

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE TIAGO JOENCK

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MORNAS
COM 50% DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO E ADIÇÃO DE AGENTE
REJUVENESCEDOR

CURITIBA
2021

FELIPE TIAGO JOENCK

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MORNAS
COM 50% DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO E ADIÇÃO DE AGENTE
REJUVENESCEDOR

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, no programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Joe Arnaldo Villena Del Carpio

Coorientador: Prof. Dr. João Victor Staub de Melo

CURITIBA
2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

J64a Joenck, Felipe Tiago

Avaliação mecânica de misturas asfálticas recicladas mornas com 50% de revestimento asfáltico fresado e adição de agente rejuvenescedor [recurso eletrônico] / Felipe Tiago Joenck – Curitiba, 2021.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, área de concentração em Materiais e Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Joe Arnaldo Villena Del Carpio

Coorientador: Prof. Dr. João Victor Staub de Melo

1. Engenharia civil. 2. Misturas asfálticas. I. Del Carpio, Joe Arnaldo Villena. II. Melo, João Victor Staub de. III. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD 628.4458

Bibliotecária: Vilma Machado CRB-9/1563

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FELIPE TIAGO JOENCK** intitulada: **Avaliação mecânica de misturas asfálticas recicladas mornas com 50% de revestimento asfáltico fresado e adição de agente rejuvenescedor**, sob orientação do Prof. Dr. JOE ARNALDO VILLENA DEL CARPIO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

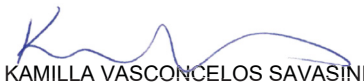
CURITIBA, 25 de Outubro de 2021.



JOE ARNALDO VILLENA DEL CARPIO
Presidente da Banca Examinadora



LEONARDO FAGUNDES ROSEMBACK MIRANDA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



KAMILLA VASCONCELOS SAVASINI
Avaliador Externo (ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus. Sem ele nada seria possível.

À minha esposa, Vanessa, pelo auxílio na realização de ensaios, pelo esclarecimento de dúvidas e pelo apoio incondicional durante toda a realização do curso.

Aos meus pais Ana e Hideraldo e à minha família, cuja solidez me permitiu chegar até aqui, e a quem serei eternamente grato.

Aos professores orientadores, Joe Arnaldo Villena Del Carpio (UFPR) e João Victor Staub de Melo (UFSC), pelos ensinamentos e pela parceria no desenvolvimento da pesquisa. Aos professores Kamila Vasconcellos Savasini (USP) e Luciano Specht (URGS), que auxiliaram no esclarecimento de dúvidas, no compartilhamento de experiências e com a realização de ensaios. Ao professor Leonardo Fagundes Rosembach Miranda pelo apoio e conselhos na etapa de qualificação.

Ao Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira - LAMP e ao Laboratório de Polímeros Paulo Scarpa – LAPPS, da Universidade Federal do Paraná, pela disponibilização do ambiente físico e equipamentos que permitiram a realização dos ensaios da pesquisa. Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, que disponibilizou o equipamento *Dynamic Shear Rheometer* (DSR).

Ao discente Alexandre Manfro pelo apoio na realização dos ensaios no DSR. À discente Fernanda Gadler pelo esclarecimento de dúvidas sobre os ensaios.

À CBB Asfaltos pela parceria com a UFPR no fornecimento do ligante asfáltico e disponibilização dos laboratórios para conferência de parâmetros, em especial à Eng. Aline Sendeski pela cortesia no atendimento. À Kraton, em especial ao Eng. Rafael Lopes Martins, pelo fornecimento do agente rejuvenescedor Sylvaroad. Ao fornecedor do aditivo surfactante para misturas mornas, que solicitou não ser citado.

À concessionária de rodovias CCR, pela disponibilização do laboratório e apoio laboratorial na realização dos ensaios de *Flow Number* desta pesquisa, em especial à Eng. Valéria Cristina de Faria pela cortesia e presteza no atendimento.

“Transportai um punhado de terra todos os dias, e fareis uma montanha”.

(Confúcio).

RESUMO

A técnica de reciclagem de misturas asfálticas tem se difundido bastante no Brasil, seguindo parâmetros e técnicas internacionais de reaproveitamento do material fresado, também conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), em pavimentos novos. O advento dos agentes rejuvenescedores (AR), capazes de restaurar as propriedades mecânicas do ligante envelhecido, permitiu o avanço dos estudos para o emprego de altos teores (superiores a 25% da mistura) desse material em misturas novas. A quantidade empregada de AR, porém, afeta diretamente o desempenho das misturas asfálticas, uma vez que dosagens excessivas prejudicam a resistência à deformação permanente, ao passo que dosagens escassas têm um impacto negativo na resistência à fadiga. A opção por um método de dosagem adequado é, portanto, fundamental para o bom desempenho das misturas recicladas. Considerando ainda o avanço da técnica de misturas mornas, faz-se importante avaliar também a relação dessas técnicas combinadas. Desta forma, a presente pesquisa buscou avaliar os efeitos da adição do agente rejuvenescedor Sylvaroad RP 1000 nas propriedades reológicas do ligante asfáltico envelhecido, utilizando como parâmetro o *Performance Grade* de alta temperatura – PGH do ligante virgem pretendido, assim como avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas convencionais e recicladas, produzidas pelas técnicas a quente e morna. A dosagem do AR se deu pela extração do ligante do RAP e aplicação dos teores 0, 3, 5, 7 e 10% do produto, determinando-se o teor ideal através de ensaios de PGH no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), e verificando-se a tolerância ao dano por fadiga e suscetibilidade à deformação permanente, também no DSR. Na sequência foi produzida uma mistura convencional a quente (MCQ), uma mistura convencional morna (MCM), uma mistura reciclada a quente (MRQ) e uma mistura reciclada morna (MRM), avaliadas em termos módulo resiliente, resistência à tração, dano por umidade induzida, resistência à fadiga e deformação permanente, assim como por simulação de uma estrutura de pavimento asfáltico hipotética no programa MeDiNa. Os resultados mostraram que o teor de AR capaz de recuperar o PGH do ligante original foi de 10,6%, valor que apresentou parâmetros reológicos satisfatórios e inclusive superiores ao do ligante pretendido, o CAP 50/70. Para as misturas asfálticas, verificou-se superioridade da mistura MRQ nos ensaios de módulo de resiliência, fadiga, deformação permanente e desempenho pelo programa MeDiNa. Já a mistura MRM, contudo, apresentou o pior desempenho nestes ensaios, denotando a necessidade de avaliação mais aprofundada da interação dos agentes surfactante e rejuvenescedor. Os resultados permitiram concluir que as misturas asfálticas recicladas são capazes de obter um desempenho superior ao das convencionais, e que seu emprego como solução de pavimentação pode e deve ser encorajado.

Palavras-chave: Performance grade, agente rejuvenescedor, misturas asfálticas mornas, misturas asfálticas recicladas, material fresado.

ABSTRACT

The asphalt mixture recycling technique has become widespread in Brazil, following international parameters and techniques for reusing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in new pavements. The rejuvenating agents (AR) can restore the mechanical properties of aged binder, including in high contents (greater than 25%) of this material in new mixtures. The amount of AR used, however, directly affects the performance of asphalt mixtures, since excessive dosages reduces the resistance to permanent deformation, while low dosages have a negative impact on fatigue resistance. The option for an adequate dosage method is, therefore, fundamental for the good performance of recycled mixtures. Considering the advancement of the technique of warm mixtures, it is important to also evaluate the relationship of these combined techniques. The present research aimed to evaluate the effects of the addition of the rejuvenating agent Sylvaroad RP 1000 on the rheological properties of aged asphalt binder, using as a parameter the High Temperature Performance Grade – PGH of the intended virgin binder, as well as to evaluate the behavior of conventional and recycled asphalt mixtures, produced by hot and warm techniques. The dosage of AR was achieved by extracting the binder from the RAP and applying the contents of 0, 3, 5, 7 and 10% in binder, determining the ideal content through the PGH tests in the Dynamic Shear Rheometer (DSR), and verifying the tolerance to fatigue damage and rutting susceptibility, also in the DSR. A conventional hot mix (MCQ), a conventional warm mix (MCM), a recycled hot mix (MRQ) and a warm recycled mix (MRM) were then prepared, all evaluated in terms of resilient modulus, tensile strength, moisture damage, fatigue resistance and permanent deformation, as well as an simulation of a hypothetical pavement structure in MeDiNa software. The results showed that the rejuvenating agent content, capable of recovering PGH from the original binder, was 10.6%, a value that presented satisfactory rheological parameters, even superior to the intended binder, (CAP 50/70). Regarding the asphalt mixtures, superiority of the MRQ mixture was verified in the results of resilient modulus, fatigue resistance, permanent deformation resistance and performance evaluated on MeDiNa software. The MRM mixture, however, presented the worst performance, denoting the need for a more extensive evaluation about the interaction of the surfactant and rejuvenating agents. From the resultus of this research it is possible to conclude that recycled asphalt mixtures are able to outperform conventional asphalt mixtures, and that their use as a paving solution can and should be encouraged.

Keywords: Performance grade, rejuvenating agent, warm asphalt mixtures, recycled asphalt mixtures, Reclaimed Asphalt Pavement.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CRESCIMENTO DAS ÁREAS DE MINERAÇÃO E DIMINUIÇÃO DAS ÁREAS DE FLORESTA NO BRASIL.	23
FIGURA 2 - APLICAÇÃO DE MATERIAL FRESADO EM VIAS DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO.....	24
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE FASE DO LIGANTE ASFÁLTICO OBTIDO NO MICROSCÓPIO DE FORÇA ATÔMICA (A) EM DUAS DIMENSÕES E (B) EM TRÊS DIMENSÕES.....	26
FIGURA 4 - VARIAÇÃO DOS COMPONENTES DO ASFALTO DE ACORDO COM O ENVELHECIMENTO.	28
FIGURA 5 - RESULTADOS DO TESTE DE DEGRADAÇÃO DO LIGANTE (PG 58-28) PARA DIVERSOS SOLVENTES.....	29
FIGURA 6 - DIFERENTES DOSAGENS DE AR EM FUNÇÃO DA PENETRAÇÃO E PG DO LIGANTE VIRGEM (PG 64-22).....	37
FIGURA 7 - DOSAGEM DO AR PELO PGH E PGL.	39
FIGURA 8 - DIFERENTES CENÁRIOS DE MISTURAS ENTRE OS LIGANTES VIRGEM E ENVELHECIDO	42
FIGURA 9 - ADIÇÃO DE AR DIRETAMENTE AO RAP NA ESTEIRA.....	44
FIGURA 10 - PROFUNDIDADE DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE APÓS 10.000 PASSADAS.....	46
FIGURA 11 - GRÁFICO DE NÚMERO DE CICLOS/PASSADAS POR PROFUNDIDADE DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE.	47
FIGURA 12 - LIMITAÇÕES RELATADAS PARA O EMPREGO DE RAP NOS ESTADOS UNIDOS	51
FIGURA 13 - USINA DE ASFALTO NO JAPÃO. (A) TAMBOR AQUECEDOR E SECADOR PARA O RAP; (B) MISTURADOR DO RAP COM O AGENTE REJUVENESCEDOR; (C) TRANSPORTADOR DE TREMONHA PARA LEVAR O RAP AQUECIDO ATÉ OS SILOS DE ARMAZENAMENTO E (D) SILOS DE RAP (ESQUERDA) E DE MISTURAS A QUENTE (DIREITA).	52
FIGURA 14 - CONSUMO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.	55

FIGURA 15 - PAVIMENTAÇÃO UTILIZANDO TÉCNICA DE (A) MISTURA MORN E (B) MISTURA A QUENTE CONVENCIONAL.....	56
FIGURA 16 - ADITIVOS PARA PRODUÇÃO DE MISTURAS MORNAS. (A) CERA ORGÂNICA (B) ZEÓLITAS PARA PRODUÇÃO DE ASFALTO-ESPUMA E (C) ADITIVO SURFACTANTE.....	58
FIGURA 17 - DESEMPENHOS DE MISTURAS RECICLADAS, MORNAS E RECICLADAS MORNAS.....	60
FIGURA 18 - DESEMPENHO DOS DIFERENTES ADITIVOS DE MISTURAS MORNAS.....	60
FIGURA 19 - LOCAL DA OBRA DE MANUTENÇÃO DO PAVIMENTO QUE DEU ORIGEM AO RAP OBTIDO.....	64
FIGURA 20 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO RAP E PÓ DE PEDRA VIRGEM.	65
FIGURA 21 - (A) RODOVIA ANTES DO PROCESSO DE FRESAGEM; (B) PROCESSO DE FRESAGEM DO PAVIMENTO DETERIORADO; (C) CARACTERÍSTICA DA CORREÇÃO DE DEFEITO REALIZADA NA TRILHA DE RODA; (D) ASPECTO DA SUPERFÍCIE FRESADA; (E) VISTA DAS PILHAS DE DEPÓSITO DE MATERIAL FRESADO; (E) COLETA DO MATERIAL FRESADO. ..	66
FIGURA 22 - APARÊNCIA DOS AGREGADOS VIRGENS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	67
FIGURA 23 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS NATURAIS.....	68
FIGURA 24 - AGENTE REJUVENESCEDOR SYLVAROAD RP 1000 (A) NA EMBALAGEM LACRADA DE 1 GALÃO E (B) APARÊNCIA DO ÓLEO À TEMPERATURA AMBIENTE.....	70
FIGURA 25 - CONSISTÊNCIA DO ADITIVO SURFACTANTE PARA MISTURAS MORNAS.....	72
FIGURA 26 - FLUXOGRAMA DE ETAPAS DA PESQUISA.	74
FIGURA 27 - ASPECTO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL FRESADO SENDO (A) O FRESADO ORIGINAL; (B) A FRAÇÃO RETIDA NA PENEIRA #25MM E DESCARTADA; (C) A FRAÇÃO GRAÚDA RETIDA NA #4; E (D) A FRAÇÃO MIÚDA, PASSANTE NA #4.	76
FIGURA 28 - (A) ROTA EVAPORADOR DO LAPPS EM FUNCIONAMENTO E (B) ESCORRIMENTO DO LIGANTE DO BALÃO.	78
FIGURA 29 - ESQUEMA PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE AR.....	81

FIGURA 30 - FAIXAS DE TEMPERATURA DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO EM FUNÇÃO DA VISCOSIDADE DO CAP 50/70.	84
FIGURA 31 - (A) AQUECIMENTO DO RAP NA PANELA; (B) ADIÇÃO DO AR NO RAP COM SPRAY E MISTURA POR 60S; (C) ADIÇÃO DO AGREGADO VIRGEM AQUECIDO; (D) MISTURA DO RAP COM O AGREGADO VIRGEM POR 60S; (E) ADIÇÃO DO LIGANTE VIRGEM; (F) MISTURA FINAL POR 120S.	87
FIGURA 32 - PROCEDIMENTO DE (A) DOSAGEM COM PIPETA E (B) MISTURA DO ADITIVO SURFACTANTE PARA MISTURAS MORNAS NO LIGANTE VIRGEM.	89
FIGURA 33 - ESTRUTURA DE PAVIMENTO UTILIZADA NO SOFTWARE MEDINA PARA COMPARAÇÃO DAS MISTURAS.	94
FIGURA 34 - ESQUEMA DE DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES MÁXIMAS NO REVESTIMENTO.	95
FIGURA 35 - RESULTADO DA PENETRAÇÃO DAS AMOSTRAS VÁLIDAS APÓS A EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DO LIGANTE DO RAP.	96
FIGURA 36 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO RAP APÓS EXTRAÇÃO DO LIGANTE.	98
FIGURA 37 - RESULTADOS DE VISCOSIDADE NO VISCOSÍMETRO BROOKFIELD.	100
FIGURA 38 - <i>BLENDING CHART</i> PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR IDEAL PELO PG.	102
FIGURA 39 - GRÁFICO DE RELAÇÃO DA TAXA DE RECUPERAÇÃO (%R _{3,2}) E COMPLIÂNCIA NÃO RECUPERÁVEL (JNR _{3,2}) COM O TEOR DE AR.	104
FIGURA 40 – VIDA DE FADIGA DO LIGANTE VIRGEM E LIGANTES REJUVENESCIDOS PARA A AMPLITUDE DE 15,0%.	106
FIGURA 41 – VIDA DE FADIGA DO LIGANTE VIRGEM E LIGANTES REJUVENESCIDOS.	106
FIGURA 42 – GRANULOMETRIAS TESTADAS NA DOSAGEM DA MISTURA DE REFERÊNCIA.	108
FIGURA 43 – GRÁFICO DO VOLUME DE VAZIOS EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO, E DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO.	110
FIGURA 44 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DAS MISTURAS PRODUZIDAS	113

FIGURA 45 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORPO DE PROVA DA MISTURA CONVENCIONAL A QUENTE.	114
FIGURA 46 - MÓDULO DE RESILIÊNCIA RESULTANTE PARA AS MISTURAS ANALISADAS.....	116
FIGURA 47 - CURVAS DE FADIGA DAS MISTURAS; NÚMERO DE CICLOS PARA FALHA X DEF. ESPECÍFICA RESILIENTE.	119
FIGURA 48 - CURVAS DE FADIGA DAS MISTURAS; NÚMERO DE CICLOS PARA FALHA X DIFERENÇA DE TENSÕES.....	119
FIGURA 49 - FATOR DE FADIGA DAS MISTURAS (FFM) EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR).	121
FIGURA 50 - RESULTADO DOS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO FLOW NUMBER.....	122
FIGURA 51 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS AMOSTRAS SECAS E SATURADAS.....	124
FIGURA 52 - RESULTADO COMPARATIVO DE VIDA ÚTIL À FADIGA DAS MISTURAS ESTUDADAS.....	126

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - BENEFÍCIOS E VANTAGENS ESPERADOS COM O USO DE MISTURAS MORNAS.	54
QUADRO 2 - MISTURAS PRODUZIDAS NA PESQUISA.	90
QUADRO 3 - CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS ENTRE MR E FFM CONFORME AS FAIXAS DE REPETIÇÕES DO EIXO PADRÃO PARA 30% DE ÁREA TRINCADA	120
QUADRO 4 - LIMITES DAS CLASSES DE DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS À DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	122

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS AGENTES REJUVENESCEDORES DE BASE ASFÁLTICA.....	34
TABELA 2 - PROPRIEDADES DOS AGREGADOS NATURAIS.....	67
TABELA 3 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO CAP 50/70.	69
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO SYLVAROAD RP 1000.....	71
TABELA 5 - PROPRIEDADES DO AGENTE SURFACTANTE.....	71
TABELA 6 - QUANTIDADE DE AMOSTRAS E CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS NA PESQUISA, POR ENSAIO.....	92
TABELA 7 - MASSA ESPECÍFICA REAL E ABSORÇÃO DOS AGREGADOS DO RAP E VIRGENS.....	98
TABELA 8 - COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES DOS LIGANTES VIRGEM E EXTRAÍDO DO RAP.	99
TABELA 9 - VALORES DO PG CONTÍNUO DE ALTA TEMPERATURA DAS AMOSTRAS APÓS ENSAIO NO DSR.....	101
TABELA 10 - RESULTADOS DO ENSAIO MSCR, REALIZADO A 64°C (PGH DO LIGANTE VIRGEM).....	103
TABELA 11 - RESUMO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE VARREDURA DE AMPLITUDE LINEAR (LAS).....	105
TABELA 12 - PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DAS MISTURAS COM AS GRANULOMETRIAS INICIAIS.....	109
TABELA 13 - PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DAS MISTURAS COM DIFERENTES TEORES DE ASFALTO.....	110
TABELA 14 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA CONVENCIONAL PADRÃO, PARA CPS DE 1200G.....	111
TABELA 15 - COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS RECICLADAS COM ADIÇÃO DE 50% DE RAP.....	112
TABELA 16 - GRANULOMETRIA DAS MISTURAS RECICLADAS COM ADIÇÃO DE 50% DE RAP.....	112
TABELA 17 - RESULTADOS MÉDIOS DOS ENSAIOS DE FADIGA PARA CADA NÍVEL DE TENSÃO E MISTURA.....	118

TABELA 18 - DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS RESILIENTES CALCULADAS PELO SOFTWARE AEMC PARA CADA MISTURA.....	125
TABELA 19 - RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO NO MEDINA.....	127
TABELA 20 - COMPARATIVO DE CUSTOS PARA UMA OBRA DE PAVIMENTAÇÃO COM 20KM DE EXTENSÃO	129

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASTHO: *American Association of Highway and Transportation Officials*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

AR: Agente rejuvenecedor

CAP: Cimento asfáltico de petróleo

DMM: Densidade máxima medida

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DSR: *Dynamic Shear Rheometer*

FFM: Fator de Fadiga da Mistura

FHWA: *Federal Highway Administration*

FN: *Flow Number*

[G*]: Módulo de cisalhamento dinâmico

Gmb: Densidade específica aparente

Gmm: Densidade relativa máxima medida

Gse: massa específica efetiva

CGS: Compactador Giratório Superpave

LAMP: Laboratório de Pavimentação Prof. Armando Martins Pereira

LaPPS: Laboratório de Polímeros Paulo Scarpa

LAS: *Linear Amplitude Sweep*

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

MR: Módulo de Resiliência

MSCR: *Multiple Stress Creep Recovery*

NAPA: *National Asphalt Pavement Association*

NBR: Norma Brasileira

Ninicial: Número de giros inicial

Nmáximo: Número de giros máximo

Nprojeto: Número de giros de projeto

PG: *Performance Grade* ou grau de desempenho

PGH: *High Temperature Performance Grade*

PGL: *Low Temperature Performance Grade*

PPGEC: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

RBV: Relação betume vazios

RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement* ou revestimento asfáltico fresado

