ALLOZA, A. M., & GALLEGO, J. (2017). *Mechanical performance of asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives*. *Materials and Structures*, 50(2). DOI:10.1617/s11527-017-1020-z

RONDÓN, H. A., HERNÁNDEZ, J. A., & REYES, F. A. (2015). *A Review of Warm Mix Asphalt Technology: Technical, Eco-nomical and Enviromental Aspects*. *Ingeniería e Investigación*, 35(3), 5–18. DOI: 10.15446/ing.investig.v35n3.50463

SANCHEZ-ALONSO, E., VEGA-ZAMANILLO, A., CASTRO-FRESNO, D., & DELRIO-PRAT, M. (2011). *Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives*. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2304–2311. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.024

SENGOZ, B.; TOPAL, A.; ONER, J. *et al.* (2017). *Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures with recycled asphalt pavement, Period*. *Polytech. Civil Eng.* 61 (1) 117–127.

SENGOZ, B., & OYLUMLUOGLU, J. (2013). *Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen*. *Construction and Building Materials*, 45, 173-183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.097

SHU, X.; HUANG, B.; SHRUM, E. D.; JIA, X. (2012). *Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP*. *Constr. Build. Mater.* 35 125–130. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.095.

SILVA, G. G. da. *Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2016.

SILVA, T. F. *Estudo de Mistura de Solos Para Impermeabilização Eficiente de Camada de Base de Aterros Sanitários*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2017.

SINGH, D.; ASHISH, PK & CHITRAGAR, SF (2018). *Laboratory performance of Recycled Asphalt Mixes containing wax and chemical based Warm Mix Additives using Semi Circular Bending and Tensile Strength Ratio tests*. *Construction and Building Materials*, 158, 1003-1014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.080

SINGH, D., CHITRAGAR, S. F., & ASHISH, P. K. (2017). *Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials*. *Construction and Building Materials*, 157, 1145–1153. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09

SINGH, D., SAWANT, D., & XIAO, F. (2017). *High and intermediate temperature performance evaluation of crumb rubber modified binders with RAP*. *Transportation Geotechnics*, 10, 13–21. DOI: 10.1016/j.trgeo.2016.10.003

SINGH, D., SHOWKAT, B., & SAWANT, D. (2019). *A study to compare virgin and target asphalt binder obtained from various RAP blending charts*. *Construction and Building Materials*, 224, 109–123. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.038

SOBHI, S.; YOUSEFI, A.; BEHNOOD, A. (2020). *The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures*. *Construction and Building Materials*, 238, 117676. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117676

SREERAM, A., LENG, Z., ZHANG, Y., & PADHAN, R. K. (2018). *Evaluation of RAP binder mobilisation and blending efficiency in bituminous mixtures: An approach using ATR-FTIR and artificial aggregate*. *Construction and Building Materials*, 179, 245–253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.154

STROUP-GARDINER, M. (2016). *Use of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Asphalt Mixtures*. NCHRP Synthesis of Highway Practice 495. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., USA.

SUN, Z.; YI, J.; HUANG, Y.; FENG, D.; GUO, C. (2016a) *Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil*. *Construction and Building Materials*. China. n. 102, p. 496-504.

SUN, J.; LI, Z.Q.; ZHAO, Y. *et al.* (2016b) *Study of road performance of Aspha-min warm mix asphalt mixture*. Journal of China Foreign Highway, 36 (4), pp. 280-283.

SUN, G.; HU, M.; SUN, D.; DENG, Y.; MA, J.; LU, T. (2020). *Temperature induced self-healing capability transition phenomenon of bitumens*. Fuel, 116698. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116698

SUZUKI, K., Y. (2019). *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com diferentes teores de Material Fresado*. Dissertação de Mestrado– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

SUZUKI, K. Y.; VASCONCELOS, KAMILLA L; BERTOLLO, S. A. M. ; BERNUCCI, L. L. B. ; SUZUKI, C.Y. (2018). *Adaptações em Usinas de Asfalto para Reciclagem a Quente ou Morna de Material Fresado (RAP)*. Revista Estradas, Porto Alegre, v. 23, p. 84.

TABATABAEE, H. A., & KURTH, T. L. (2017). *Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen*. Road Materials and Pavement Design, 18(sup2), 131–140. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304257

TARBOX S. AND DANIEL J.S. *Effects of Long-Term Oven Aging on Reclaimed Asphalt Pavement Mixture*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2294, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 1–15. DOI: 10.3141/2294-01.