RRT: Razão de Resistência à Tração

RT: Resistência à Tração

SHRP: *Strategic Highway Research Program*

SUPERPAVE: *Superior Performing Asphalt Pavement*

TRB *Transportation Research Board*

UFPR: Universidade Federal do Paraná

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina

USP: Universidade de São Paulo

UTM: *Universal Test Machine* ou Máquina de Ensaio Universal

VAM: Vazios do agregado mineral

VV: Volume de vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVO	22
1.1.1	Objetivos Específicos	22
1.2	JUSTIFICATIVA	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	LIGANTE ASFÁLTICO	26
2.1.1	Envelhecimento dos ligantes	27
2.1.2	Extração e recuperação dos ligantes.....	28
2.1.2.1	<i>Performance Grade</i>	30
2.2	MISTURAS RECICLADAS	32
2.2.1	Agentes rejuvenescedores	32
2.2.1.1	Dosagem dos agentes rejuvenescedores	35
2.2.2	Interação entre ligante virgem e ligante rejuvenescido	41
2.2.3	Desempenho das misturas asfálticas recicladas	45
2.2.4	Desafios para o emprego de altos teores de RAP nas misturas	49
2.3	MISTURAS MORNAS	53
2.3.1	Técnicas de produção de misturas mornas	57
2.4	MISTURAS RECICLADAS MORNAS	58
2.5	RESUMO DO CAPÍTULO	61
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3.1	MATERIAIS	63
3.1.1	Material Fresado	63
3.1.2	Agregados pétreos	66
3.1.3	Ligante asfáltico.....	68
3.1.4	Agente rejuvenescedor	69
3.1.5	Aditivo para misturas mornas	71
3.2	MÉTODOS	72
3.2.1	Etapa 1 - Gestão do RAP	75
3.2.1.1	Granulometria e fracionamento	75

3.2.1.2	Extração do ligante.....	76
3.2.1.3	Recuperação do ligante.....	77
3.2.2	Etapa 2 - Caracterização física dos materiais	79
3.2.3	Etapa 3 - Dosagem do agente rejuvenescedor e das misturas	80
3.2.3.1	Dosagem do agente rejuvenescedor.....	80
3.2.3.2	Dosagem das misturas de referência.....	82
3.2.3.3	Dosagem das misturas recicladas.....	85
3.2.3.4	Dosagem das misturas mornas.....	88
3.2.3.5	Resumo das misturas asfálticas produzidas	89
3.2.4	Etapa 4 – Ensaio de caracterização mecânica	90
3.2.5	Etapa 5 - Simulação de dimensionamento no software MeDiNa	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
4.1	ETAPA 1 – GESTÃO DO RAP	96
4.2	ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS	97
4.2.1	Agregados	97
4.2.2	Ligante do RAP.....	99
4.3	ETAPA 3 – DOSAGEM DO AGENTE REJUVENESCEDOR E DAS MISTURAS	100
4.3.1	Dosagem do AR	100
4.3.1.1	Performance Grade.....	100
4.3.1.2	Suscetibilidade à deformação permanente pelo MSCR	103
4.3.1.3	Tolerância ao dano por fadiga pelo LAS	105
4.3.2	Dosagem das misturas asfálticas	107
4.4	ETAPA 4 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	113
4.4.1	Resistência à Tração	113
4.4.2	Módulo de Resiliência.....	116
4.4.3	Resistência à Fadiga	117
4.4.4	<i>Flow Number</i>	121
4.4.5	Dano por Umidade Induzida.	123
4.5	ETAPA 5 - SIMULAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO NO MEDINA.....	125
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
	REFERÊNCIAS.....	135

1 INTRODUÇÃO

Em razão de reduzir a necessidade de utilização de ligantes virgens, economizando energia, custos de transporte e recursos naturais, a reciclagem de pavimentos asfálticos tem se mostrado uma alternativa bastante útil em relação à produção de misturas asfálticas convencionais (SPEIGHT, 2016). A utilização de material asfáltico fresado, conhecido por RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), na composição de novas misturas asfálticas já mostrou que pode ser uma solução mais econômica para a pavimentação (SONG; HUANG; SHU; 2018), e também um método capaz de gerar misturas asfálticas com desempenhos equivalentes ou superiores às convencionais (IM, 2016; CANCHANYA, 2017; CENTOFANTE, 2016). Estudos comprovam ser possível obter uma redução em torno de 24 a 35% nos custos de pavimentos com o uso de 50% de RAP, e o rápido aumento nos preços dos ligantes asfálticos apenas contribui para essa diferença (ZAUMANIS *et al.*, 2014). Ainda, com a redução da disponibilidade de materiais virgens de qualidade, esta técnica tem se tornado cada vez mais prevalente (SPEIGHT, 2016).

Segundo o levantamento anual de utilização de materiais reciclados, publicado pela NAPA - *National Asphalt Pavement Association* (WILLIAMS; WILLIS; ROSS; 2019), estima-se que nos Estados Unidos, cerca de 97% das misturas asfálticas recuperadas de pavimentos antigos foram novamente empregadas em pavimentos novos. A mesma pesquisa mostra que, somente em 2018, foram utilizadas 82,2 milhões de toneladas de RAP naquele país. Esse montante reduziu a necessidade de cerca de 4,1 milhões de toneladas de ligante asfáltico, e de cerca de 78 milhões de toneladas de agregados pétreos, economizando um valor total de 2,8 bilhões de dólares e 46,9 milhões de metros cúbicos de aterro. No Brasil ainda não existem dados estatísticos sobre a utilização de RAP em âmbito nacional. Talvez um dos motivos seja a reduzida aplicação da reciclagem de revestimento asfáltico nas restaurações de pavimentos no país. Os casos mais conhecidos e bem-sucedidos de aplicação da técnica são resultados de experiências conduzidas pelas concessionárias de rodovias, que se destacam no emprego de novas tecnologias. Cabe ressaltar ainda que a aplicação desta técnica no país usualmente limita-se a baixos teores de fresado

(menores que 25%), a exemplo das experiências citadas por Klinski (2018) no grupo CCR, existindo poucas pesquisas práticas com adoção de teores mais elevados.

Conforme destaca Suzuki (2019), dentre os desafios a serem superados para que a reciclagem seja prática rotineira, destacam-se o comportamento mecânico das misturas com o aumento do teor de fresado, o estudo da interação entre o ligante velho e novo, o papel do agente rejuvenescedor e a adaptação das usinas de asfalto para a produção de misturas recicladas. Sobre este último, considerando o exposto por Klinski (2018), ressalta-se a necessidade de se vencer a resistência das construtoras e pedreiras (que geralmente também são as proprietárias das usinas) acerca da importância e da vantajosidade de se produzir misturas recicladas, em detrimento às misturas somente com agregados virgens.

Quanto ao uso rotineiro de elevados teores de RAP (maiores que 25%), várias questões ainda precisam ser abordadas em estudos e pesquisas (ZAUMANIS *et al.*, 2014). Há pouca experiência prática e mesmo acadêmica com relação este tipo de mistura, sendo que uma das lacunas de conhecimento diz respeito ao processo de rejuvenescimento do ligante recuperado do RAP (GADLER, 2018). Sabe-se que adição de RAP às misturas asfálticas usualmente leva ao aumento da sua rigidez. Desta forma, misturas com altos teores de RAP demandam atenção especial, uma vez que o aumento exagerado de rigidez pode comprometer o desempenho da mistura à fadiga, resultando em trincas prematuras nos pavimentos sujeitos a altas deflexões. Esta adição de altas quantidades de RAP nas misturas, portanto, é motivo de preocupação para os departamentos de transportes, e um dos desafios à disseminação desta técnica de reciclagem (COPELAND, 2011).

O advento dos agentes rejuvenescedores de asfalto (AR), contudo, teve um impacto significativo no uso do RAP na indústria de asfalto (SONG; HUANG; SHU; 2018). Através do emprego destes aditivos, torna-se possível a adição de qualquer porcentagem de RAP em misturas asfálticas novas, até mesmo a produção de misturas exclusivamente com este material. Entretanto, para garantir o bom desempenho dessas misturas é necessário que a dosagem de AR seja balanceada, de forma a garantir a resistência às trincas e à deformação permanente, concomitantemente (ZAUMANIS *et al.*, 2014). Normalmente, a dosagem do AR é selecionada com base na experiência ou recomendação do fabricante. No entanto, a dosagem para um determinado AR pode não ser a mesma para misturas com

diferentes tipos e quantidades de materiais recicláveis, uma vez que fatores como a origem, nível de envelhecimento e quantidade de material reciclado utilizado têm efeito no processo (ARÁMBULA-MERCADO *et al.*, 2018). As conclusões obtidas por Arámbula-Mercado *et al.* (2018), todavia, revelam que essa dosagem pode ser otimizada buscando-se restaurar o *Performance Grade* (PG) do ligante virgem pretendido, mais especificamente a temperatura alta do PG, conhecida por PGH.

Além da adição de RAP e AR às misturas asfálticas, a utilização da técnica de misturas mornas (*Warm Mix Asphalts* – WMA) também já se mostrou promissora e adequada à reciclagem de revestimentos. Para reduzir a poluição ambiental causada pela indústria de asfalto, cuja produção emite gases nocivos para o efeito estufa, muitos países começaram a experimentar esta técnica (HETTIARACHCHI *et al.*, 2019), que confere maior viscosidade aos ligantes em temperaturas inferiores às usuais, reduzindo as emissões de gases e economizando energia e combustíveis durante a produção e aplicação (SPEIGHT, 2016).

Por utilizar temperaturas de produção e aplicação mais baixas, a técnica WMA reduz o envelhecimento adicional do ligante (SONG; HUANG; SHU; 2018), tornando-se particularmente interessante para o emprego em misturas recicladas. Além disso, o emprego desta técnica, conforme Prowell, Hurley e Frank (2012) permite que sejam incorporados maiores teores de RAP às misturas, facilitando ainda sua aplicação e compactação. Sua utilização em misturas recicladas aparentemente provê um efeito sinérgico, melhorando o desempenho das misturas com altos teores de RAP (ZAUMANIS; MALLICK, 2015).

Com base no exposto, conclui-se que a produção de misturas asfálticas mornas com altos teores de RAP demanda a elaboração de estudos, com o objetivo de melhorar seu desempenho e fomentar a utilização prática desta solução de pavimentação, especialmente no Brasil. Visando contribuir com essa meta, esta pesquisa investigou os efeitos da adição de agentes rejuvenescedores em misturas com 50% de RAP, através da dosagem e experimentação de misturas em laboratório, buscando-se otimizar o teor de AR com base nas recentes pesquisas, de forma a garantir melhores resultados frente às condições às quais essas misturas serão usualmente submetidas ao longo de sua vida útil. Além disso, buscou-se explorar o uso das misturas mornas que, conforme a literatura, tem a contribuir para o

desempenho das misturas e para a redução do impacto ambiental causado pela produção dos pavimentos asfálticos em geral.

1.1 OBJETIVO

Analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com adição de 50% de material fresado, aditivo surfactante para misturas mornas e agente rejuvenescedor, dosado em função do *Performance Grade* do ligante.

1.1.1 Objetivos Específicos

Analisar as propriedades reológicas de ligante rejuvenescido com AR de base vegetal, dosado em função do PG de alta temperatura do ligante virgem.

- Comparar o comportamento mecânico da mistura reciclada com 50% de RAP, com o da mistura convencional sem adição de RAP.
- Comparar o comportamento mecânico das misturas usinadas mornas com as das misturas usinadas a quente, com e sem adição de RAP.

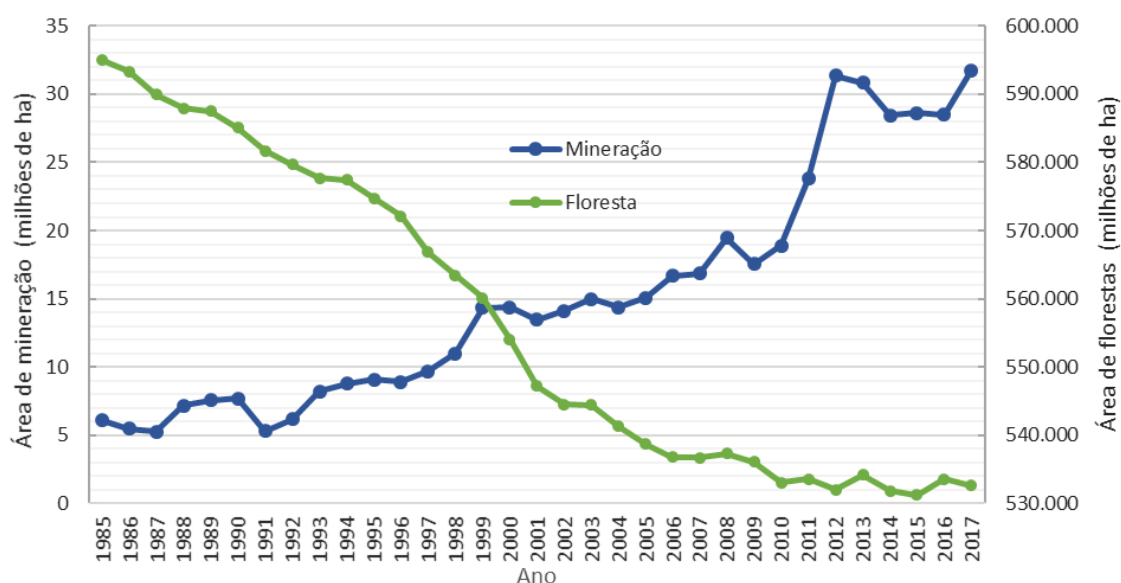
1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui atualmente cerca de 213,5 mil quilômetros de rodovias pavimentadas (CNT, 2018a). Para manter as rodovias em adequadas condições de tráfego, são necessários orçamentos bilionários de manutenção, restauração e ampliação de capacidade todos os anos, e também constantes investimentos em pesquisas para o desenvolvimento de soluções de pavimentação mais eficazes e duradouras. Contudo, no panorama rodoviário em geral, o Brasil ainda tem muito por melhorar, tendo ocupado apenas a 112ª posição, dentre 140 países, no quesito qualidade da infraestrutura rodoviária (*WORLD ECONOMIC FORUM*, 2018). Mesmo com estes constantes investimentos em infraestrutura, a ocorrência de acidentes nas rodovias em decorrência das más condições das rodovias federais somou 6,7% do total de acidentes ocorridos em 2017 (CNT, 2018b). Por esta razão, fomentar e

desenvolver tecnologias mais econômicas de pavimentação, a exemplo da reciclagem de pavimentos, é fundamental para otimizar os investimentos em manutenção rodoviária, permitindo que maiores extensões de malha nacional sejam elevadas a condições mais seguras e confortáveis ao tráfego.

Nos últimos anos, sobretudo, têm crescido também a preocupação com a sustentabilidade e preservação ambiental. Neste quesito, cabe citar que a construção de estradas, mineração e garimpo figuram como algumas das principais atividades responsáveis pela pressão sobre as florestas no Brasil (SNIF, 2018). Estas atividades têm feito com que as áreas de mineração cresçam rapidamente ao longo dos anos, contribuindo para a diminuição das áreas de florestas, como mostra a Figura 1. Todos os anos, 13 milhões de hectares de florestas do planeta são perdidos (ONU, 2017), prejudicando populações, faunas e ecossistemas. Mais especificamente no Brasil, conforme dados do MapBiomias (2017), desde o ano de 1985 já foram perdidos mais de 62 milhões de hectares de florestas. Em outras regiões do mundo, os agregados minerais e asfaltos oriundos do petróleo estão se tornando escassos, de maneira que a engenharia de pavimentação tem buscado melhores técnicas e métodos de conservação e restauração de rodovias, a fim de melhor utilizar os materiais presentes nos pavimentos deteriorados (COSTA; PINTO, 2011).

Figura 1 - Crescimento das áreas de mineração e diminuição das áreas de floresta no Brasil.



Fonte: Adaptado de MapBiomias, 2017.

Por estas razões, o emprego de material asfáltico fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP) têm crescido substancialmente nos últimos anos. De acordo com Noferini (2017), em países como a França, Holanda e Alemanha, o percentual de RAP disponível e reutilizado em reciclagens mornas e a quente são de 64%, 76% e 90%, respectivamente. Países como Japão e Estados Unidos também reciclam 99% do RAP gerado em novas misturas asfálticas. (WEST; COPELAND, 2015). Em razão de as misturas recicladas exigirem menor quantidade de ligante virgem e agregados adicionados, a produção destas misturas gera ainda economia e permite uma destinação adequada aos resíduos de pavimentos deteriorados (SPEIGHT, 2016).

No Brasil as técnicas de reciclagem de pavimentos já são conceitualmente difundidas, constando inclusive no Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006), órgão nacional de referência em normativos rodoviários. A utilização de RAP na execução de novos pavimentos, entretanto, ainda não é uma prática consolidada no país. Segundo experiência profissional do autor do presente trabalho, o material fresado gerado em obras rodoviárias administradas pelo poder público (União e Estados) no país é geralmente destinado à manutenção de ruas, estradas e acessos em pavimento primário, usualmente mantidas pelo poder municipal, melhorando as condições de rolagem nestes locais (Figura 2).

Figura 2 - Aplicação de material fresado em vias de revestimento primário.



Fonte: O Autor.

A melhora obtida nestas vias, entretanto, é temporária, tratando-se de uma solução paliativa, já que a condição original do leito estradal é novamente atingida em alguns meses, em razão das intempéries que com frequência deterioram este tipo de revestimento. Trata-se, portanto, de uma solução que pouco aproveita um material tão nobre quanto o RAP, que poderia trazer mais benefícios se empregado em pavimentos asfálticos novos, trazendo maior economia e vida útil.

No cenário nacional atual, quem têm conduzido a maioria das experiências com misturas recicladas em campo são as concessionárias de rodovias. O Grupo CCR, por exemplo, iniciou em 2016 a realização de testes (pistas experimentais) na rodovia SP-280 com a execução de revestimento asfáltico com 15% de adição de material fresado, tendo-se obtido resultados bastante satisfatórios. Em 2017 foram realizadas experiências também na rodovia SP-270, desta vez com adição de 20 a 25% de material fresado em misturas asfálticas a quente, sem a utilização de aditivos, com o emprego de ligante tipo CAP 30/45 (KLINSKI, 2018). Analisando-se em âmbito internacional, tratam-se de teores ainda baixos de utilização de material reciclável. No Japão, por exemplo, as misturas asfálticas contêm, em média, cerca de 47% de RAP incorporado (WEST; COPELAND, 2015).

Aprofundar as pesquisas de misturas recicladas se faz, portanto, essencial para a difusão da prática no país, e também para a potencialização do maior emprego de RAP nas usinas nacionais. Analisando-se as pesquisas recentes sobre o assunto, verifica-se o protagonismo das misturas com teores elevados de RAP (maiores que 25%), cujo emprego ainda se mostra um desafio não apenas no Brasil, mas em outros países do mundo. Em âmbito mais recente, o DNIT publicou a Resolução nº 14/2021, que estabelece que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias DNIT deverão incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento. Nesse contexto, a presente pesquisa busca estudar o desempenho das misturas asfálticas com a adição de 50% de RAP, através da incorporação de aditivo rejuvenescedor de ligante asfáltico. Paralelamente, este trabalho também visa dar continuidade às pesquisas de pavimentação no PPGECC, de forma a fortalecer esta linha de pesquisa e talvez, no futuro, consolidá-la como uma área de concentração específica do programa.

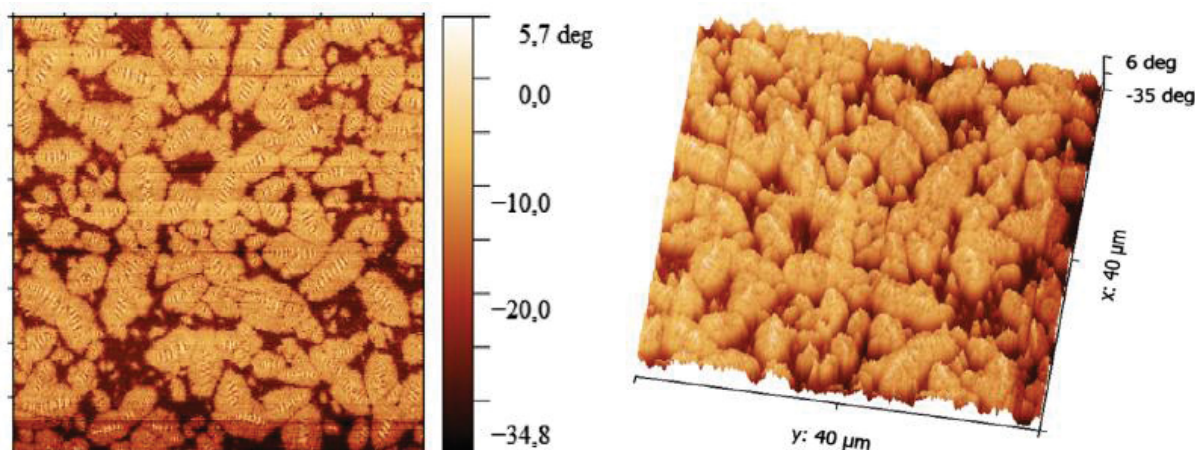
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 LIGANTE ASFÁLTICO

Também conhecidos por cimento asfáltico de petróleo, ou CAP, os ligantes asfálticos convencionais podem ser representados por um modelo coloidal, que consiste em uma fase de asfaltenos altamente polares dispersos em uma fase de maltenos (MENAPACE *et al.*, 2018). Na Europa, o método de separação química dos ligantes divide o grupo dos maltenos em outras três parcelas, sendo o sistema conhecido por SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos) (BERNUCCI *et al.*, 2010). Chen *et. al* (2018) citam que os componentes têm diferentes papéis no ligante asfáltico. Os aromáticos, que são o meio dispersante dos asfaltenos, atuam como lubrificantes na estrutura coloidal e podem reduzir a viscosidade e melhorar a fluidez do ligante. Os asfaltenos são a fase sólida da estrutura coloidal, tornando o ligante mais viscoso quando presentes em maior quantidade.

Microestruturalmente, o ligante asfáltico possui algumas listras, conhecidas como “fase abelha”, envoltas por uma grossa camada (Figura 3). Chen *et. al* (2018), apresentam indicativos de que estas listras sejam compostas por asfaltenos e ceras microcristalinas, enquanto que a camada que as envolve é formada por resinas e algum ingrediente oleoso.

Figura 3 - Diagrama de fase do ligante asfáltico obtido no microscópio de força atômica (a) em duas dimensões e (b) em três dimensões.



Chen *et. al* (2018)

2.1.1 Envelhecimento dos ligantes

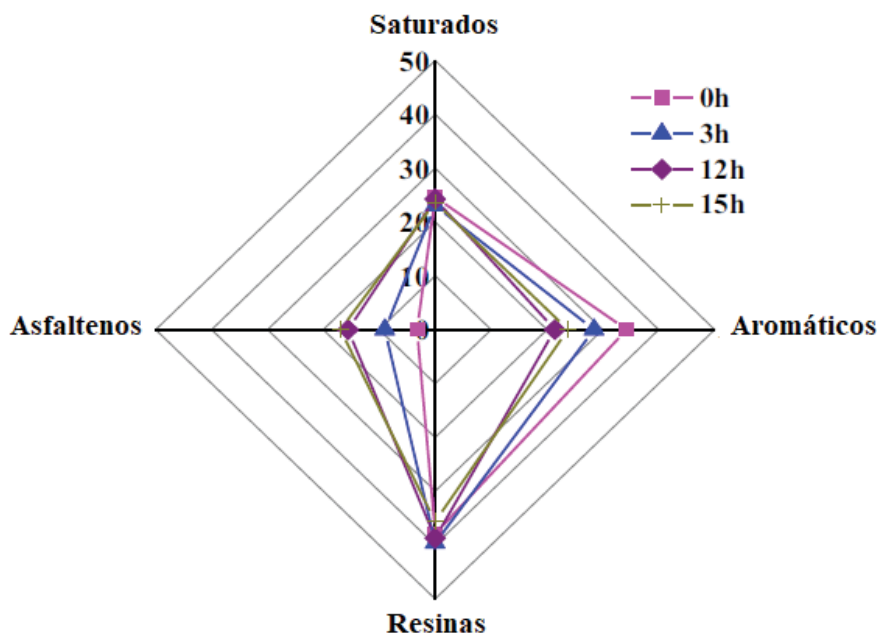
De acordo com Mallick e El-Korchi (2018), a composição do ligante asfáltico é afetada pelo ar (oxigênio), radiação ultravioleta e flutuações em temperatura. O efeito primário do envelhecimento é o endurecimento ou enrijecimento do ligante de asfalto, tanto durante o processo de produção, como durante a vida útil do pavimento. De acordo com os autores, os quatro fatores mais importantes no envelhecimento dos ligantes são:

- I. Oxidação: Os componentes do ligante de asfalto oxidam e formam moléculas mais pesadas e mais complexas, aumentando sua rigidez e diminuindo sua flexibilidade. A taxa de oxidação é afetada pela temperatura e pela espessura da película do ligante de asfalto.
- II. Volatilização: Dependendo da temperatura e da área de superfície exposta, o ligante asfáltico perde componentes mais leves por volatilização.
- III. Endurecimento estérico ou físico: A reorientação de moléculas e cristalização lenta das ceras são responsáveis por causar o endurecimento estérico do ligante de asfáltico na temperatura ambiente.
- IV. Exsudação de óleos: Dependendo da sua natureza química, bem como da porosidade do agregado, os óleos do ligante asfáltico são exsudados para o interior dos agregados.

A Figura 4 mostra a variação da composição do ligante asfáltico de acordo com o tempo de envelhecimento no ensaio *Thin Film Oven Test* (TFOT). Como mostra a Figura, quando do envelhecimento do ligante, os aromáticos e saturados são gradualmente transformados em resinas e asfaltenos, aumentando a viscosidade do composto, em razão do aumento das micelas e redução do meio dispersante com (CHEN *et. al*, 2018). Esse endurecimento, causado pela oxidação, tem efeitos tanto no ligante como na mistura asfáltica produzida, podendo causar diferentes fragilizações no pavimento após alguns anos de serviço (HUANG; BENEDETTO; 2015). O envelhecimento tende a aumentar a resistência à formação das trilhas de roda da mistura, resultando, porém, no desenvolvimento e/ou aceleração do trincamento e fratura por fadiga, trinca térmica e deterioração devido ao desgaste e à

umidade, esforços que podem levar à falência da estrutura do pavimento (MORILHA, 2004)

Figura 4 - Variação dos componentes do asfalto de acordo com o envelhecimento.



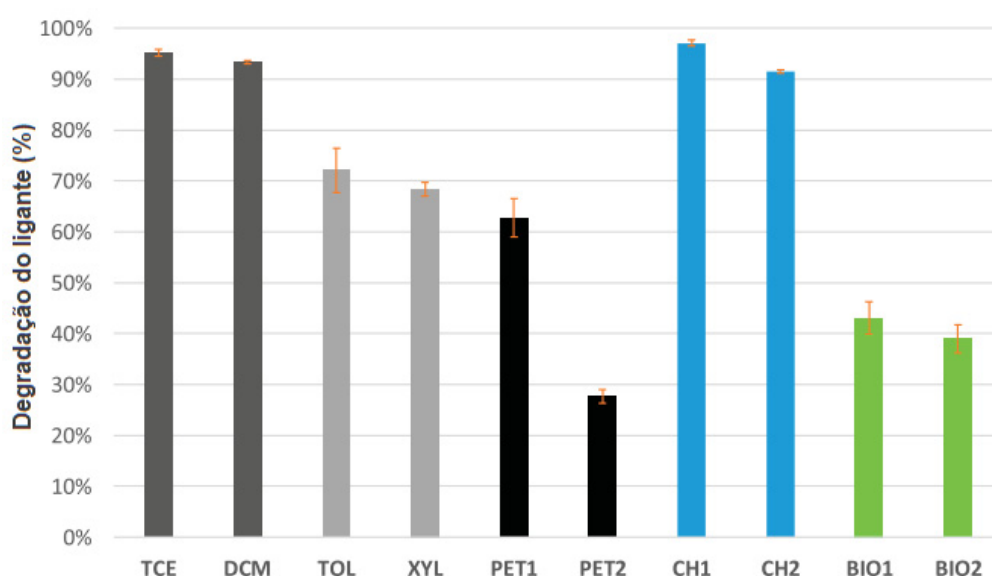
Fonte: Adaptado de Chen *et al.*, 2018, p. 180.

2.1.2 Extração e recuperação dos ligantes

De forma a permitir a realização de ensaios de caracterização do ligante presente em misturas asfálticas e determinar parâmetros como viscosidade, penetração, PG e nível de envelhecimento é necessário recuperá-lo por meio da extração e separação. A extração do ligante das misturas asfálticas, também realizada com o intuito de determinar o teor de asfalto presente na mistura, é usualmente feita por dois métodos, quais sejam o método da centrifugação, utilizando o equipamento Rotarex, e o método do refluxo, utilizando o equipamento Soxhlet. O método da centrifugação é executado a frio, enquanto o refluxo é realizado com o aquecimento do solvente. Quando se pretende recuperar o ligante (e não apenas determinar o teor de asfalto da mistura) o método de extração preferido pelos pesquisadores é o da centrifugação, em razão de envelhecer significativamente menos o ligante e ser mais seguro para operar (MIKHAILENKO; ATAELIAN; BAAJ, 2020).

Em ambos os métodos, para a diluição do ligante das amostras, é necessário o emprego de solventes. Mikhailenko, Webber e Baaj (2019) conduziram uma pesquisa aonde avaliaram diversos solventes utilizados para a extração de ligante, dentre os quais o tricloroetileno, diclorometano, tolueno, xileno, dois solventes a base de petróleo (PET1 e PET2), dois solventes orgânicos (BIO1 e BIO2) e duas misturas de solventes clorados (CH1 E CH2). Os autores concluíram que os solventes clorados (incluindo-se o tricloroetileno e o diclorometano) são os mais eficazes do ponto de vista de dissolução do ligante, conforme mostra a Figura 5. Entretanto, em razão de estes solventes serem perigosos, tanto ao usuário quanto ao meio ambiente, pesquisas em torno de solventes biológicos igualmente eficazes necessitam ser desenvolvidas (MIKHAILENKO; ATEIAN; BAAJ, 2020).

Figura 5 - Resultados do teste de degradação do ligante (PG 58-28) para diversos solventes.



Fonte: Mikhailenko, Webber e Baaj (2019).

A separação entre o solvente e o ligante se dá por meio da destilação, que é principalmente realizada por dois métodos, quais sejam o método de Abson e o rotaevaporador ou evaporador rotativo. Normalmente, as propriedades do ligante recuperado, tanto pelo método de Abson como pelo rotaevaporador, são ligeiramente mais rígidas que as propriedades do ligante original do RAP. Isto pode ser atribuído à interação do solvente com o ligante e também ao envelhecimento durante o processo

de recuperação, em razão do aquecimento. Estas diferenças, entretanto, não resultam em alterações significativas no PG do ligante recuperado (DIEFENDERFER, 2014).

O método do rotaevaporador, sobretudo, é preferido pelos os pesquisadores, em comparação ao método Abson, devido à sua capacidade de fornecer um volume maior de amostra, deixar menos solvente residual após a recuperação, causar menor endurecimento por envelhecimento e ser de mais fácil operação (MIKHAILENKO; ATAEIAN; BAAJ, 2020). Trata-se do método mais utilizado nos Estados Unidos e na Europa (HOSPODKA; HOFKO; BLAB, 2017).

Neste método, a solução de solvente e ligante asfáltico resultante da extração é colocada em um balão rotativo e destilada por imersão parcial deste balão em um banho de óleo quente. Na norma europeia (EN 12697-3) esta solução é submetida a alto vácuo e nas normas americanas (ASTM D 5404, AASHTO T 170) a vácuo parcial e fluxo de gás nitrogênio. O objetivo do uso de nitrogênio (e do vácuo parcial) nesse método é o mesmo que o do uso de dióxido de carbono no método Abson, que é minimizar o acesso de oxigênio a hidrocarbonetos suscetíveis no ligante de asfalto, limitando, desta forma, o envelhecimento no processo de recuperação (MIKHAILENKO; ATAEIAN; BAAJ, 2020).

Hospodka, Hofko e Blab (2017) comprovaram não haver alterações nas propriedades do ligante causadas pela influência da temperatura durante a destilação, desde que as juntas de vidro do rotaevaporador estejam bem vedadas. Isso evita que o oxigênio entre no evaporador agindo como um agente de oxidação. Os autores recomendam ainda que seja removida a maior quantidade de solvente possível na destilação, pois mesmo 1% de resíduo de solvente no ligante pode trazer significativa redução no módulo dinâmico do material. Desta forma, considerando-se um rotaevaporador com juntas bem seladas, deve-se aplicar no ensaio uma temperatura capaz de remover o máximo destes resíduos do ligante, mantendo suas propriedades originais.

2.1.2.1 *Performance Grade*

Existem atualmente diferentes classificações para os ligantes asfálticos. No Brasil, por exemplo, os ligantes asfálticos convencionais são comumente classificados

de acordo com os limites inferior e superior do ensaio de penetração. Já os ligantes com a adição de polímero são classificados de acordo com o desempenho aos ensaios de ponto de amolecimento e recuperação elástica. Os ligantes com adição de borracha, por sua vez, são classificados de acordo com a viscosidade. A resolução da Agência Nacional do Petróleo – ANP nº 19/2005 estabelece a classificação dos cimentos asfálticos de petróleo nacionais.

Essa classificação dos ligantes também pode se dar de acordo com o grau de desempenho ou *Performance Grade* (PG) dos ligantes. Esta classificação é fruto de uma extensa pesquisa realizada nos Estados Unidos em 1993, denominada *Strategic Highways Research Program Strategic – SHRP*, que resultou na conhecida especificação Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), hoje adotada como padrão pela AASHTO (*American Association of Highway and Transportation Officials*) e ASTM (*American Society of Testing and Materials*). O sistema de classificação através do PG é baseado na ideia de que as propriedades do ligante asfáltico devem estar relacionadas com as condições em que ele será utilizado (SPEIGHT, 2016).

As designações graduais dos ligantes são relacionadas à alta temperatura de projeto do pavimento à profundidade de 20 mm abaixo da superfície, e à baixa temperatura de projeto na superfície em si (NIKOLAIDES, 2015). No caso das altas temperaturas, a maior preocupação relacionada ao desempenho do pavimento é a ocorrência de deformação permanente, patologia que tipicamente leva tempo para se formar, razão pela qual utiliza-se no cálculo a máxima temperatura média do pavimento em 7 dias consecutivos. Já para as baixas temperaturas, a preocupação é com as trincas térmicas que ocorrem durante o período frio, utilizando-se para o cálculo a mínima temperatura atingida no pavimento (SPEIGHT, 2016).

O grau de desempenho do ligante necessário é então expresso, por exemplo, no formato PG 64-28; o qual designaria um ligante adequado para o ambiente aonde a temperatura máxima do pavimento não ultrapasse 64°C (à profundidade de 20 mm), e não seja inferior a -28°C (HUANG, 2004). A temperatura máxima nesse exemplo (64°C) é conhecida por PGH (*High Temperature Performance Grade*) e a temperatura mínima (-28°C) por PGL (*Low Temperature Performance Grade*)

A especificação dos ligantes baseada no PG dos ligantes é determinada pela norma ASTM D 6373-16. Para conseguir realizar esta classificação, são necessários

ensaios do ligante nas condições original e de envelhecimento de curto prazo, simulado através do RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) e longo prazo, simulado através do PAV (*Pressure Aging Vessel*).

2.2 MISTURAS RECICLADAS

O ligante asfáltico remanescente em pavimentos antigos, mesmo envelhecido, é um recurso valioso. A reutilização desse ligante, assim como dos agregados removidos desses pavimentos é uma das vantagens da produção das misturas asfálticas recicladas (DNIT, 2006). Este tipo de mistura é assim denominado em razão de empregar em sua composição materiais recicláveis, neste caso o material fresado, que consiste do pavimento antigo desbastado pela operação de fresagem. Internacionalmente, este material é conhecido por RAP (do inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement*).

Usualmente o RAP produzido pela fresagem do revestimento é descartado ou subutilizado, mas fatores como economia financeira e os benefícios ambientais têm influenciado seu emprego em pavimentos novos nos últimos anos. Trata-se de uma alternativa útil, uma vez que reduz a necessidade de utilização de ligantes virgens, economizando energia, custos de transporte e recursos naturais. Essa adição, entretanto, altera as propriedades mecânicas das misturas (como resistência e durabilidade) e impacta no seu desempenho em campo, principalmente em razão da presença do ligante envelhecido, que tem composição química e propriedades diferentes dos ligantes virgens adicionados durante o processo de mistura (SPEIGHT, 2016). Contudo, através da adição de agentes rejuvenescedores é possível reestabelecer as condições originais desse ligante asfáltico (DNIT, 2006).

2.2.1 Agentes rejuvenescedores

Na tentativa de mitigar o aumento de rigidez conferido às misturas asfálticas pela adição de RAP, algumas agências rodoviárias recomendam que o ligante virgem utilizado na mistura possua viscosidade menor. Porém, quando o ligante presente no

RAP é altamente envelhecido, a mistura resultante pode ser muito rígida, mesmo utilizando um ligante menos viscoso (ARÁMBULA-MERCADO *et al*, 2018), de forma que se faz necessária a adição de agentes rejuvenescedores (AR).

Esses agentes consistem basicamente de óleos rejuvenescedores orgânicos, emulsões rejuvenescedoras ou ligante asfáltico de baixa consistência, adicionados com o objetivo de repor a fração de maltenos (saturados, aromáticos e resinas) do ligante, perdida durante o processo de envelhecimento, e assim restaurar as suas propriedades mecânicas. Os ARs são produtos capazes de recuperar características do ligante como penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, sendo este último um fator importante para o processo de mistura a quente. Conforme ARRA (2015), no contexto de reciclagem a quente, de forma a atingir seu propósito, o agente rejuvenescedor deve ser:

- fácil de dispersar na mistura reciclada;
- compatível com o ligante asfáltico envelhecido;
- capaz de redispersar os asfaltenos no ligante envelhecido;
- capaz de alterar as propriedades do ligante asfáltico envelhecido até o nível desejado;
- resistente ao enrijecimento excessivo causado pela usinagem a quente, para garantir durabilidade a longo prazo;
- uniforme/consistente entre os lotes;
- baixo em compostos orgânicos voláteis ou contaminantes para minimizar a geração de fumaça e perda de voláteis durante a construção.

A classificação dos ARs de base asfáltica, mostrada na Tabela 1, é dada pela Portaria nº 44 de 29/09/1997, emitida pelo Departamento Nacional de Combustíveis.

Tabela 1 - Classificação dos agentes rejuvenescedores de base asfáltica.

Características	Unid.	Especificações						Métodos	
		AR 1	AR 5	AR 25	AR 75	AR 250	AR 500	ABNT	ASTM
		Mín-máx	Mín-Máx	Mín-Máx	Mín-Máx	Mín-Máx	Mín-Máx		
Viscosidade a 60°C, Cinemática	cSt	50-175	176-900	901-4500	4501-2500	12501-37500	37501-60000	MB 826	D2170
Ponto de Fulgor (Vaso Aberto de Cleveland)	°C	218	218	218	218	218	218	NBR 11341	D 92
Teor de Saturados, % Massa	%	30	30	30	30	30	30	-	D2007
Efeito do Calor e do Ar a 163°C, (RTFOT ou TFOT):		4	4	4	4	4	4	-	D2872 ou D1754
Razão de Viscosidade (a 60°C após e antes o ensaio RTFOT ou TFOT)		4	4	3	3	3	3	MB 425	

Fonte: Adaptado da Portaria DNC nº 44 de 29/09/1997 publicada pela ANP.

Esses agentes, derivados do petróleo, são hidrocarbonetos especialmente refinados para possuir em sua composição química uma alta fração de maltenos, de forma a repor a fração que se perde no processo de envelhecimento (DNIT, 2006). A determinação do AR a ser utilizado depende das características de envelhecimento do ligante a ser rejuvenescido, de forma que quanto mais envelhecido o ligante, menos consistente deve ser o AR.

Os agentes rejuvenescedores conhecidos por orgânicos, por sua vez, consistem de óleos de base vegetal ou biológica, produzidos para essa finalidade. Este tipo de AR requer doses menores em comparação aos rejuvenescedores de petróleo, para causar um efeito amolecedor semelhante ao ligante envelhecido contido no RAP (ZAUMANIS *et al.*, 2014). Corroborando com essa conclusão, Kaseer *et al.* (2018b) demonstraram que os óleos de resina (*tall oils*), óleos vegetais e óleos de base biológica exigem menores doses para reduzir o PG de alta temperatura (PGH) do ligante reciclado em comparação com produtos à base de petróleo.

A viscosidade do agente rejuvenescedor é um fator importante para a eficiência rejuvenescedora das misturas de asfalto recicladas contendo altos teores de RAP, conforme demonstrado por Zhang *et al.* (2020). Agentes rejuvenescedores muito viscosos têm maior dificuldade de difundir no ligante presente no RAP durante a mistura, de forma que o ligante envelhecido não consegue ser adequadamente

rejuvenescido. Aditivos menos viscosos têm maior eficiência rejuvenescedora, melhorando a difusão e resultando em misturas mais flexíveis.

Em nível microscópico, o efeito dos agentes rejuvenescedores no ligante foi avaliado por Chen *et al.* (2018). Os autores efetuaram a análise do ligante através do microscópio de força atômica (*Atomic Force Microscope - AFM*) e dos ensaios convencionais de laboratório: ponto de amolecimento, penetração, ductilidade e viscosidade. Foram testados ligante virgem e ligantes envelhecidos com posterior adição de AR nos teores de 6, 8, 10 e 12% em massa. Como já era esperado, verificou-se que o envelhecimento do ligante virgem a longo prazo aumentou a viscosidade e o ponto de amolecimento, reduzindo a penetração, fatores relacionados com a perda de aromáticos. Com adição de AR ao ligante envelhecido, entretanto, obteve-se um notável impacto na recuperação de suas propriedades, tendo ainda o teor de 12% recuperado a penetração e viscosidade aos mesmos níveis do ligante original. A recuperação do ligante, entretanto, não se manteve após novo ensaio de envelhecimento, o que mostra que o desempenho antienvelhecimento do agente rejuvenescedor ainda é insuficiente a longo prazo. Isto se dá em razão, principalmente, de sua composição possuir altas concentrações de componentes leves, que são volatilizados durante os testes de envelhecimento. Os autores concluíram, por fim, que o rejuvenescimento é um processo físico, e que a adição de AR não altera a microestrutura dos componentes do ligante asfáltico.

2.2.1.1 Dosagem dos agentes rejuvenescedores

A dosagem dos agentes rejuvenescedores nas misturas asfálticas deve ser cuidadosamente determinada, uma vez que afeta diretamente no desempenho dessas misturas. Quando se trabalha com alto teor de RAP, esta dosagem de AR possui forte dependência do grau de envelhecimento do ligante, podendo até ser inviabilizada. O processo de rejuvenescimento do ligante recuperado do RAP ainda se trata de uma lacuna de conhecimento (GADLER, 2018), que necessita ser melhor explorada.