TECNOPAV. *Reciclagem de pavimentos: tecnologia, sustentabilidade e economia de custos*. <<https://www.tecnopav.com.br/reciclagem>>. Acesso em: abril de 2020

TELLES, MICHELE MARCON; BLOCK, JANE MARA. (2010). *Caracterización físico química de los granos, la torta y el aceite de tres variedades de girasol (Helianthus annuus L.) cultivadas en sistemas orgánicos*. Aceites & Grasas, Florianópolis, v. 2, n. 20, p.216-222.

TIMM, D. H., WEST, R. C., & TAYLOR, A. J. (2016). *Performance and Fatigue Analysis of High Reclaimed Asphalt Pavement Content and Warm-Mix Asphalt Test Sections*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2575, 196–205. DOI:10.3141/2575-21

TORRES, P. R. B. (2020). *Estudo de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

TRAN, N., TAYLOR, A., TURNER, P., HOLMES, C., & POROT, L. (2016). *Effect of rejuvenator on performance characteristics of high RAP mixture*. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup1), 183–208. DOI:10.1080/14680629.2016.1266757

UNDERWOOD, B. S., BAEK, C., & KIM, Y. R. (2012). *Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2296(1), 36–45. DOI:10.3141/2296-04

UNGER FILHO, W.; GUTIÉRREZ KLINSKY, L. M.; MOTTA, R.; & BARIANI BERNUCCI, L. L. (2020). *Cold Recycled Asphalt Mixture using 100% RAP with Emulsified Asphalt-Recycling Agent as a New Pavement Base Course*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1–11. DOI:10.1155/2020/5863458

UNGER FILHO, W. (2019). *Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado*. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

VALDÉS, G., PÉREZ-JIMÉNEZ, F., MIRÓ, R., MARTÍNEZ, A., & BOTELLA, R. (2011). *Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)*. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1289–1297. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016

VALDES-VIDAL, G., CALABI-FLOODY, A., & SANCHEZ-ALONSO, E. (2018). *Performance evaluation of warm mix asphalt involving natural zeolite and reclaimed asphalt pavement (RAP) for sustainable pavement construction*. *Construction and Building Materials*, 174, 576–585. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.149

VIDAL, R., MOLINER, E., MARTÍNEZ, G., & RUBIO, M. C. (2013). *Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement*. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 101–114. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.02.018

WALUBITA, L.F., FARUK, A.N.M., DAS, G., IZZO, R., HAGGERTY, B., SCULLION, T. (2012). *The Continuing Search for a HMA Cracking Test: Single Shot versus Repeated Load Testing*, in: *CDROM, 91st Annual Meeting*. Transportation Research Board, Washington, DC.

WANG, W., CHEN, J., SUN, Y., XU, B., LI, J., & LIU, J. (2017). *Laboratory performance analysis of high percentage artificial RAP binder with WMA additives*. *Construction and Building Materials*, 147, 58–65. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.142

WANG, D.; RICCARDI, C.; JAFARI, B.; CANNONE, A.; FALCHETTO, A. C.; WISTUBA, M. P. (2021). *Investigation on the effect of high amount of Re-recycled RAP with Warm mix asphalt (WMA) technology*. *Construction and Building Materials*, 312, 125395. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125395

WARGHA FILHO, N. (2013). *Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação de Mestrado, Petran / UFC – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Transportes, Fortaleza, CE, Brasil.

WARGHA FILHO, N.; SOARES, J. B.; BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, S. A. *Influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. In: XXVIII ANPET, 2014, Curitiba. XXVIII ANPET, 2014.

WEN, H. (2013). *Use of fracture work density obtained from indirect tensile testing for the mix design and development of a fatigue model*. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), 561–568. DOI:10.1080/10298436.2012.729060

WEST, R. C. (2010). *Reclaimed asphalt pavement management: Best practices*. NCAT Draft Rep. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology.

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

WEST, R.; RODEZNO, C.; JULIAN, G. *et al.* (2014). *Field performance of warm mix asphalt technologies*. NCHRP Report 779, Project 9-47A. Transportation Research Board. Washington, D.C., USA.

WEST, R.; COPELAND, A. (2015). *Information series 139: High RAP asphalt pavements*. Japan practice - Lessons learned. National Asphalt Pavement Association. Lanham.

WILLIAMS, B., A.; COPELAND, A.; & ROSS, T., C. (2018). *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2017*. National Center for Asphalt Technology, 8th Annual Asphalt Pavement Industry Survey, series 138. Lanham, MD. Disponível em: <http://collaborativeaggregates.com/wp-content/uploads/2018/07/NAPA_RAP-RAS-WMA_Survey_2017.pdf> Acesso em: 28 maio 2020.