É sabido, contudo, que dosagens excessivas amolecerão excessivamente o ligante, impactando no desempenho à deformação permanente, enquanto que dosagens insuficientes não terão o efeito desejado na melhoria de resistência ao

trincamento (ARÁMBULA-MERCADO *et. al*, 2018). Desenvolver pavimentos de concreto asfáltico resistentes às trincas e também à deformação permanente é um desafio constante na indústria, o que requer melhorias de materiais e de técnicas de avaliação de desempenho (ESPINOZA-LUQUE; AL-QADI; OZER 2018). No caso das misturas recicladas, a dosagem do AR é fundamental para garantir esse balanço.

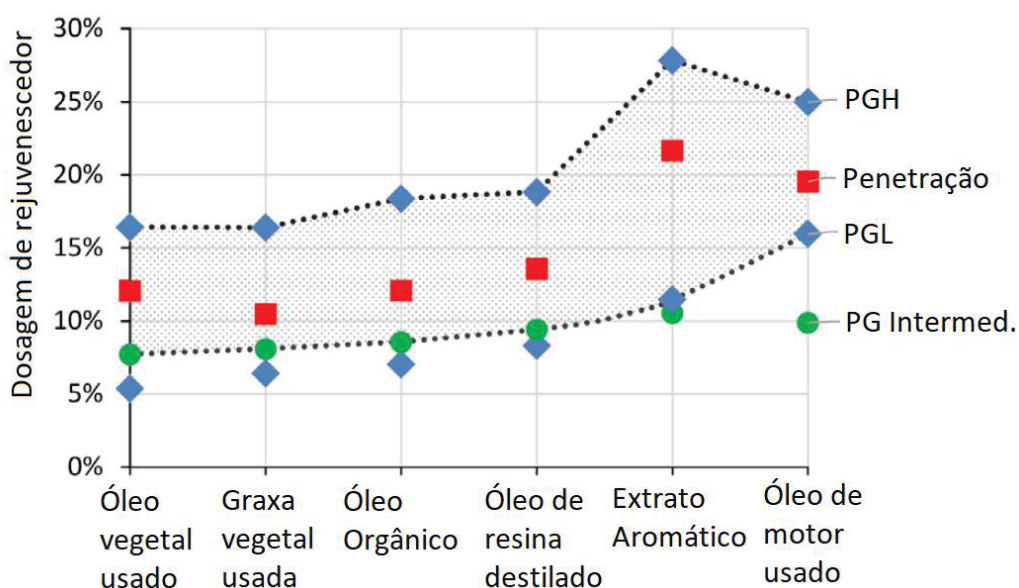
A recuperação de alguma propriedade do ligante asfáltico (penetração, viscosidade, ponto de amolecimento) é usualmente utilizada como método para a dosagem do AR. Gadler (2018), por exemplo, elaborou uma pesquisa que avaliou a adição de RAP e resíduos de construção civil em substituição à fração miúda e graúda da granulometria de misturas asfálticas mornas. A metodologia de dosagem utilizada pela autora foi a adição da porcentagem de AR necessária para recuperação das propriedades físicas de viscosidade e penetração do ligante envelhecido, de forma a se aproximar dos valores do ligante original, naquele caso o CAP 50/70. A porcentagem de AR necessária para a mistura elaborada na pesquisa foi de 40% em peso de ligante, teor considerado alto quando comparado com outras pesquisas. O teor elevado estaria relacionado ao alto grau de envelhecimento do ligante presente no agregado e à eficiência do AR utilizado. Conforme a autora, teores inferiores de AR não conseguiriam reduzir a viscosidade do ligante envelhecido adequadamente, exigindo temperaturas excessivamente altas de usinagem e compactação. Os resultados obtidos pela autora com a mistura de 100% de RAP, entretanto, levaram a crer que esta metodologia de dosagem do AR (baseada na recuperação das propriedades de viscosidade e penetração) pode não ser a mais adequada para misturas com altos teores de RAP.

Mais recentemente, outras pesquisas têm buscado utilizar propriedades reológicas como parâmetro para a dosagem do AR. Na pesquisa de Im *et al.* (2016) os autores buscaram determinar a faixa de dosagem de AR para misturas asfálticas com adição de 30% de RAP, utilizando três agentes rejuvenescedores disponíveis no mercado americano. Misturando-se os ligantes virgem e envelhecido na proporção de 30-70 (ligante envelhecido-virgem), adicionou-se AR nas proporções de 0, 2, 5 e 10% e as amostras resultantes foram submetidas ao ensaio DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) de forma a se obter PG para cada ligante. Limitando-se o PG das amostras ensaiadas aos valores máximos e mínimos do PG do ligante padrão utilizado, pôde-se estabelecer uma faixa inicial para dosagem do agente

rejuvenescedor. Dentro dessa faixa, o valor ótimo foi atingido verificando-se o desempenho das misturas asfálticas aos ensaios de resistência ao trincamento e à deformação permanente. Os valores para o teor ótimo variaram entre 2,2 e 3,2% do total de ligante, dependendo do AR utilizado. Comprovou-se que a dosagem ótima de rejuvenescedor nem sempre segue o recomendado pelo fabricante, quando analisados os parâmetros supracitados.

A determinação do teor ótimo de agente rejuvenescedor em ligantes extraídos do RAP foi explorada também por Zaumanis, Mallick e Frank (2014), que analisaram a adição de seis agentes rejuvenescedores (quatro orgânicos e dois derivados do petróleo), em duas doses, em um ligante extraído de uma fonte de RAP. Os autores estimaram inicialmente o teor ótimo a partir da recuperação da penetração do ligante envelhecido, posteriormente refinando o valor de forma a se atingir a temperatura máxima (PGH), mínima (PGL) e intermediária do PG pretendido, estabelecido pelo ligante original virgem. Os resultados são mostrados na Figura 6, aonde pode-se perceber a diferença entre as dosagens mínimas encontradas, para recuperação dos diferentes parâmetros do ligante virgem. Por fim, o autor cita também que a penetração aumenta exponencialmente em função do teor de AR adicionado, bastando-se obter dois resultados para um mesmo ligante e AR para se determinar a equação de correlação.

Figura 6 - Diferentes dosagens de AR em função da penetração e PG do ligante virgem (PG 64-22).



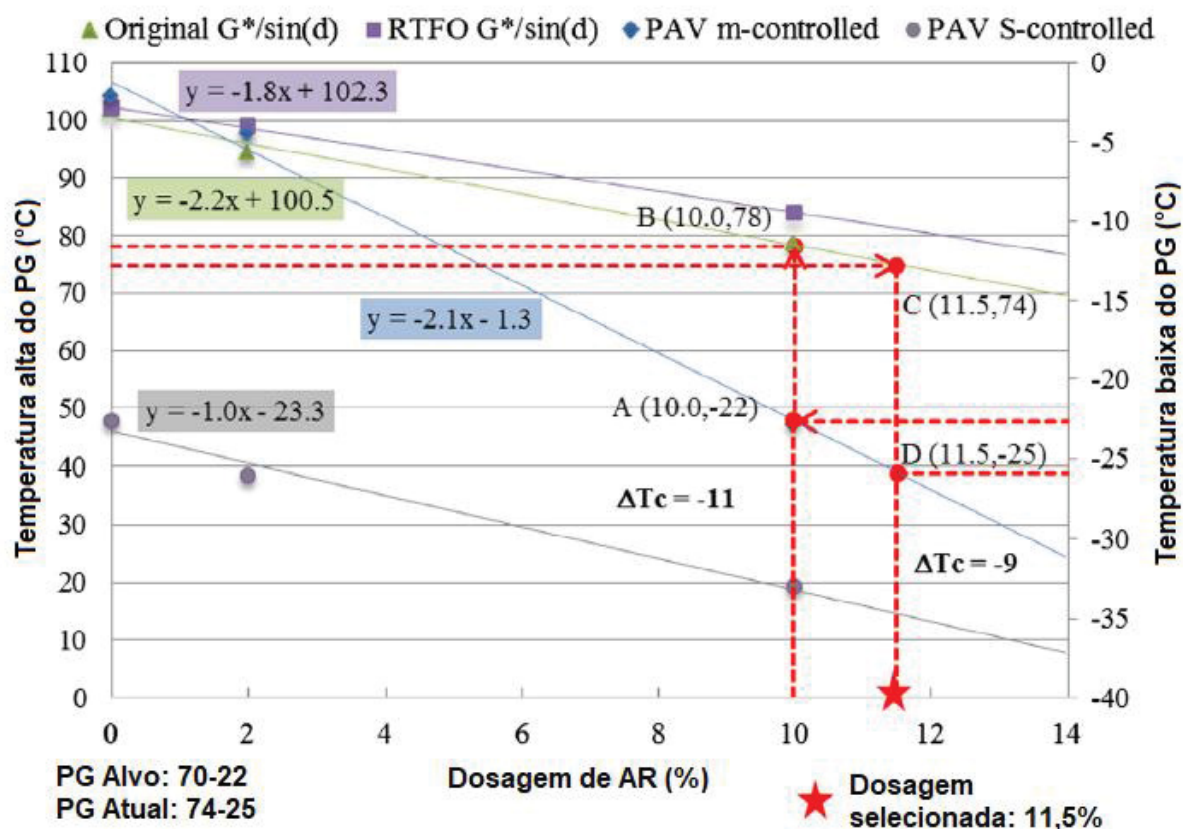
Fonte: Zaumanis, Mallick e Frank (2014).

Os autores concluíram que a dosagem de todos os rejuvenescedores utilizados pode ser otimizada pela penetração e PG do ligante virgem, sendo que os orgânicos requerem menores doses em relação aos derivados do petróleo para causar o mesmo efeito no ligante envelhecido. Os autores avaliaram apenas uma fonte de RAP, de forma que sugerem a validação do método apresentado para outras fontes diversas.

Mais recentemente, Arámbula-Mercado *et al.* (2018) avaliaram três diferentes metodologias de dosagem de agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas com adição de RAP e telhas asfálticas recicladas, utilizando ainda 4 tipos de rejuvenescedores diferentes. Os métodos avaliados foram a restauração do PGH, do PGL e do parâmetro ΔT_c (diferença de temperaturas do ensaio *Bending Beam Rheometer*, que não foi realizado nesta pesquisa). Os autores afirmam que a dosagem de AR é determinada em função do PG pretendido para o ligante resultante, o tipo de material reciclável adicionado, o nível de envelhecimento deste material e a proporção de adição na mistura. Os autores concluíram que o método mais efetivo para adição de rejuvenescedor à mistura de ligantes (ligante envelhecido e ligante virgem) é restaurando o PG de alta temperatura, ou PGH. A conclusão foi obtida em razão dos resultados satisfatórios obtidos com esse método de dosagem nas propriedades de rigidez e ângulo de fase do ligante resultante, propriedades estas que se mantiveram satisfatoriamente após envelhecimento. O processo gráfico para determinação da dosagem ótima pelo PGH e PGL é mostrado na Figura 7. No caso do PGL, fez-se uso dos resultados de envelhecimento a longo prazo, no vaso de pressão (*Pressure Aging Vessel* - PAV), controlando-se os parâmetros de rigidez (S) e relaxação (m) da amostra.

Em relação ao método de incorporação do AR à mistura, os autores sugerem que se adote o conceito prático: para dosagens de rejuvenescedor inferiores à 2%, apenas adiciona-se o AR à mistura (método da adição); para dosagens superiores a 2%, desconta-se a quantidade de AR adicionada do teor de total de ligante da mistura resultante (método da substituição).

Figura 7 - Dosagem do AR pelo PGH e PGL.



Fonte: Adaptado de Arámbula-Mercado *et al.* (2018).

A técnica de dosagem sugerida por Arámbula-Mercado *et al.* (2018) foi validada por Kaseer *et al.* (2018a), que avaliaram o desempenho de pavimentos rejuvenescidos aplicados em algumas regiões e climas dos Estados Unidos, considerando vários teores de AR. Os autores compararam a dosagem dos rejuvenescedores utilizada em projetos de campo executados em cinco estados do país, utilizando as metodologias de dosagem de cada departamento estadual de transportes, com a dosagem obtida pelo método sugerido por Arámbula-Mercado *et al.* (2018). Os resultados obtidos na pesquisa mostraram desempenho superior das misturas dosadas pelo PGH, em relação àquelas executadas em campo e dosadas pelas metodologias individuais dos departamentos de transportes. Os teores de AR das primeiras, entretanto, foram consideravelmente maiores que os teores adotados pelos departamentos de transportes, promovendo a maior redução da rigidez e aumento da resistência ao trincamento, e mantendo-se a resistência à deformação permanente após o envelhecimento de curto-prazo. Constatou-se também que a metodologia de dosagem pelo PGH facilita o uso de maior porcentagem de RAP na mistura asfáltica.

Há que se considerar, contudo, que apesar de propiciarem uma excelente avaliação quanto as propriedades e comportamento dos ligantes com AR, a dosagem pelo grau PG não leva em consideração parâmetros provenientes de ensaios de fadiga recentemente desenvolvidos como o *Linear Amplitude Sweep* - LAS. O parâmetro de fadiga considerado na metodologia SUPERPAVE, $|G^*|_{sen}$, não avalia o desempenho do ligante em deformações elevadas, fora do regime viscoelástico linear (RAUL, 2019). Por conta disso, Raul (2019) sugere análise de alguns parâmetros da mistura de ligante + AR para determinar a dosagem ideal, dos quais pode-se se citar os ensaios de LAS, *Bending Beam Rheometer* - BBR, módulo de cisalhamento dinâmico, ângulo de fase e determinação de curva mestra. Para cada parâmetro foram elaborados *blending charts* de forma a possibilitar a dosagem do teor ótimo, que no caso do autor foi de 8,0%.

A pesquisa de Farooq, Mir e Sharma (2018) buscou determinar a dosagem ótima de rejuvenescedor para misturas mornas com diversas proporções de RAP adicionado, sendo estas de 20, 30, 40, 50 e 60% de RAP. Para cada uma das misturas, foram testadas as dosagens de 10%, 12,5%, 15%, 17,5% e 20% de AR (óleo de máquinas usado), em peso de ligante envelhecido do RAP. Os resultados mostraram que uma maior adição de RAP aumenta a estabilidade Marshall da mistura, assim como a compactabilidade e o volume de vazios, diminuindo, entretanto, a densidade, resistência à tração indireta, resistência à compressão e cobertura de agregados pelo ligante. A maior adição de rejuvenescedor, por sua vez, diminui a estabilidade, suscetibilidade à umidade, volume de vazios, compactabilidade e as resistências à compressão e à tração indireta, aumentando os parâmetros de densidade e cobertura de ligante nos agregados.

Os resultados de Farooq, Mir e Sharma (2018) permitiram ainda que fosse estabelecida uma faixa ótima de adição de AR para cada percentual de RAP adicionado a mistura. Os autores concluíram também que, sem rejuvenescedor, misturas com adição de até 20% de RAP podem ser produzidas atendendo aos parâmetros dos ensaios realizados. Noferini *et al.* (2017) concluíram também que a presença de 10% em massa de ligante reciclado na mistura não afeta sua viscosidade e tem pouca influência na reologia da mistura. A presença de 20% ou mais de ligante envelhecido, entretanto, causa um incremento significativo da viscosidade, situação em que é recomendado o uso de um ligante virgem menos viscoso ou adição de AR.

Em suma, a adição de rejuvenescedores ao ligante extraído do RAP permite verificar a eficiência de amolecimento desses produtos, e também determinar a dose de AR necessária para atender aos requisitos de especificação do ligante virgem. No entanto, esse processo simula artificialmente uma mistura completa entre o rejuvenescedor e o ligante do RAP, o que pode não ser verdade quando da produção das misturas asfálticas (ZAUMANIS *et al.*, 2014), como será visto no próximo capítulo.

2.2.2 Interação entre ligante virgem e ligante rejuvenescido

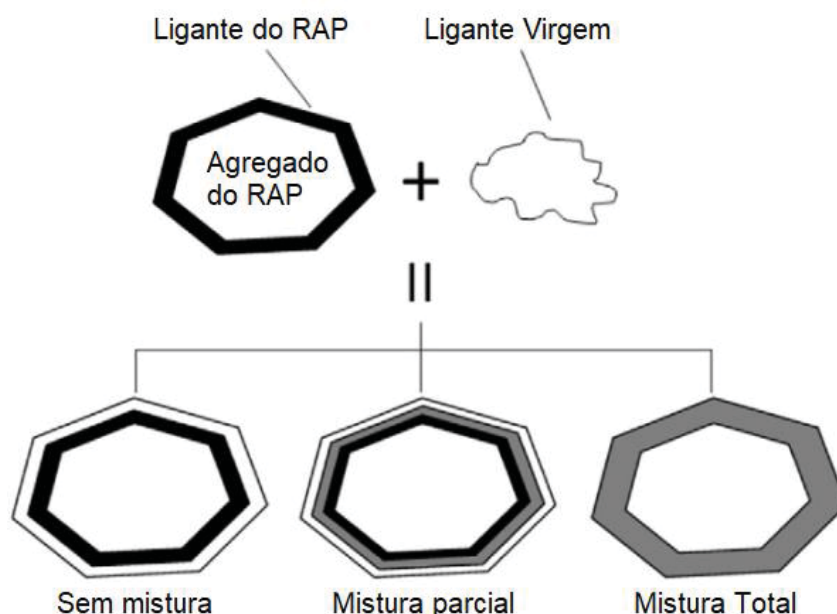
Uma preocupação que afeta diretamente o desempenho das misturas com incorporação de RAP refere-se ao nível de interação que ocorre entre os ligantes de asfalto residuais e virgens. Esse nível de mistura afeta tanto o desempenho das misturas recicladas quanto a vantajosidade econômica do processo de reciclagem (AL-QADI; ELSEIFI; CARPENTER, 2007). O mesmo pode ser dito da interação entre o ligante envelhecido e o agente rejuvenescedor.

Ao discutir a ativação do ligante contido no RAP, é importante distinguir entre o nível de ativação e o nível de mistura do ligante do RAP (*Degree of Blending*). Alguns autores usam os dois termos de forma intercambiável, no entanto, o primeiro indica a quantidade de ligante do RAP que se torna fluido e é reativado quando da mistura, enquanto o segundo indica quão bem ou em que medida o ligante envelhecido e o ligante virgem efetivamente se misturam (KASEER; ARÁMBULA-MERCADO; MARTIN, 2019).

Quanto à combinação de RAP e ligantes virgens, de acordo com Xu *et al.* (2018) existem três teorias controversas. A primeira é a “*Black Rock Theory*”, que considera o RAP simplesmente como agregado negro na mistura reciclada, sem o efeito do ligante envelhecido. A segunda é a “*Complete Blending Theory*”, que sugere que 100% do ligante RAP se mistura com o ligante virgem e este conjunto age como o ligante asfáltico na mistura reciclada. A terceira seria a “*Partial Blending Theory*” que propõe que apenas parte do ligante no RAP reage com o ligante virgem. Copeland (2011) afirma que é mais provável que o nível de interação entre o ligante envelhecido e o ligante virgem situe-se entre a mistura completa e nenhuma mistura, acordando, portanto, com a teoria da mistura parcial. A Figura 8 demonstra de forma esquemática

as três teorias, aonde o ligante que permanece na cor preta após a mistura é aquele considerado inativo.

Figura 8 - Diferentes cenários de misturas entre os ligantes virgem e envelhecido



Fonte: Adaptado de Bowers (2013, p.8).

Se o projetista presumir que os materiais se misturam totalmente quando na realidade o RAP se comporta como agregado negro (*black rock*), o ligante não será suficientemente rígido e a quantidade de asfalto será insuficiente. Por outro lado, se for assumido que o RAP não se mistura com o ligante virgem quando na realidade está se misturando, o ligante será mais rígido do que o esperado e resultará em uma mistura demasiadamente rica em asfalto (AL-QADI; ELSEIFI; CARPENTER, 2007). Ambos os cenários são desfavoráveis ao desempenho mecânico das misturas recicladas.

A interação entre os ligantes também foi analisada por Gennesseaux (2015), que produziu misturas asfálticas mornas com 50% de RAP, considerando-se os cenários de 0%, 50% e 100% de aproveitamento do ligante do RAP. A autora concluiu que se pode considerar uma ativação do ligante do RAP igual ou próxima de 100% na dosagem destas misturas, pois o ligante do RAP, mesmo envelhecido, ainda possui propriedades viscoelásticas. A autora ressalta ainda que o RAP não deve ser

considerado na mistura como agregado negro (*black rock*), mas sim uma combinação de ligante e agregados.

Segundo Xu *et al.*, (2018), fatores que exercem significativa influência na mistura entre os ligantes virgem e residual são a temperatura e o tempo em que esta mistura se consolida (tempo em que a interação entre ligantes continua ocorrendo). Para os autores, com a diminuição da temperatura de mistura, a difusão é prejudicada, levando a uma maior concentração do ligante virgem nas camadas externas do RAP e, por sua vez, menor interação com as camadas internas do ligante do RAP. Ainda, com o passar do tempo, alguns componentes no ligante virgem externo, como os aromáticos, gradualmente se dispersam no ligante interno do RAP, ocorrendo a troca de alguns componentes polares, como os asfaltenos. Após um período de tempo suficientemente longo, os ligantes virgens e do RAP podem atingir então uma mistura completa e homogênea. Em ambientes mais frios, portanto, essa situação demoraria mais a ocorrer.

Gaspar (2019) concluiu haver uma menor interação entre os ligantes quanto maior for o teor de RAP na mistura. O autor investigou essa interação através da produção de misturas mornas com diferentes teores de RAP (0, 25 e 60%), das quais extraiu-se o ligante em 3 etapas. O processo demonstrou haver diferença nas propriedades reológicas dos ligantes extraídos em cada etapa, sendo que as camadas de ligante internas (mais próximas do agregado), extraídas nas etapas 2 e 3, eram mais rígidas que os extraídos na etapa 1 (camada mais superficial). Através do método de extração por etapas, o autor concluiu que uma maior homogeneidade na mistura entre ligantes é obtida quando o RAP é aquecido separadamente na temperatura de usinagem, ao invés do aquecimento indireto por meio da mistura com agregados virgens superaquecidos.

Para garantir o melhor rejuvenescimento do ligante do RAP, Poirot, Decamps e Faucon-Dumont (2018) produziram misturas com 40% de RAP adicionando-se o AR diretamente ao RAP na usina, através de bicos espargidores posicionados sobre a esteira de transporte, como mostra a Figura 9. Na sequência este composto RAP+AR foi misturado com o agregado superaquecido, aquecendo o RAP de maneira indireta para a usinagem. Os autores conduziram então um experimento para verificar o grau de ativação do ligante do RAP, através da extração de ligante de uma amostra de mistura asfáltica solta após a usinagem. Durante vários momentos da extração, foram

recolhidas amostras de ligante diluído e analisados por espectrometria infravermelha, de forma a verificar o Índice de Carbonila, como um indicador da oxidação do ligante. Nos vários momentos da extração este índice se mostrou constante, comprovando a homogeneidade do ligante na mistura e indicando um bom grau de reativação do ligante envelhecido.

Figura 9 - Adição de AR diretamente ao RAP na esteira.



Fonte: Poirot e Bell, 2019

Na tentativa de tornar prática essa determinação do teor de interação entre os ligantes, Kaseer Arámbula-Mercado e Martin (2019) propuseram um método para a estimativa do fator de disponibilidade de ligante (*Binder Availability Factor*). O método consiste em se produzirem misturas recicladas e virgens controlando a granulometria do RAP e do agregado virgem adicionados, de forma que estes possam ser novamente separados após a usinagem. Através da análise da diferença entre os teores encontrados nas frações separadas, da mistura reciclada e da mistura virgem, os autores propuseram uma estimativa para o grau de ativação do ligante. O método foi aplicado em 7 diferentes tipos de RAP, tendo-se obtido fatores da ordem de 50 a 95%, dependendo da origem do RAP e da temperatura de mistura. Segundo os

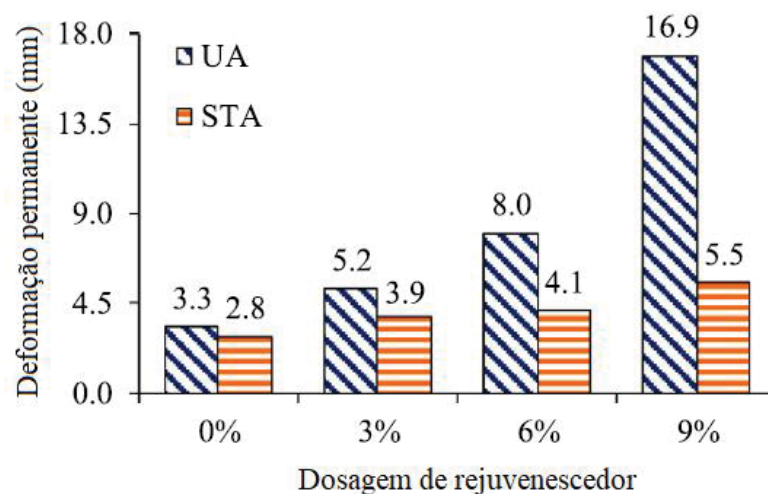
autores, quanto menor o PGH do ligante e maior a temperatura de mistura, maior será o fator de ativação.

2.2.3 Desempenho das misturas asfálticas recicladas

Em termos de desempenho, pesquisas da área já demonstraram que é possível obter resultados superiores para as misturas asfálticas recicladas, em relação às misturas convencionais. Muitas pesquisas mostram também que o efeito da simples adição de RAP à mistura asfáltica provoca o enrijecimento da mesma, o que tem impactos positivos em termos de resistência à deformação permanente, porém negativos em termos de resistência à fadiga. O inverso ocorre quando da adição dos agentes rejuvenescedores, que resultam no amolecimento do ligante envelhecido presente no RAP e, como consequência, na maior flexibilidade da mistura asfáltica.

Espinoza-Luque, Al-Qadi e Ozer (2018) estudaram a capacidade dos rejuvenescedores na melhoria do desempenho e durabilidade das misturas asfálticas no estado de Illinois, Estados Unidos, avaliando também o comportamento das misturas rejuvenescidas no envelhecimento de curto prazo. Os autores utilizaram um rejuvenescedor composto por 75% de aromáticos e praticamente livre de asfaltenos, adicionado diretamente em uma mistura aquecida contendo 15% de RAP, nas proporções de 0, 3, 6 e 9% do peso total de ligante da mistura (ligante novo mais ligante envelhecido). As misturas com AR foram colocadas em estufa por 2 horas de forma a atingir a faixa de temperatura de compactação e permitir uma melhor mistura e dispersão do rejuvenescedor. Outro grupo de amostras foi inserido na estufa por mais 2 horas, simulando o envelhecimento de curto prazo, ou *Short Term Aging* (STA). Os autores verificaram, como esperado, que a mistura fica mais flexível com o aumento do teor de rejuvenescedor e, conseqüentemente, mais suscetível à deformação permanente. O envelhecimento a curto-prazo, entretanto, provoca redução da deformação permanente, como pode ser visto na Figura 10, que resume os resultados dos ensaios *Hamburg Wheel Test Track* (HWTT) para as misturas não envelhecidas (UA) e envelhecidas a curto prazo (STA).

Figura 10 - Profundidade de deformação permanente após 10.000 passadas.

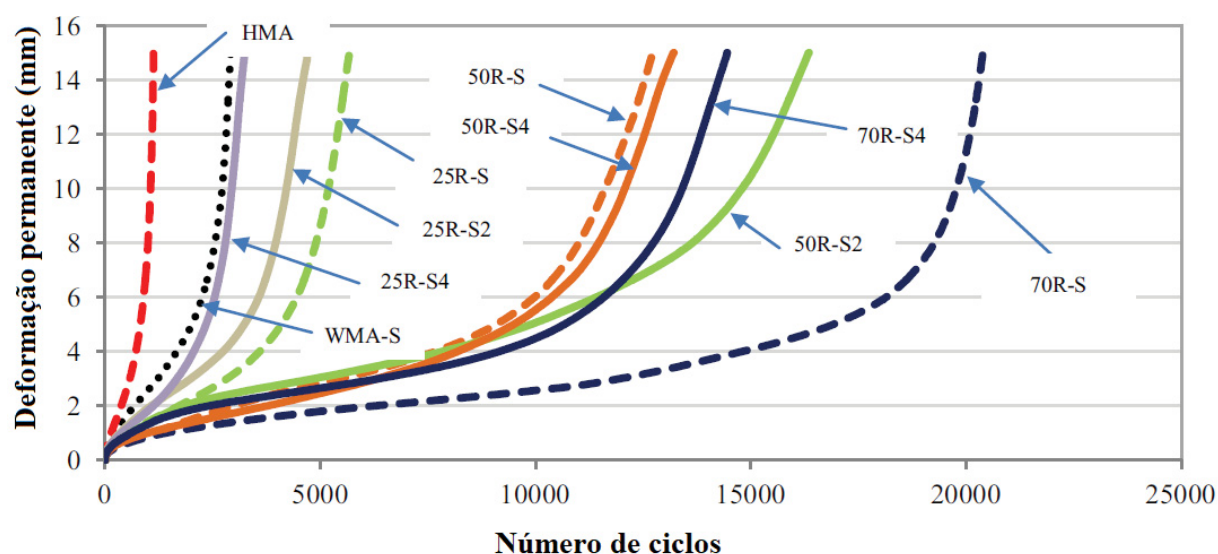


Fonte: Adaptado de Espinoza-Luque, Al-Qadi e Ozer, 2018, p. 646.

Song, Huang e Shu (2018) avaliaram os efeitos da tecnologia de misturas mornas e dos rejuvenescedores na deformação permanente, na resistência ao trincamento e na suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas. Foram produzidos três tipos de misturas asfálticas, sendo uma com 50% de RAP, uma com 50% de RAP e rejuvenescedor e uma mistura morna com 50% de RAP. Os autores também concluíram que a adição de rejuvenescedor melhora o desempenho ao trincamento da mistura e a resistência à umidade, comprometendo consideravelmente, entretanto, o desempenho à deformação permanente.

Lu, Saleh e Nguyen (2019) estudaram o efeito de diferentes métodos de mistura do AR ao ligante em misturas mornas com adição de RAP. Foram produzidas cinco misturas diferentes, sendo uma mistura a quente convencional (HMA), uma mistura morna convencional (WMA) e três misturas mornas com adição de 25%, 50% e 70% de RAP, denominadas 25R, 50R e 70R. Para as misturas mornas foi utilizado aditivo surfactante na proporção de 0,5% por peso do ligante. Nas misturas com RAP incorporado procedeu-se a adição de 2% de AR através do método de adição no ligante aquecido antes de misturá-lo (misturas com final “S”) e dos teores de 2% (misturas com final S2) e 4% (misturas com final S4) de AR através do método de adição diretamente no RAP. As misturas foram submetidas ao ensaio de deformação permanente através de um método novo, que não confina a amostra ensaiada, permitindo não apenas a consolidação vertical da amostra, mas também as deformações horizontais. A Figura 11 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

Figura 11 - Gráfico de número de ciclos/passadas por profundidade de deformação permanente.



Fonte: Adaptado de Lu, Saleh e Nguyen, 2019, p. 801.

O estudo de Lu, Saleh e Nguyen (2019) deixou claro que a resistência à deformação permanente aumenta com o aumento da porcentagem de RAP na mistura, e diminui com o aumento da porcentagem de AR. Tais resultados são atribuídos ao aumento de flexibilidade e redução da viscosidade proporcionado pela adição de rejuvenescedor na mistura, em contraponto ao aumento de rigidez causado pela adição de RAP, cujo ligante encontra-se em estado envelhecido. O estudo também constatou que, quando o conteúdo do RAP é inferior a 50%, o comportamento mecânico das amostras não mudou significativamente de acordo com o método de mistura. Entretanto, para teores de RAP iguais ou superiores a 50%, constatou-se que adicionar rejuvenescedor diretamente ao RAP melhorou significativamente a resistência à umidade das misturas mornas, tendo havido melhor mistura entre o ligante envelhecido e o ligante virgem. Os autores concluíram que essa adição do AR diretamente no RAP é mais eficaz do que adicionar o rejuvenescedor ao ligante quente antes da mistura, visto que no segundo caso, uma parte do AR contido no ligante virgem pode não entrar em contato com o ligante envelhecido do RAP durante o tempo reduzido da mistura. Na adição direta, esse AR é misturado somente com o RAP por alguns segundos, antes da adição do ligante e agregados virgens. Dessa forma, o produto age diretamente no ligante envelhecido do RAP, cujo rejuvenescimento é o objetivo da adição.

Zhang *et al.* (2020) fizeram a dosagem de misturas asfálticas contendo 60% de RAP, utilizando-se 4 diferentes agentes rejuvenescedores, quais sejam: óleo de motor usado, óleo vegetal, ligante asfáltico macio e rejuvenescedor composto (óleo aromático com plastificante e agente anti-descascamento). A dosagem dos agentes rejuvenescedores foi feita de forma a recuperar a penetração do ligante original. Os resultados foram comparados com uma mistura reciclada sem aditivos e outra completamente virgem. Concluiu-se que o rejuvenescedor composto apresentou os melhores resultados em relação aos demais.

Zaumanis *et al.* (2014) analisaram o efeito de seis agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas 100% recicladas. Para a dosagem de misturas fazendo uso de 100% de RAP, foi necessário efetuar a correção granulométrica da mistura, fazendo uso de frações do próprio RAP, de forma a atender os critérios da dosagem Superpave. Os autores utilizaram como AR óleo vegetal usado, graxa vegetal usada, óleo de motor usado, óleo orgânico, óleo de pinho destilado e extrato aromático, todos no teor de 12% em peso do ligante. Uma mistura de referência também foi produzida, utilizando os mesmos agregados do RAP, porém extraído-se o ligante através da queima em forno de ignição. Em relação aos rejuvenescedores, à exceção do óleo de motor usado, todos se mostraram capazes de recuperar as características do ligante original, com destaque para os produtos orgânicos, que foram mais eficazes na redução do PG que os derivados de petróleo. Os autores concluíram, por fim, que todas as misturas recicladas (exceto a com o óleo de motor usado) obtiveram respostas à fadiga superiores à mistura de referência, com ligante virgem, apresentando ainda alta resistência à deformação permanente.

Em termos de deformação permanente, Zhang *et al.* (2020) mostraram também que a adição dos agentes rejuvenescedores em misturas com 60% de RAP diminuiu a resistência à deformação permanente em relação à uma mesma mistura sem aditivos. Entretanto, essa resistência ainda se mostrou maior que a da mistura virgem. Cenário oposto se verificou para a resistência à fadiga, onde os agentes rejuvenescedores proporcionaram melhora dos resultados, mas sem, entretanto, superar a resistência à fadiga da mistura virgem. Os autores verificaram que, muito embora os agentes rejuvenescedores tenham sido capazes de reestabelecer os parâmetros de módulo complexo e viscosidade do ligante, os resultados de desempenho da mistura não foram iguais ao de uma mistura convencional em termos

de resistência à fadiga. Tal resultado é atribuído ao fato de que o agente rejuvenescedor e o ligante envelhecido não se misturaram de forma homogênea e adequada, de maneira que ainda restaram na mistura componentes de ligante com alto módulo.

2.2.4 Desafios para o emprego de altos teores de RAP nas misturas

Muito embora a tecnologia das misturas recicladas seja promissora e sua adoção traga benefícios ambientais e econômicos, o emprego do RAP em obras de pavimentação ainda enfrenta algumas dificuldades. Uma delas, já comentada em capítulo anterior deste trabalho, é a difusão do ligante envelhecido e o ligante virgem (ou agente rejuvenescedor), de forma que o primeiro adquira adequada viscosidade para promover o recobrimento ideal dos agregados. A admissão inadequada da ativação do ligante envelhecido pode trazer problemas, tanto na dosagem como no desempenho das misturas (ZAUMANIS; MALLICK, 2015). Até o momento, não existe teste ou método padrão para determinar com precisão, ou pelo menos estimar, quanto de ligante do RAP está ativo e disponível na mistura de asfalto. (KASEER; ARAMBULA-MERCADO; MARTIN, 2019).

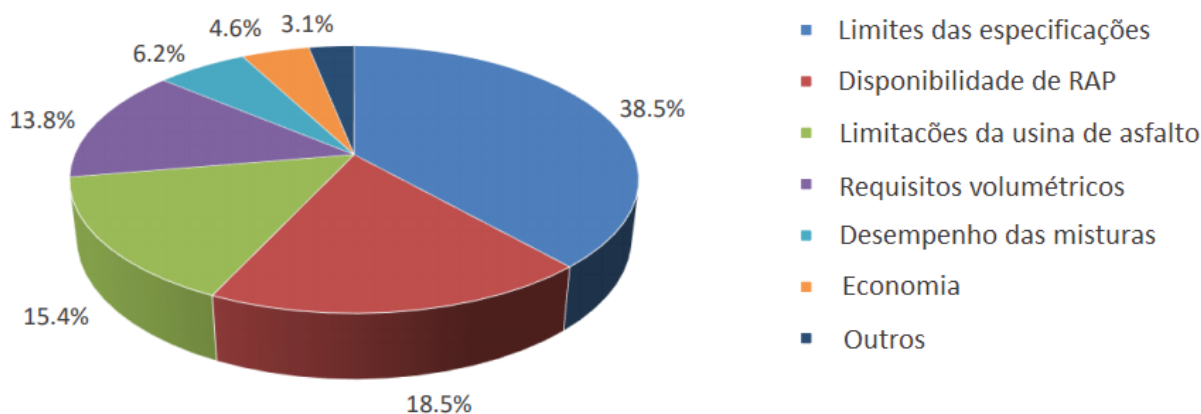
A utilização de altos teores de RAP exige a utilização de gráficos de dosagem (chamados em inglês de *blending charts*) para a escolha do teor adequado de ligante virgem (ou de agente rejuvenescedor) a ser adicionado na mistura. No Japão, por exemplo, país com a maior média de utilização de RAP em misturas asfálticas, estes gráficos são baseados nos valores do grau de penetração, mas podem ser também em função da viscosidade ou do Performance Grade do ligante (WEST; COPELAND, 2015). Esse tipo de gráfico também pode ser utilizado para otimizar a quantidade de RAP a ser utilizada, conhecendo-se o ligante virgem. No entanto, os gráficos de dosagem requerem procedimentos caros e demorados de extração e recuperação de ligantes, fazendo uso de solventes perigosos para promover a recuperação do ligante (COPELAND, 2011). Muitas das empresas que executam obras de pavimentação, assim como os departamentos de transportes, não dispõem dos equipamentos e produtos necessários para promover essa extração e recuperação do ligante, o que dificulta a aplicação dessa técnica (COPELAND, 2011).

Outro fator que pode ser complicador no emprego de maiores teores de RAP nas misturas recicladas é a heterogeneidade do material. O material fresado é geralmente originado da extração de pavimentos já deteriorados e que muitas vezes já sofreram outras intervenções de manutenção, utilizando-se diferentes misturas asfálticas, com diferentes origens de agregados e teores de ligante, por exemplo. Como as obras de restauração, em especial as rodoviárias, abrangem grandes extensões lineares, uma mesma obra pode possuir diferentes tipos de pavimentos e gerar diferentes tipos de RAP.

Ainda, o alto percentual de materiais finos no RAP também pode dificultar seu emprego nas misturas recicladas. Isso porque, conforme West (2015), no processo de fresagem, o impacto dos dentes da fresadora quebra o pavimento, por vezes causando o esmagamento de partículas de agregados, o que faz com que a graduação do material fresado seja muito mais fina que a graduação do pavimento existente (WEST, 2015). Bonfim (2007) explica que a curva granulométrica do material fresado a frio apresenta-se, em um primeiro momento, acima da curva original da mistura, em razão dos grumos formados pelos agregados e ligante. Após a extração do ligante, entretanto, o material apresenta granulometria mais fina, abaixo da curva original, comprovando a quebra dos agregados durante o processo de fresagem. Considerando-se que, em uma restauração, deseja-se reestabelecer a condição original do pavimento, tipicamente com uma mistura de granulometria aproximada, o emprego de altos teores de RAP pode se tornar inviável.

Segundo o levantamento anual de utilização de materiais reciclados, publicado pela NAPA em 2018, as associações estaduais de pavimentos asfálticos dos Estados Unidos foram questionadas quanto aos fatores que limitavam a utilização de RAP em seu estado. As respostas estão sumarizadas na Figura 12 (WILLIAMS; COPELAND; ROSS, 2018). Verifica-se que os limites especificados para utilização de RAP (que variam para cada estado) são os principais limitadores, sendo a disponibilidade do RAP e as limitações das usinas asfálticas outros itens importantes. Os limites são geralmente estabelecidos pelas agências com base em experiências passadas e com o objetivo de garantir desempenho futuro das misturas. Conforme Copeland (2011), menos da metade dos estados americanos utilizam mais de 20% de RAP em misturas usinadas a quente, muito embora os departamentos de transportes permitam a utilização de até 30%.

Figura 12 - Limitações relatadas para o emprego de RAP nos Estados Unidos



Fonte: (WILLIAMS; COPELAND; ROSS, 2018).

Suzuki (2019), destaca que o teor máximo de RAP na mistura é também limitado pela tecnologia de produção disponível, sendo que uma das principais variáveis determinantes é a forma como o material irá receber calor durante o processo de usinagem. Conforme se deseja aumentar o teor de RAP, mais delicado deverá ser o processo para que não ocorra a exposição direta do RAP às altas temperaturas dos gases provenientes da combustão das chamas do secador. Conforme a autora, um dos princípios adotados para aquecer e dar trabalhabilidade ao material reciclado é utilizar o excesso de calor proveniente do superaquecimento dos agregados virgens. No entanto, através dessa concepção, quanto maior for o teor de RAP na mistura, maior teria que ser a temperatura de aquecimento dos materiais virgens. É preciso levar em consideração ainda o efeito indesejado do vapor gerado pela umidade dos materiais, de forma que, na prática, nem sempre é possível atingir a temperatura adequada para o RAP apenas utilizando a técnica de superaquecimento dos agregados virgens.

A alternativa utilizada pelo Japão (Figura 13) para o emprego de elevadas taxas de RAP é a utilização de um tambor exclusivo para aquecimento e secagem do RAP, método chamado de aquecimento paralelo. O agente rejuvenescedor é então diretamente adicionado ao RAP aquecido em um pequeno misturador, o que permite a rápida difusão no ligante envelhecido, sendo posteriormente acondicionado em um silo por 2 a 3 horas, para o melhor rejuvenescimento. As misturas finais resultantes possuem excelente uniformidade e recobrimento dos agregados. As usinas japonesas

que operam nesse formato, entretanto, possuem uma produtividade máxima de 180 ton/h, o que corresponde à metade da produção máxima de uma usina convencional contínua utilizada nos Estados Unidos (WEST; COPELAND, 2015).

Figura 13 - Usina de asfalto no Japão. (a) Tambor aquecedor e secador para o RAP; (b) Misturador do RAP com o agente rejuvenescedor; (c) Transportador de tremonha para levar o RAP aquecido até os silos de armazenamento e (d) silos de RAP (esquerda) e de misturas a quente (direita).



Fonte: Adaptado de West e Copeland (2015).

Dentre os desafios à difusão da prática de reciclagem de misturas asfálticas no Brasil pode-se citar a ausência de normativos nacionais para a dosagem, execução e controle tecnológico destas misturas. O correto fracionamento e gestão das pilhas de material fresado nas usinas também não é abordado em manuais e normativos. O fracionamento, especificamente, é considerado muito importante quando se trabalha com misturas recicladas, especialmente com altos teores de fresado, conforme já relatado por Bernucci e Moura (2016), Gadler (2018) e Suzuki (2019).