WIRTGEN GMBH. (2012). *Tecnologia de Reciclagem a Frio*. 1a ed. Widhagen, Alemanha.

WITHEOAK, D. (1990). *Shell Bitumen Handbook*, SHELL, Inglaterra.

WOSZUK, A., & FRANUS, W. (2017). *A Review of the Application of Zeolite Materials in Warm Mix Asphalt Technologies*. *Applied Sciences*, 7(3), 293. DOI: 10.3390/app7030293

WOSZUK, A., ZOFKA, A., BANDURA, L., & FRANUS, W. (2017). *Effect of zeolite properties on asphalt foaming*. *Construction and Building Materials*, 139, 247–255. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.054

WU, S., ZHANG, W., SHEN, S., LI, X., MUHUNTHAN, B., & MOHAMMAD, L. N. (2017). *Field-aged asphalt binder performance evaluation for Evotherm warm mix asphalt: Comparisons with hot mix asphalt*. *Construction and Building Materials*, 156, 574–583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.016.

WU, S., & LI, X. (2017). *Evaluation of effect of curing time on mixture performance of Advera warm mix asphalt*. *Construction and Building Materials*, 145, 62–67. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.240

XIAO, F.; YAO, S.; WANG, J.; LI, X.; AMIRKHANIAN, S. (2018). *A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement*. *Construction and Building Materials*, 180, 579–604. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006

XU, S.; XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S.; SINGH, D. (2017). *Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies—A review*. *Construction and Building Materials*, 142, 148–161.

YAN, Y.; HERNANDO, D.; LOPP, G.; RILKO, W.; & ROQUE, R. (2018). *Enhanced mortar approach to characterize the effect of reclaimed asphalt pavement on virgin binder true grade*. *Materials and Structures*, 51(2). DOI: 10.1617/s11527-018-1168-1

YAN, K., LAN, H., DUAN, Z., LIU, W., YOU, L., WU, S., & MILJKOVIĆ, M. (2021). *Mechanical performance of asphalt rejuvenated with various vegetable oils*. *Construction and Building Materials*, 293, 123485. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123485

YANG, X., YOU, Z., HASAN, M. R. M., DIAB, A., SHAO, H., CHEN, S., & GE, D. (2017). *Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm*. *Journal of Cleaner Production*, 159, 346–358. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.168

YOU, Z., MILLS-BEALE, J., FINI, E., GOH, S. W., & COLBERT, B. (2011). *Evaluation of Low-Temperature Binder Properties of Warm-Mix Asphalt, Extracted and Recovered RAP and RAS, and Bioasphalt*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1569–1574. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000295

YOU, L.; YOU, Z.; DAI, Q.; GUO, S.; WANG, J.; SCHULTZ, M. (2018a) *Characteristics of waterfoamed asphalt mixture under multiple freeze-thaw cycles: Laboratory evaluation*, *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (11) 04018270. DOI: 10.1061/ (ASCE) MT.1943-5533.0002474.

YOU, L., YOU, Z., YANG, X., GE, D., & LV, S. (2018b). *Laboratory Testing of Rheological Behavior of Water-Foamed Bitumen*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018153. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002362

YOUSEFI, A., BEHNOOD, A., NOWRUZI, A., & HAGHSHENAS, H. (2021a). *Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP)*. *Construction and Building Materials*, 121200. DOI: 10.1016 / j. conbuildmat.2020.121200

YOUSEFI, A. A.; SOBHI, S.; ALIHA, M.R.M.; PIRMOHAMMAD, S.; HAGHSHENAS H. F. (2021b). *Cracking Properties of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents under Different Loading Modes*. *Construction and Building Materials*. 300, 124130. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124130

YIN, P. & PAN, B. (2022). *Effect of RAP content on fatigue performance of hot-mixed recycled asphalt mixture*. *Construction and Building Materials*, 127077. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127077

YU, X., ZAUMANIS, M., DOS SANTOS, S., & POULIKAKOS, L. D. (2014). *Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders*. *Fuel*, 135, 162–171. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.06.038

YU, H., LENG, Z., DONG, Z., TAN, Z., GUO, F., & YAN, J. (2018). *Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix asphalt additives*. *Construction and Building Materials*, 175, 392–401.

YU, H., ZHU, Z., LENG, Z., WU, C., ZHANG, Z., WANG, D., & OESER, M. (2020). *Effect of Mixing Sequence on Asphalt Mixtures Containing Waste Tire Rubber and Warm Mix Surfactants*. *Journal of Cleaner Production*, 119008. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119008

ZAPPE, A. P. S. (2020). *Avaliação de diferentes fontes de material fresado com ligantes não-convencionais na reciclagem à quente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

ZARGAR, M., AHMADINIA, E., ASLI, H., & KARIM, M. R. (2012). *Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen*. *Journal of Hazardous Materials*, 233-234, 254–258. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.021.