A ausência de recomendações/determinações governamentais que estabeleçam a necessidade de reciclagem dos pavimentos asfálticos como alternativa

sustentável, a exemplo de outros países como o Japão, também contribui para que esta técnica não seja largamente difundida no Brasil. Sobre este aspecto, cabe citar que o DNIT publicou em 14 de julho de 2021 a Resolução nº 14/2021 (DNIT, 2021), que estabelece que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias daquela autarquia deverão incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento. Essa resolução consiste de um grande avanço para o emprego das técnicas de reciclagem de pavimentos no país, podendo servir de incentivo para que outros órgãos rodoviários e prefeituras possam adotem procedimentos semelhantes em suas obras e projetos.

2.3 MISTURAS MORNAS

A técnica de misturas asfálticas mornas, ou WMA (do inglês *Warm Mix Asphalt*) representa um grupo de tecnologias que permitem uma redução nas temperaturas nas quais as misturas de asfalto são produzidas e aplicadas. Essas tecnologias buscam fornecer cobertura completo dos agregados a temperaturas mais baixas, atuando também como auxiliares na compactação. Os mecanismos que permitem esse melhor cobertura e compactação variam de uma tecnologia para outra (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012).

Essas tecnologias permitem a redução da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas entre 20 e 55°C mais baixas que a temperatura das misturas quentes. Com o uso dessa técnica consegue-se melhoras na trabalhabilidade e na compactação, e também a redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante, responsável pela suscetibilidade da mistura às trincas (CAVALCANTE, 2010). Trata-se de uma tecnologia em expansão, e que nos Estados Unidos, já representa 40,5% das misturas asfálticas do país (WILLIAMS; WILLIS; ROSS, 2019).

A diminuição da temperatura proporcionada pelas técnicas de mistura morna permite a economia de energia e diminuição dos gases poluentes emitidos durante a produção e aplicação das misturas asfálticas (SPEIGHT, 2016). Essa diminuição acarreta ainda em menor oxidação do ligante asfáltico, reduzindo seu endurecimento,

aumentando a resistência à fadiga e, conseqüentemente, a durabilidade do pavimento (DNIT, 2018). O Quadro 1, adaptado por DNIT (2018), resume as vantagens deste tipo de mistura.

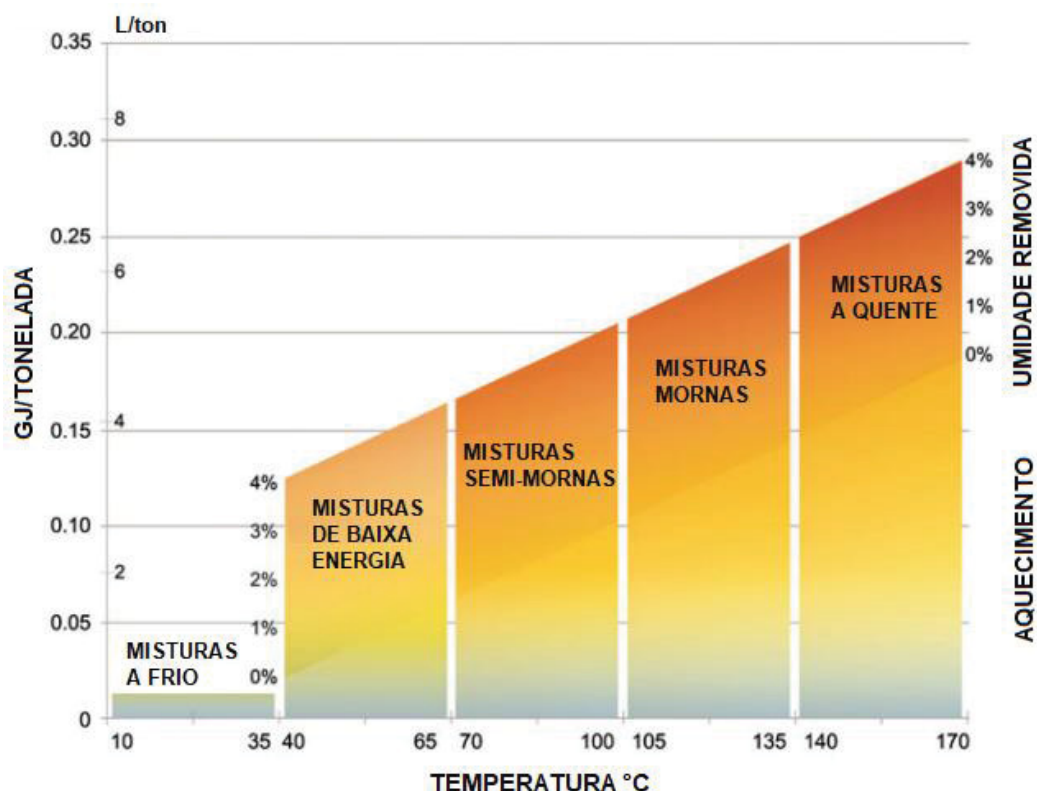
Quadro 1 - Benefícios e vantagens esperados com o uso de misturas mornas.

Benefícios	Dados esperados	
Redução das Emissões (%)	CO ₂	30-40
	SO ₂	35
	VOC	50
	NOX	60-70
	Poeira	20-25
	CO	10-30
Redução do consumo de combustível (%)	20-35%, podendo chegar a 50% ou mais, no caso da técnica utilizando o agregado úmido.	
No pavimento	Melhoria da trabalhabilidade para maiores distâncias de transporte e de aplicação e menor esforço de compactação.	
Saúde dos trabalhadores envolvidos	30-50% de redução na exposição aos fumos do asfalto, em comparação com a mistura a quente.	

Fonte: Adaptado de Prowell *et al.* (2012) *apud* DNIT (2018).

Como se verifica no Quadro 1, a utilização da técnica permite a redução significativa dos custos de produção de misturas asfálticas. Song, Huang e Shu (2018) verificaram a economia de 20% no consumo de energia para produção das misturas mornas, em relação às convencionais, tendo-se verificado ainda a melhora na resistência à umidade. A Figura 14 demonstra o consumo de energia empregado na produção de cada tipo de mistura asfáltica, de acordo com a temperatura de usinagem. Na figura, verifica-se que a faixa de temperatura de trabalho das misturas mornas é de 105 a 135°C, ao passo que nas misturas a quente essa faixa varia de 140 a 170°C.

Figura 14 - Consumo de energia na produção de misturas asfálticas.



Fonte: Prowell e Frank (2014).

Em termos de desempenho, Bernucci e Moura (2016) analisaram o emprego de misturas mornas e recicladas com a execução de 8 trechos experimentais, com diferentes misturas asfálticas, variando-se ligantes, teores de RAP e temperatura de produção. Os autores concluíram que o uso de técnica morna não causou prejuízo em termos de resistência à tração, módulo de resiliência e de afundamento em trilha de roda nas amostras analisadas. Os resultados obtidos pelos autores mostraram ainda que a resistência ao dano por umidade induzida das misturas mornas é superior às misturas a quente, fato que se atribuiu à melhora da adesividade causada pela introdução do agente surfactante, bem como ao uso de temperaturas menores na usinagem, que causam menores danos no asfalto.

A técnica de misturas mornas pode também ser utilizada com o intuito de aumentar o tempo de compactação das misturas, ou melhorando a compactação em climas frios. A técnica facilita ainda o transporte das misturas asfálticas. Isto porque, a depender do local de aplicação, o transporte consome parte do tempo de compactação da mistura, o que pode ser um problema caso a temperatura de produção e de aplicação sejam muito próximas. O aumento da temperatura de

produção para compensar o transporte longo não é viável em uma mistura a quente, pois o aumento da temperatura de mistura provavelmente danificará o ligante. Nas misturas mornas, entretanto, tem-se flexibilidade; é possível aumentar a temperatura de mistura acima da temperatura de produção da mistura morna (mas abaixo da temperatura de uma mistura a quente) limitando-se o envelhecimento do ligante asfáltico (CROTEAU; TESSIER, 2008).

Ainda, para as aplicações em misturas recicladas, as misturas mornas se mostram particularmente interessantes, uma vez que, conforme Prowell, Hurley e Frank (2012), as menores temperaturas de produção diminuem o envelhecimento do ligante asfáltico virgem, o que pode ajudar a rejuvenescer o ligante contido no RAP.

A redução das temperaturas de mistura e aplicação das misturas betuminosas proporciona enormes ganhos também na redução dos vapores do asfalto. A Figura 15 mostra claramente uma redução destes vapores ao comparar a aplicação de uma mistura morna, neste caso utilizando a técnica de asfalto-espuma, e outra a quente. Conforme Croteau e Tessier (2008), a magnitude da redução da fumaça de asfalto atrás da pavimentadora pode variar de 30% a 90%, de acordo com estudos mais conservadores e outros mais otimistas, respectivamente. Esses estudos consideram análises quantitativas (medições em mg/m^3 de vapores e aerossóis) e qualitativas (análise do conteúdo) dos vapores produzidos pelas misturas, através da coleta de amostras.

Figura 15 - Pavimentação utilizando técnica de (a) mistura morna e (b) mistura a quente convencional.



Fonte: Zaumanis (2014).

Para a produção em usina, quando utilizado o aquecimento indireto (superaquecimento dos agregados virgens para mistura com o RAP frio), a técnica WMA permite também a transferência de mais calor condutivo entre os agregados aquecidos e o ligante recuperado. No agregado superaquecido é armazenada uma certa quantidade de energia e, quando o agregado entra em contato com o RAP úmido e frio, a energia do agregado é transferida para secar e aquecer o ligante do RAP. Em uma mistura a quente convencional, a temperatura de equilíbrio a ser obtida seria tipicamente 160 °C, enquanto para uma mistura morna a temperatura de equilíbrio pode ser tipicamente 30 °C mais baixa. Portanto, a temperatura menor da mistura permite que mais energia armazenada no agregado superaquecido seja transferida para o RAP (CROTEAU; TESSIER, 2008).

2.3.1 Técnicas de produção de misturas mornas

A produção de misturas mornas pode ser feita basicamente através de três técnicas, quais sejam o espumejo do asfalto, aditivos orgânicos ou aditivos químicos. A técnica do asfalto espuma consiste em adicionar uma pequena parcela de água no ligante aquecido. Este processo pode ser feito diretamente, através de bicos de injeção, ou indiretamente, através da adição de zeólitas na forma de pó. Quando a água entra em contato com o ligante quente, bolhas de vapor são criadas no ligante, que então expande até que uma fina película de ligante mantém as bolhas intactas através da tensão de superfície. No caso das zeólitas, estas liberam água no ligante quando aquecido, criando o efeito espuma controlado. No estado de espuma, a viscosidade do ligante é reduzida, permitindo que os agregados sejam completamente cobertos pelo ligante em menores temperaturas (NIKOLAIDES, 2015).

Os aditivos orgânicos, por sua vez, consistem em ceras adicionadas diretamente às misturas, afetando a viscosidade do ligante. São usualmente referidos como “enchimentos inteligentes”, uma vez que proporcionam a redução da viscosidade nas temperaturas de mistura e aplicação, e o aumento desta viscosidade quando em serviço (CROTEAU; TESSIER, 2008).

Os aditivos químicos são, principalmente, os agentes surfactantes. Esses aditivos não atuam na diminuição da viscosidade da mistura, mas sim aumentando a

capacidade do ligante para cobrir a superfície dos agregados em baixas temperaturas (NIKOLAIDES, 2015). São capazes de reagir simultaneamente com o ligante e com o agregado, melhorando a lubricidade do ligante asfáltico e proporcionando melhor envolvimento entre o ligante e o agregado, mesmo em baixas temperaturas. Por essa razão, esse tipo de aditivo é também considerado um melhorador de adesividade, além de permitir uma trabalhabilidade da mistura na fase de espalhamento e compactação (DNIT, 2018). A Figura 16 mostra os aspectos de cada um dos aditivos de misturas mornas citados.

Figura 16 - Aditivos para produção de misturas mornas. (a) cera orgânica (b) zeólitas para produção de asfalto-espuma e (c) aditivo surfactante.



Fonte: (a) e (b) Zaumanis (2014); (c) O Autor.

2.4 MISTURAS RECICLADAS MORNAS

O uso das técnicas de misturas mornas e recicladas combinadas deve buscar, através de um efeito sinérgico, extrair o melhor de cada uma delas, razão pela qual é importante que sejam conduzidos estudos desta natureza. Uma análise de custo elaborada por Song, Huang e Shu (2018) entre misturas mornas, recicladas e convencionais (sem a adição de RAP) mostrou que, em comparação à esta mistura convencional, as misturas com RAP, RAP+AR e mistura morna são 36,1%, 32,7% e 36,1% mais baratas, respectivamente. A mistura com rejuvenescedor se mostrou menos econômica exatamente por considerar o custo deste aditivo na mistura.

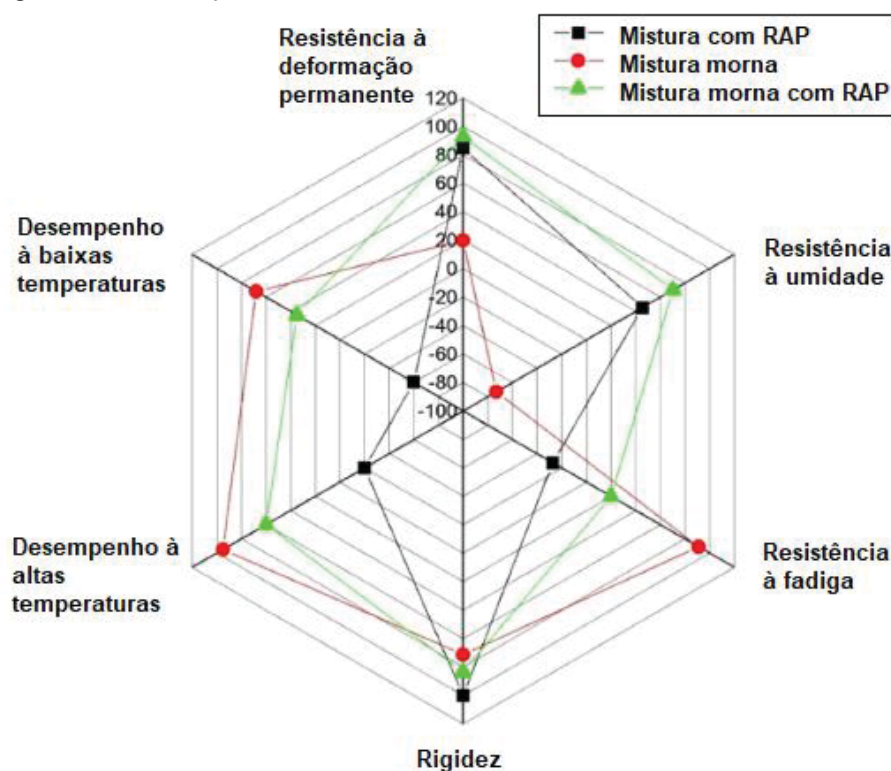
Guo *et al.* (2017) produziram misturas mornas contendo 0, 20, 30 e 40% de RAP com a adição de dois tipos de aditivos surfactantes para misturas mornas, e

também com e sem adição de agente rejuvenescedor. Misturas a quente contendo as mesmas porcentagens de RAP e com agente rejuvenescedor também foram avaliadas. As misturas mornas contendo o aditivo surfactante igual (mesmo fabricante) ao utilizado na presente pesquisa tiveram melhor desempenho entre todas as misturas em relação à resistência à umidade. Os autores concluíram que o aumento do teor de RAP leva à redução da resistência aos danos causados pela umidade nas misturas mornas. Entretanto, a adição de agente rejuvenescedor é capaz de melhorar significativamente esta resistência à umidade. As técnicas de misturas mornas e recicladas, portanto, são mais eficientes do ponto de vista de resistência à umidade.

Hettiarachchi *et al.* (2019) compilou as pesquisas acerca de misturas mornas e adição de RAP da última década, analisando cada um dos parâmetros de desempenho separadamente, com um mínimo de 10 estudos para cada. O número de estudos mostrando resultados positivos para um parâmetro em particular foi tomado como uma porcentagem do total de estudos. Da mesma forma, o número de estudos mostrando resultados negativos para o mesmo parâmetro foi considerado como outra porcentagem. Em seguida, a porcentagem negativa foi subtraída pela porcentagem positiva para determinar o valor do parâmetro, estando os resultados resumidos na Figura 17. Na análise do gráfico fica evidente que a combinação de tecnologias recicladas e mornas melhora o comportamento das misturas quando se compara com o uso individual de cada uma delas. Por exemplo, devido à presença de RAP, a resistência à fadiga, o desempenho em baixas temperaturas e o desempenho em altas temperaturas apresentam-se menores em comparação com as misturas mornas. Todavia, o desempenho combinado apresentou significativa melhora.

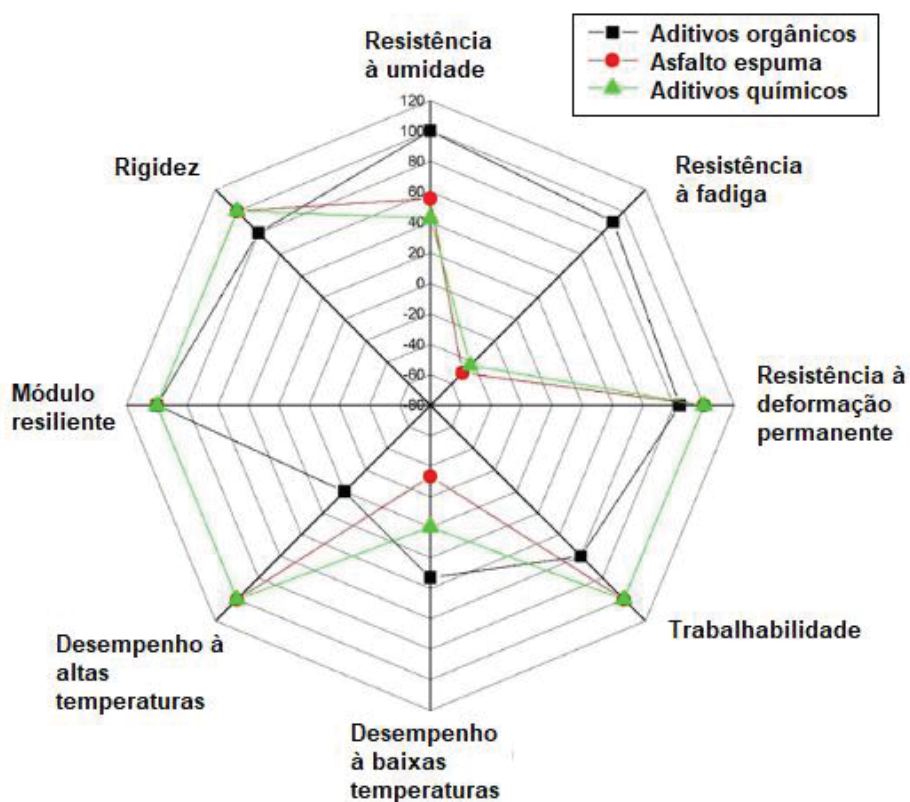
O mesmo processo foi conduzido pelos autores para verificar os resultados das misturas mornas com os diferentes tipos de aditivos para essa finalidade, conforme mostra a Figura 18. Verifica-se que as tecnologias de asfalto espuma e aditivo químico apresentaram resultados bem similares, com redução da resistência à fadiga das misturas. Os aditivos orgânicos destacam-se na resistência à fadiga, porém com desempenho inferior em altas temperaturas.

Figura 17 - Desempenhos de misturas recicladas, mornas e recicladas mornas.



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

Figura 18 - Desempenho dos diferentes aditivos de misturas mornas.



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

Os autores concluem, por fim, que tanto a utilização de RAP quanto de misturas mornas possuem suas desvantagens individualmente. Baixa resistência à fadiga, aumento de rigidez ocasionando trincas de contração em baixas temperaturas e desempenho reduzido em altas temperaturas são algumas das desvantagens do uso de RAP em misturas a quente. Da mesma forma, o uso das misturas mornas leva à alta suscetibilidade à umidade e baixo desempenho à deformação permanente (HETTIARACHCHI *et al*, 2019). A utilização das tecnologias combinadas, entretanto, pode compensar as desvantagens de ambas e melhorar o desempenho do pavimento asfáltico. Ainda, a tecnologia de misturas mornas permite o uso de maiores porcentagens de RAP devendo-se, sobretudo, selecionar cuidadosamente a tecnologia a ser empregada.

2.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste resumo serão apresentadas as principais informações do referencial teórico, que servirão de base para a escolha dos métodos da pesquisa.

- O método recomendado pelos pesquisadores para a extração do ligante da mistura asfáltica é pelo método da centrifugação, que é mais seguro para operar e também é realizado à frio, reduzindo o envelhecimento do ligante, considerando que se pretende recuperá-lo posteriormente. Em relação ao solvente, os clorados (como tricloroetileno e diclorometano) são mais eficazes para dissolução do ligante.
- Para a recuperação do ligante, recomenda-se o uso do rotaevaporador, que deixa menos solvente residual após a recuperação e causa menor endurecimento por envelhecimento.
- Os estudos levam a crer que a interação entre o ligante envelhecido do RAP e o ligante virgem não é total, uma vez que parte do ligante do RAP não é ativado na mistura. Entretanto, pode considerar uma ativação igual ou próxima de 100% na dosagem das misturas, pois o ligante ainda possui propriedades viscoelásticas. A ativação é tão melhor quanto maior for o tempo e a temperatura de mistura entre o AR e o ligante do RAP.

- Agentes rejuvenescedores de base vegetal são mais eficazes do que agentes derivados de petróleo, por serem capazes de recuperar as características do ligante original com menores doses.
- A dosagem do AR afeta diretamente na resistência da mistura à deformação permanente e fadiga. A técnica que vem sendo empregada nas pesquisas mais recentes para essa dosagem é a compatibilização do PGH do ligante envelhecido com o ligante desejado, proposta por Arámbula-Mercado *et al.* (2018). Para se determinar o PGH do ligante, é necessário ensaiá-lo nas condições originais e envelhecida a curto prazo, conforme a especificação Superpave.
- A adição do AR diretamente no RAP é mais eficaz do que a adição no ligante antes da mistura, visto que neste último método uma parte do AR pode não entrar em contato com o ligante envelhecido do RAP durante o tempo de mistura adotado.
- Os maiores desafios ao emprego da reciclagem estão nas misturas com altos teores de RAP. A depender do tipo do RAP, misturas com até 20% de adição de RAP podem dispensar o emprego de AR, uma vez que suas características no geral não são significativamente alteradas (em termos de tração por compressão diametral, estabilidade, compactabilidade e recobrimento dos agregados). Acima deste percentual, há um incremento significativo da viscosidade do ligante na mistura, sendo recomendado o uso de um ligante virgem menos viscoso ou adição de AR. Para percentuais próximos a 100% de RAP, há maiores dificuldades na dosagem e previsão de desempenho das misturas.
- A combinação das técnicas de WMA e adição de RAP nas misturas asfálticas geralmente resulta em um efeito benéfico no comportamento mecânico da mistura. Esse efeito é positivo em termos de resistência à fadiga, rigidez e desempenho em baixas e altas temperaturas. Em termos de resistência à umidade e resistência a deformação permanente, o efeito é inclusive sinérgico, de forma que o desempenho da mistura é superior ao que seria se as técnicas WMA e RAP fossem empregadas isoladamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios da pesquisa foram realizados majoritariamente no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) e no Laboratório de Polímeros Paulo Scarpa (LaPPS) da UFPR. De forma complementar, alguns ensaios precisaram ser realizados fora das instalações da UFPR. Os ensaios reológicos do ligante foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e os ensaios de deformação permanente no centro de pesquisa do Grupo CCR, localizado em Santa Isabel/SP.

A pesquisa delimitou-se à produção de mistura asfáltica reciclada com 50% de RAP, utilizando-se o teor de AR definido conforme pesquisas mais recentes sobre o assunto. Para fins comparativos, foi produzida uma mistura somente com agregados virgens (0% de RAP). Em ambas as misturas foram empregadas as técnicas de produção a quente e morna, através da adição de agente surfactante. A avaliação do comportamento mecânico das misturas foi feita em âmbito de resistência à tração, fadiga, deformação permanente, módulo de resiliência e dano por umidade induzida. Todas as misturas analisadas foram produzidas em laboratório, não havendo extração de corpos de prova em campo.

3.1 MATERIAIS

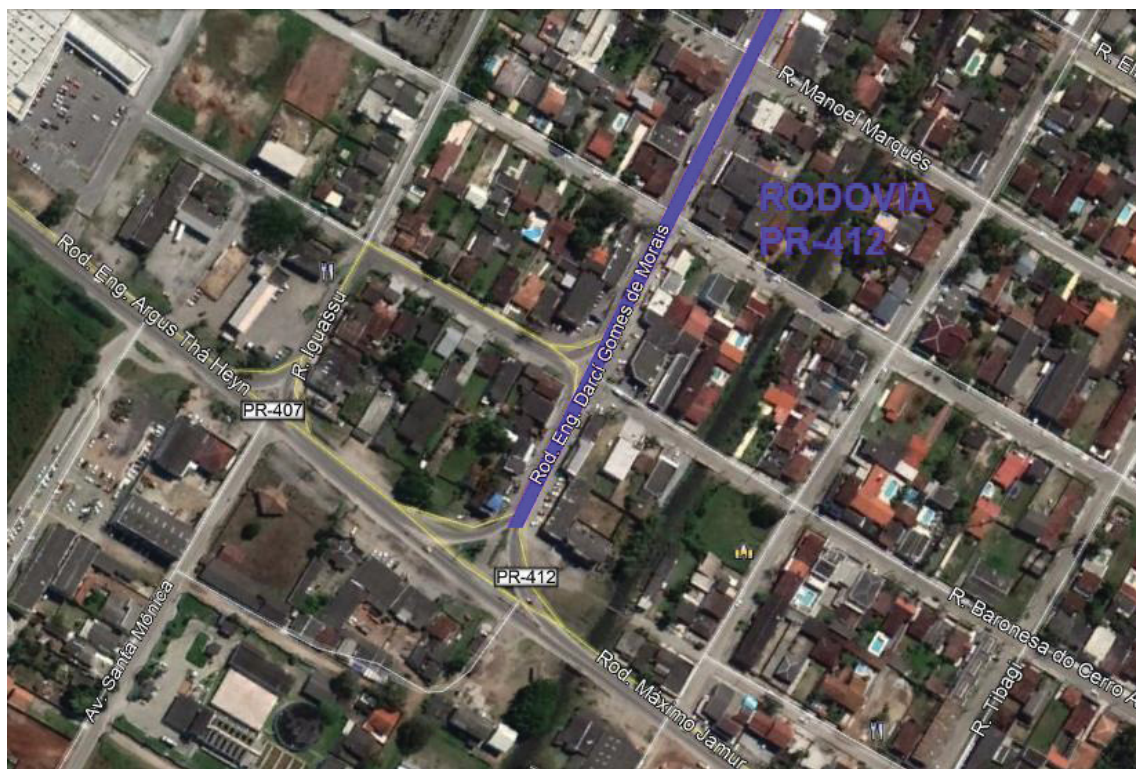
Os materiais principais necessários para a condução deste trabalho de pesquisa foram o material fresado (RAP), agente rejuvenescedor, agregados naturais, ligante asfáltico virgem e aditivo para misturas mornas. As características destes materiais serão detalhadas adiante.

3.1.1 Material Fresado

O material fresado ou RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) da pesquisa foi obtido junto ao Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná – DER-PR, resultante do serviço de fresagem para manutenção e conservação da pista da

rodovia PR-412, mais especificamente próximo à interseção com a rodovia PR-407, em Praia de Leste no município de Pontal do Paraná/PR, conforme Figura 19.

Figura 19 - Local da obra de manutenção do pavimento que deu origem ao RAP obtido.



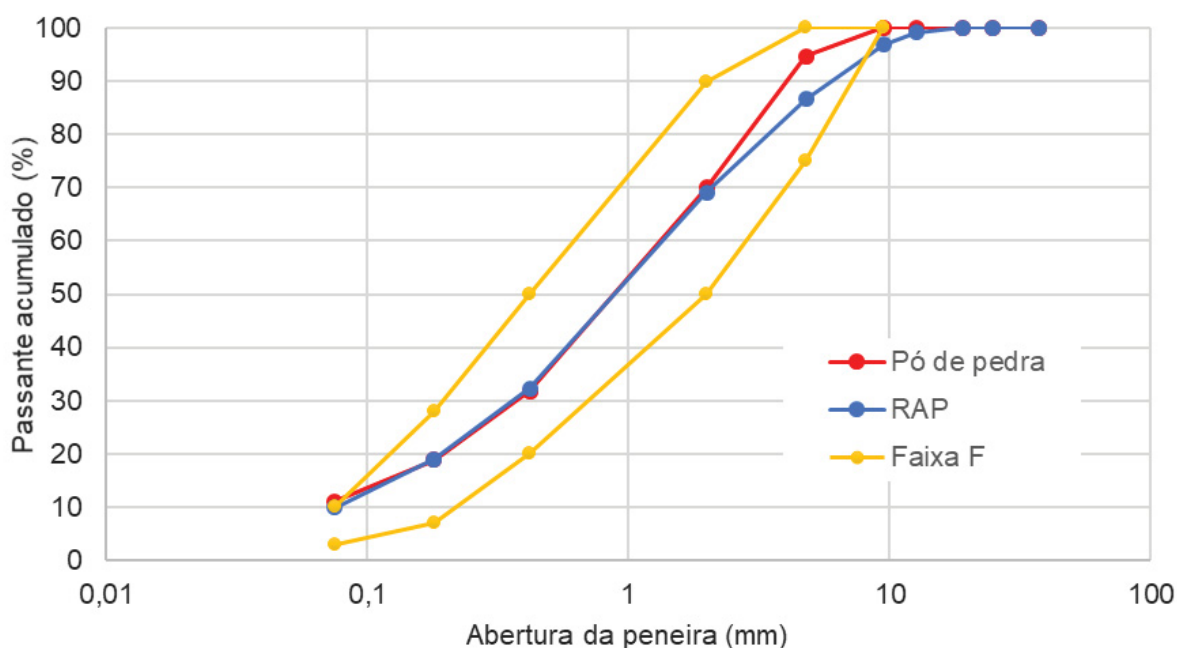
Fonte: O Autor.

Após ensaios de extração do ligante e granulometria, verificou-se que o material possui curva granulométrica muito próxima da Faixa “F” do DER-PR (Norma DER/PR ES-P 21/17), distante da Faixa “C” do DNIT (Norma DNIT 031/2004-ES) pretendida para as misturas desta pesquisa. A granulometria encontrada para o RAP se mostra muito próxima do pó de pedra utilizado nesta pesquisa, como mostra a Figura 20. Considerando a diversidade de fabricantes e tipos de máquinas fresadoras, muitos podem ser os fatores responsáveis pela maior ou menor variação de granulometria da mistura após o processo de fresagem. O número de dentes (ou bits) no tambor fresador, o espaçamento destes dentes, a velocidade de fresagem e a altura de corte do pavimento são fatores que podem exercer influência na granulometria resultante.

Conforme informações do fiscal do DER/PR, estima-se que o pavimento que originou o RAP utilizado na pesquisa, tenha em torno de 11 anos de vida em serviço

sendo um pavimento produzido com CAP convencional 50/70 sem modificações (informação verbal), cujo agregado pode ser descrito como uma variação do granito ou gnaiss.

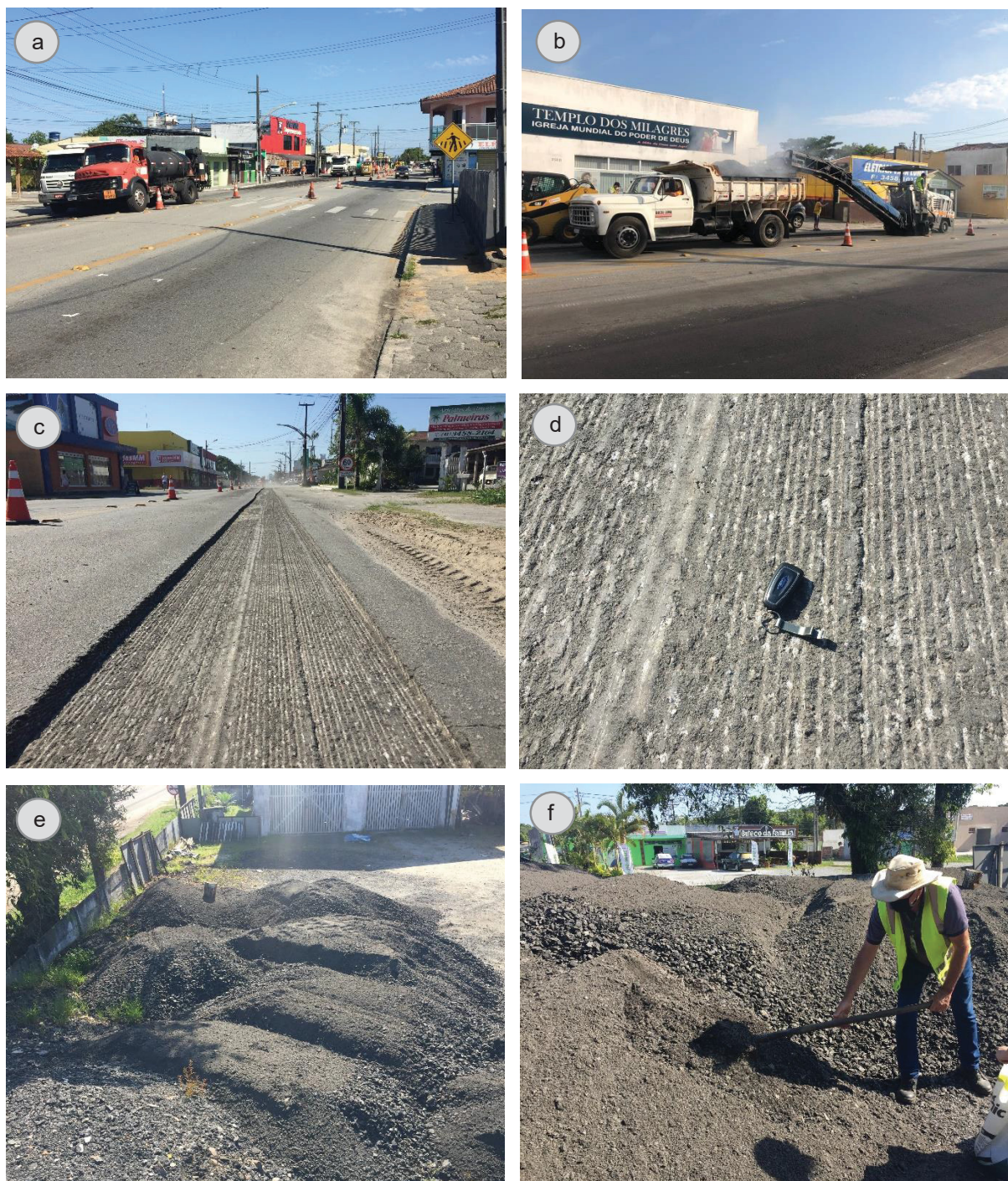
Figura 20 - Curvas granulométricas do RAP e pó de pedra virgem.



Fonte: O Autor.

A Figura 21 mostra a sequência da operação de fresagem até a coleta do material. A operação de fresagem foi executada por uma máquina fresadora, que lançava o pavimento desbastado diretamente na caçamba de um caminhão de transporte, sendo este posteriormente descarregado em um depósito em terreno do próprio DER-PR. O material foi coletado nas pilhas descarregadas neste depósito no mesmo dia da operação de fresagem, sem que o material tenha sido exposto às intempéries. Para a coleta, seguiu-se as recomendações da norma DNER-PRO 120/97, obtendo o material de vários pontos das pilhas, dispostos alternadamente, desde a crista até a base.

Figura 21 - (a) Rodovia antes do processo de fresagem; (b) processo de fresagem do pavimento deteriorado; (c) característica da correção de defeito realizada na trilha de roda; (d) aspecto da superfície fresada; (e) vista das pilhas de depósito de material fresado; (e) coleta do material fresado.



Fonte: O Autor.

3.1.2 Agregados pétreos

Os agregados utilizados nesta pesquisa são tipificados como gnaiss, tendo sido inicialmente obtidos para a pesquisa de Joenck (2019). Estes agregados foram

doados pela Pedreira Central, localizada no km 7,5 da BR 277, sentido Curitiba/Ponta Grossa, na cidade de Campo Largo/PR. Foram obtidas três frações de material na pedreira: pó de pedra, pedrisco e brita $\frac{3}{4}$. As propriedades obtidas para o agregado são resumidas na Tabela 2. A aparência destas frações é exibida na Figura 22 e as curvas granulométricas de cada uma são mostradas na Figura 23,

Tabela 2 - Propriedades dos agregados naturais.

Parâmetro	Método	Brita $\frac{3}{4}$ "	Pedrisco	Pó de pedra
Massa específica aparente (g/cm ³)	DNER ME 081/98 (agregado graúdo) NBR NM 52/2009 (agregado miúdo)	2,707	2,728	2,610
Massa específica real (g/cm ³)	DNER ME 081/98 (agregado graúdo) DNER ME 084/95 (agregado miúdo)	2,771	2,806	2,797
Absorção de água (%)	DNER ME 081/98	0,85%	1,01%	-
Índice de forma	NBR 7809/2006	2,2	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	DNER ME 035/98	20,2	-	-

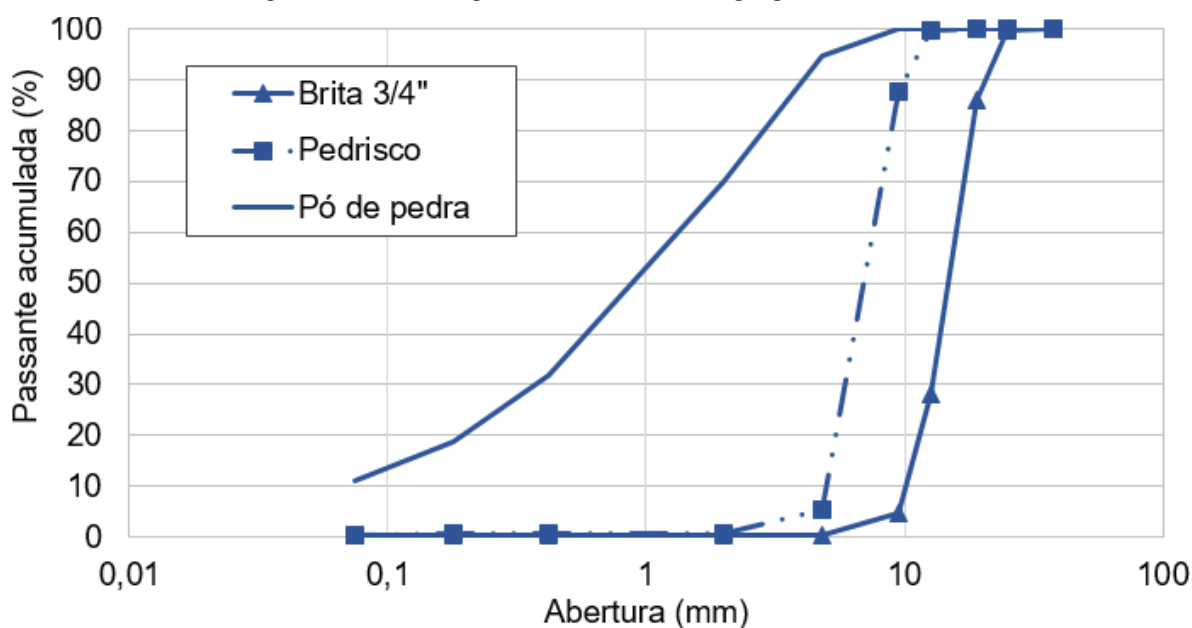
Fonte: Joenck (2019).

Figura 22 - Aparência dos agregados virgens utilizados na pesquisa.



Fonte: O Autor.

Figura 23 - Curvas granulométricas dos agregados naturais.



Fonte: Joenck (2019).

3.1.3 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico virgem escolhido para utilização nesta pesquisa foi o CAP 50/70, por ser o mais comum dos ligantes disponíveis no mercado, largamente utilizado em obras de manutenção e conservação rodoviárias. A quantidade de ligante necessária para a pesquisa foi cortesia da CBB Asfaltos, localizada no município de Araucária/PR, empresa que tem sido parceira e solícita no fornecimento de ligante para as pesquisas de pós-graduação da UFPR.

As características do ligante fornecido são mostradas na Tabela 3. Algumas das propriedades do ligante foram verificadas por este pesquisador, por meio da execução dos respectivos ensaios.

Tabela 3 - Propriedades físicas do ligante asfáltico CAP 50/70.

Características	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ASTM D5	50 a 70	(*) 52	0,1mm
Ponto de Amolecimento	ASTM D36	46 mín.	51	°C
Viscosidade Brookfield 135°C sp21 20rpm	E102	274min.	(*) 331	cP
Viscosidade Brookfield 150°C sp21 50rpm	E102	112min.	(*) 166	cP
Viscosidade Brookfield 177°C sp21 100rpm	E102	57 a 285	(*) 62	cP
RTFOT Penetração retida	ASTM D5	55 mín.	64	%
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	ASTM D36	8 máx.	4	°C
RTFOT - Ductilidade a 25°C	ASTM D113	20 mín.	> 100	cm
RTFOT variação em % massa	ASTM D2872	-0,50 a 0,50	-0,06	%
Ductilidade a 25°C	ASTM D113	60 mín.	> 100	cm
Solubilidade no tricloroetileno	ASTM D2042	99,5 mín.	99,9	% massa
Ponto de fulgor	ASTM D92	235 mín.	340	°C
Densidade relativa a 20/4°C	D70	(**)	(*) 0,993	-

(*) Resultados obtidos pelo autor

(**) Ensaio não faz parte da especificação

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2019).