ZAUMANIS, M.; & MALLICK, R. B. (2015) *Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art*. *Int. J. Pavement Eng.* 1– 17. DOI: 10.1080/10298436.2014.893331.

ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., & FRANK, R. (2014). *100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis*. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230–245. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.07.007

ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., POULIKAKOS, L., & FRANK, R. (2014). *Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures*. *Construction and Building Materials*, 71, 538–550. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073.

ZHANG, K., WEN, H., & HOBBS, A. (2015). *Laboratory Tests and Numerical Simulations of Mixing Superheated Virgin Aggregate with Reclaimed Asphalt Pavement Materials*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2506, 62–71. DOI:10.3141/2506-07

ZHANG, K., HUCHET, F., & HOBBS, A. (2019). *A review of thermal processes in the production and their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP)*. Construction and Building Materials, 206, 609–619. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.057

ZHANG, C., REN, Q., QIAN, Z., & WANG, X. (2019). *Evaluating the Effects of High RAP Content and Rejuvenating Agents on Fatigue Performance of Fine Aggregate Matrix through DMA Flexural Bending Test*. Materials, 12(9), 1508. DOI: 10.3390/ma12091508

ZHANG, Y., & BAHIA, H. U. (2021). *Effects of recycling agents (RAs) on rutting resistance and moisture susceptibility of mixtures with high RAP/RAS content*. Construction and Building Materials, 121369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121369

ZHANG, K., LUO, Y., CHEN, F., & HAN, F. (2020). *Performance evaluation of new warm mix asphalt and water stability of its mixture based on laboratory tests*. Construction and Building Materials, 241, 118017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118017

ZHANG, Z., HAN, S., GUO, H., HAN, X., & WU, C. (2021). *Fatigue performance evaluation of recycled asphalt fine aggregate matrix based on dynamic shear rheometer test*. Construction and Building Materials, 300, 124025. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124025

ZHAO, W., XIAO, F., AMIRKHANIAN, S. N., & PUTMAN, B. J. (2012). *Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, 31, 265–272. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.101

ZHAO, S., HUANG, B., SHU, X., & WOODS, M. (2013). *Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement*. Construction and Building Materials, 44, 92 – 100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010

ZHAO, S., HUANG, B., SHU, X., & WOODS, M. E. (2015). *Quantitative Characterization of Binder Blending*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2506, 72–80. DOI:10.3141/2506-08

ZHAO, S., HUANG, B., SHU, X., MOORE, J., & BOWERS, B. (2016). *Effects of WMA Technologies on Asphalt Binder Blending*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015106. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001381

ZAHOOR, M., NIZAMUDDIN, S., MADAPUSI, S., & GIUSTOZZI, F. (2020). *Sustainable Asphalt Rejuvenation using Waste Cooking Oil: a Comprehensive Review*. *Journal of Cleaner Production*, 123304. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123304

ZHOU, F.; KARKI, P.; HU, S. (2019). *Rejuvenator Laboratory Characterization and Field Performance*. (Research Report FHWA/TX-19/5-6614-01-R1) Texas Department of Transportation, Austin.

ZHU, S., CHEN, F., & YIN, H. (2017). *Simulation and validation of asphalt foaming process for virtual experiments and optimisation of WMA production*. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup4), 144–164.

ZHU, Y., WANG, X., QIAO, Y., & SHU, J. (2018). *Thermal Cracking and Fatigue Analysis of Recycled Asphalt Mixture Using DCT Test and S-VECD Model*. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Transportation Geotechnics and Pavement Engineering*, 483–492. DOI: 10.1007/978-981-13-0011-0_52

ZHU, J., MA, T., & DONG, Z. (2020). *Evaluation of optimum mixing conditions for rubberized asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement*. *Construction and Building Materials*, 234, 117426. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117426.

ZIARI, H.; OROUEI, M.; DIVANDARI, H.; YOUSEFI, A. (2021). *Mechanical characterization of warm mix asphalt mixtures made with RAP and para-fiber additive*. *Construction and Additive Materials*, 279, 122456. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122456.

ZOU, F.; LENG, Z.; CAO, R.; LI, G.; ZHANG, Y.; SREERAM, A. (2022). *Performance of zeolite synthesized from sewage sludge ash as a warm mix asphalt additive*. *Resources, Conservation and Recycling*, 181, 106254. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106254

ZUBARAN, M. (2014). *Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.