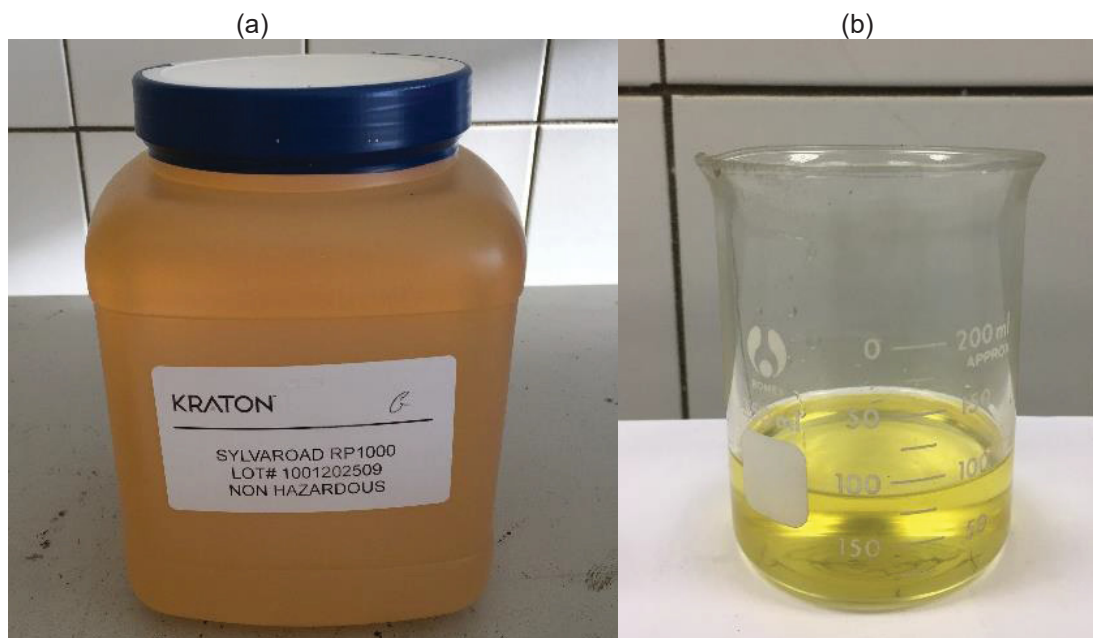
3.1.4 Agente rejuvenescedor

O agente rejuvenescedor utilizado nesta pesquisa é um produto orgânico obtido do óleo do pinho, denominado Sylvaroad RP 1000 (doravante referido apenas por Sylvaroad). Diferente dos rejuvenescedores produzidos à base de petróleo, o Sylvaroad é um aditivo produzido a partir de óleo bruto de terebintina sulfatada, produtos químicos extraídos da madeira de pinho e produzidos pela indústria de papel e celulose. Conforme o fabricante, Arizona Chemical (adquirida em 2016 pela Kraton Corporation), foram empregados três anos na criação do produto, que foi desenvolvido para interagir com o ligante do RAP em nível molecular, e não apenas reduzindo sua viscosidade, como os óleos comuns (SMITH, 2015).

O produto foi enviado diretamente da Kraton Chemical Co, localizada no município de Marianna - Flórida, Estados Unidos, na proporção de um galão (3,8 litros), em embalagem lacrada. O óleo em muito se assemelha a um óleo vegetal

comum, a exemplo do óleo de girassol, tanto na cor como na viscosidade, porém levemente menos viscoso. A Figura 24 apresenta a aparência do produto.

Figura 24 - Agente rejuvenecedor Sylvaroad RP 1000 (a) na embalagem lacrada de 1 galão e (b) aparência do óleo à temperatura ambiente.



Fonte: O Autor.

Conforme informações da fabricante (KRATON, 2019), o Sylvaroad é um aditivo líquido que reativa o ligante envelhecido do RAP, aumentando sua flexibilidade e consequentemente melhorando a resistência ao trincamento e permitindo a utilização de maiores quantidades de RAP na mistura, sem sacrificar a facilidade na produção ou aplicação do revestimento. Este aditivo de base biológica possui estrutura química anfipática específica (solúvel em meio aquoso), capaz de dispersar as frações altamente polares do asfalto, limitando a aglomeração dos asfaltenos (POROT; BELL, 2019)

O produto tem um alto ponto de fulgor, da ordem de 280°C, não apresentando risco em elevadas temperaturas e permitindo a adição diretamente ao RAP, podendo ser utilizado em misturas quentes, mornas ou frias. Algumas das características apresentadas pelo fabricante na ficha que acompanha o produto são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do produto Sylvaroad RP 1000.

Características	Método	Resultado
Ponto de fulgor	ASTM D92	> 280 °C
Ponto de ebulição inicial	-	> 300 °C
Viscosidade a 20°C	ASTM D445	100,8 mm ² /s
Densidade relativa a 20°C	ASTM D1475	0,927
Solubilidade em água 20°C	OECD 105	0,6 mg/l

Fonte: Adaptado de Kraton (2019).

3.1.5 Aditivo para misturas mornas

A técnica utilizada pra misturas mornas na presente pesquisa foi o emprego de agente surfactante. Os aditivos químicos surfactantes são agentes químicos caracterizados pela capacidade de alterar as propriedades superficiais e interfaciais dos líquidos, agindo de forma a proporcionar a redução da tensão superficial na interface ligante asfáltico/agregado promovendo, assim, uma boa compactação do material, mesmo com temperaturas de trabalho inferiores às convencionais (DNIT, 2018)

O aditivo surfactante utilizado foi fornecido por empresa internacional do setor da indústria química, com atuação no Brasil, que preferiu manter sigilo na presente pesquisa, tanto quanto ao nome do produto (que será chamado somente de aditivo surfactante), quanto do fornecedor (referenciado apenas por Fornecedor A). A Tabela 5 mostra as propriedades do aditivo, e sua consistência em temperatura ambiente pode ser verificada na Figura 25.

Tabela 5 - Propriedades do agente surfactante.

Características	Resultado
Ponto de fulgor	181 °C
Ponto de fusão	< -16 °C
Ponto de ebulição	> 100 °C
Viscosidade a temperatura ambiente	487 cP
Densidade relativa	0,99

Fonte: Ficha de informações do produto (Fornecedor A).

Figura 25 - Consistência do aditivo surfactante para misturas mornas.



Fonte: O Autor.

Conforme informações do fabricante, o aditivo atua na mistura asfáltica como um melhorador do recobrimento dos agregados e da trabalhabilidade, trazendo ganhos também na adesividade do ligante aos agregados. O fabricante explica ainda que o bom desempenho do produto depende de altas taxas de cisalhamento para ativação, durante a usinagem e compactação da mistura. Recomendou, portanto, a utilização de misturador mecânico para a produção das misturas asfálticas em laboratório. Estas altas taxas de cisalhamento promovem a redução do atrito interno dos agregados, facilitando o recobrimento do ligante em menores temperaturas de trabalho.

3.2 MÉTODOS

Este estudo investigou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas e mornas, contendo material fresado e aditivo surfactante. Foram avaliadas misturas contendo 0% de RAP (misturas convencionais) e 50% de RAP (misturas recicladas). Nestas misturas foi também adicionado agente surfactante na proporção de 0% (misturas a quente) e 0,5% (misturas mornas), em massa do ligante total. Nas misturas recicladas, especificamente, foi empregado também um agente rejuvenescedor, cuja proporção foi determinada por meio de experimentos com o

ligante envelhecido (extraído do RAP) e ligante virgem. Para cumprir com esses objetivos, o programa experimental foi dividido em quatro etapas, abaixo discriminadas.

Etapa 1 – Gestão do RAP: Para a condução das análises desta pesquisa inicialmente foi feita a coleta, separação e fracionamento do RAP. Na sequência foi feita a extração e recuperação do ligante envelhecido e separação dos agregados pétreos.

Etapa 2 – Caracterização Física: Nesta etapa foram então realizados os ensaios de caracterização física, tanto dos agregados como dos ligantes (virgem e recuperado do RAP). Destaca-se aqui a determinação do PG do ligante virgem, utilizado como meta para determinação do teor de AR.

Etapa 3 – Dosagem: Nesta etapa foram realizadas as dosagens, tanto das misturas, como do AR. Para se determinar o teor de AR ideal, foram adicionados ao ligante quatro diferentes teores pré-estabelecidos. Para cada uma dessas amostras (ligante + AR) foi determinado o PGH, e os resultados lançados em um gráfico (PGH x Teor de AR), denominado *blending chart*. O teor ótimo adotado foi aquele capaz de recuperar exatamente o Performance Grade de alta temperatura do ligante virgem.

Etapa 4 – Caracterização mecânica: Elaboradas as dosagens das misturas (reciclada e convencional), estas foram usinadas (morna e a quente) e produzidos os corpos de prova para ensaios de caracterização mecânica. Foram realizados os ensaios de módulo de resiliência, resistência à fadiga, resistência à deformação permanente, resistência à tração e dano por umidade induzida. Os resultados foram então organizados em planilhas, analisados e interpretados através de gráficos, que permitiram extrair as conclusões desta pesquisa. As misturas produzidas na Etapa 4 são resumidas na sequência:

MCQ – Mistura Convencional a Quente

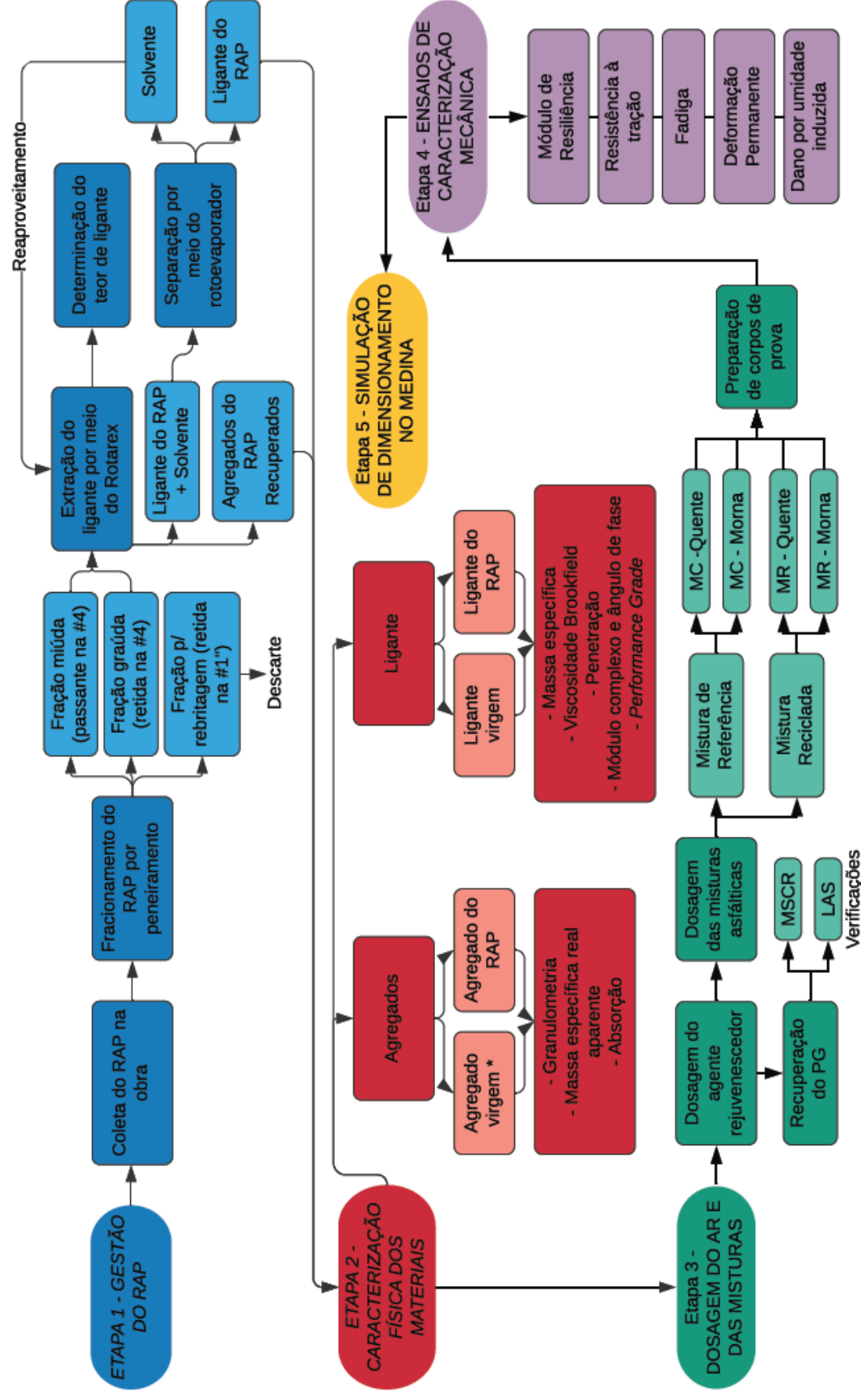
MCM – Mistura Convencional à Morna

MRQ – Mistura Reciclada a Quente

MRM – Mistura Reciclada Morna

As etapas da pesquisa são mostradas no fluxograma da Figura 26.

Figura 26 - Fluxograma de etapas da pesquisa.



*O agregado virgem foi caracterizado por Joenck (2019).

Fonte: O Autor.

3.2.1 Etapa 1 - Gestão do RAP

Neste item serão apresentados os procedimentos adotados para fracionamento da granulometria do RAP, assim como a extração e recuperação do ligante asfáltico e dos agregados pétreos.

3.2.1.1 Granulometria e fracionamento

Para a dosagem de misturas recicladas, é comum se fazer o fracionamento do RAP em dois ou três tamanhos. Faz-se a separação do RAP em estoques grossos e finos para maximizar a quantidade de RAP a ser usada em misturas específicas, aumentar o controle sobre as misturas e reduzir a variabilidade da dosagem, tanto de agregados como de ligante asfáltico (COPELAND, 2011). Gadler (2018) afirma que esta separação pode auxiliar na diminuição da heterogeneidade do resíduo e, com isso, possibilitar um controle mais efetivo na dosagem das misturas asfálticas, além de possibilitar a diversificação e otimização da utilização do RAP.

No presente trabalho, optou-se por fracionar o RAP em três tamanhos. A maior fração foi separada pela peneira de 25mm, com o objetivo de retirar as partículas de tamanho grande que não podem ser utilizadas diretamente na mistura. Estas partículas na prática seriam novamente britadas antes de serem inseridas nas misturas recicladas (WEST, 2015). Na presente pesquisa, esta fração foi descartada. As outras duas frações foram separadas pela peneira #4, sendo denominadas por fração miúda (passante na peneira #4) e graúda (retida na peneira #4). Esta peneira foi determinada por fazer parte de um fracionamento típico conforme apresentado por West (2015), e por melhor dividir o RAP em duas proporções semelhantes, em razão de o RAP obtido ter características de mistura mais fina. A Figura 27 apresenta o aspecto do fresado original e das frações obtidas para a pesquisa.

Figura 27 - Aspecto da granulometria do material fresado sendo (a) o fresado original; (b) a fração retida na peneira #25mm e descartada; (c) a fração graúda retida na #4; e (d) a fração miúda, passante na #4.



Fonte: O Autor.

3.2.1.2 Extração do ligante

A extração tem por finalidade determinar o teor de ligante nas amostras de RAP e estudar o comportamento reológico do ligante envelhecido. A determinação do teor de ligante presente no RAP é necessária para a dosagem das misturas a serem estudadas. Para a extração, o preparo das amostras iniciou com a secagem das mesmas em estufa a 40°C (para simular a secagem ao ar) por no mínimo 24 horas, até a completa remoção da umidade. Na sequência, as amostras foram reduzidas por

quarteamento, através de separadores metálicos, de acordo com a norma DNER-PRO 199/96.

A extração do ligante se deu pelo do método de centrifugação, utilizando o equipamento Rotarex elétrico, de acordo com a norma rodoviária DNER-ME 053/94. Conforme já visto na revisão bibliográfica, o método da centrifugação é preferido pelos pesquisadores, pelo fato de ser realizado em temperatura ambiente, que por sua vez evita o envelhecimento do ligante extraído (MIKHAILENKO; ATAELIAN; BAAJ, 2020).

O solvente escolhido para extração do ligante do RAP foi o diclorometano (ou cloreto de metileno), em razão de seu baixo ponto de ebulição, em torno de 40°C, o que também ameniza o envelhecimento adicional do ligante devido ao aquecimento durante o processo de separação (recuperação do ligante). O diclorometano, entretanto, é um produto controlado pela Polícia Federal e, para que pudesse ser utilizado no trabalho, este pesquisador precisou obter uma Autorização Especial para compra e uso do produto.

3.2.1.3 Recuperação do ligante

A recuperação do ligante asfáltico consiste em separá-lo do solvente utilizado para extração no Rotarex. Na presente pesquisa esta recuperação foi realizada através do processo de rotaevaporação. O rotaevaporador utilizado pertence ao Laboratório de Polímeros Paulo Scarpa (LaPPS), da UFPR, e é mostrado na Figura 28a. O processo foi realizado utilizando-se balões de 1000ml. Como o diclorometano tem ponto de ebulição de 40°C, a temperatura da água do foi mantida em no máximo 50°C, controlando-se a temperatura da mistura solvente + ligante através da altura ajustável da imersão do balão na panela. A pressão de vácuo utilizada oscilava em torno de 200 e 300 mmHg, sendo ajustada de forma a manter a segurança do equipamento e impedir o retorno de material através do tubo de saída do vapor. Cada vez que a mistura presente no balão se tornava viscosa, aparentando a consistência de um ligante, o balão era novamente preenchido com mais material (solvente+ligante) oriundo da extração e recolocado no equipamento.

Antes do término de cada processo de extração, quando o ligante no fundo do balão já se mostrava suficientemente viscoso e as bolhas quase não mais emergiam do líquido, a temperatura do banho era elevada para 80°C e a pressão de vácuo

elevada para 400 mmHg pelo período mínimo de 60min, até que as bolhas novamente parassem de eclodir do ligante. Tal procedimento objetivou eliminar o solvente remanescente, diminuindo as chances de solvente residual nas amostras de ligante.

Após o término do processo, o balão foi levado à estufa à 80°C, onde permaneceu invertido por 18 a 24 horas. Esta temperatura foi estabelecida para diminuir a viscosidade do ligante ao ponto de permitir seu escoamento para um pote de alumínio (Figura 28-b). Igual temperatura foi adotada nas pesquisas de Gadler (2018).

Figura 28 - (a) Rotaevaporador do LaPPS em funcionamento e (b) escoamento do ligante do balão.



Fonte: O Autor.

Para manter o controle dos ligantes obtidos no processo de extração e recuperação, após a coleta dos mesmos em latas pequenas de metal, as amostras foram submetidas ao ensaio de penetração. Através dos resultados dos ensaios foi possível inferir quais amostras destoavam das demais através da determinação de *outliers*, definidos como os pontos que se afastavam da média por mais que duas vezes o desvio padrão. Os resultados de penetração muito altos poderiam ser um indicativo de presença de solvente residual. Nestes casos, a amostra foi novamente

submetida à rotaevaporação por período adicional de 2 horas à 80°C. As amostras cuja penetração após este processo permaneceu como um *outlier* foram descartadas.

3.2.2 Etapa 2 - Caracterização física dos materiais

Após a extração e recuperação do ligante asfáltico do RAP, os ensaios de caracterização a serem realizados no ligante são os listados abaixo. Os mesmos ensaios foram conduzidos no ligante virgem para comparação.

- Penetração (DNIT ME 155/2010-ME)
- Viscosidade, utilizando o equipamento Brookfield (ABNT NBR 15184/2004)
- Propriedades reológicas utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (AASHTO T315-19).

O ensaio de penetração foi feito no equipamento manual. Já o ensaio de viscosidade foi conduzido no viscosímetro Brookfield. A geometria da haste utilizada, também denominada *spindle*, é o modelo *spindle* 21, comumente empregado nas especificações de ligante. Os resultados de viscosidade do ligante virgem foram utilizados para determinação das temperaturas de compactação e usinagem das misturas asfálticas.

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer* – DSR) foi utilizado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante e para a determinação do *Performance Grade*, conforme norma ASTM D 7643-16. Para este ensaio foi utilizado o DSR do Laboratório de Pavimentação da UFSC, modelo DHR do fabricante *TA Instruments*. Os resultados obtidos no reômetro permitiram determinar o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ) do ligante.

Para a caracterização dos agregados presentes no RAP, foram feitos os seguintes ensaios:

- Granulometria (DNIT 412/2019–ME),
- Absorção (DNER-ME 081/98);

- Determinação da massa específica real e absorção de agregados graúdos (DNER-ME 081/98);
- Determinação da massa específica real de agregados miúdos (DNER-ME 084/95);

Os resultados dos ensaios para os agregados do RAP foram então comparados com os resultados obtidos por Joenck (2019) para os agregados virgens, com a finalidade de verificar se há diferenças significativas entre esses agregados para uso na mistura asfáltica, especialmente em termos de densidade.

3.2.3 Etapa 3 - Dosagem do agente rejuvenescedor e das misturas

3.2.3.1 Dosagem do agente rejuvenescedor

Após a recuperação do ligante do rotaevaporador, garantindo-se a total (ou máxima possível) eliminação do solvente da amostra, foi realizada a dosagem do agente rejuvenescedor. Conforme Kaseer, Martin e Arámbula-Mercado (2019), o estado atual do conhecimento sobre esse tema sinaliza para a seleção da dose de AR que restaure o PGH da mistura de ligante reciclado, de forma a equivaler-se ao valor do ligante pretendido. Para se atingir este objetivo, pode-se fazer uso de gráficos de dosagem, ou *blending charts*.

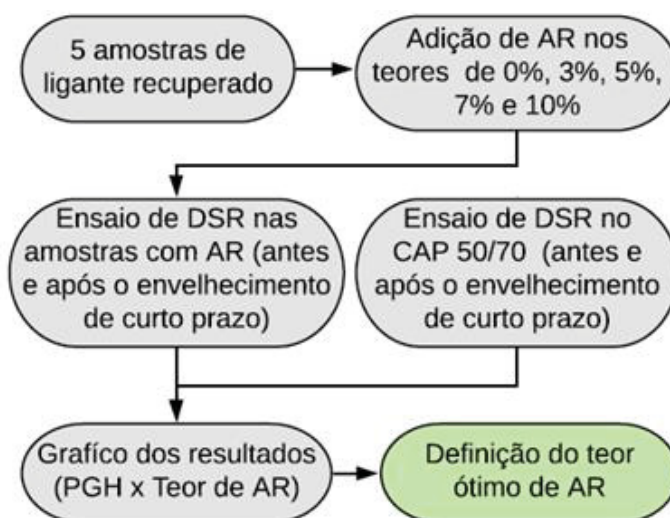
Após a obtenção dos ligantes extraídos e separados do solvente, estes foram unificados e misturados, de forma a se obter um ligante homogêneo e com as mesmas propriedades, eliminando-se variáveis oriundas do processo de extração e recuperação. Após a unificação foram separadas dez amostras aonde foram aplicadas cinco dosagens diferente de AR (duas amostras para cada teor), por peso do ligante (extraído). Conforme recomendações do fabricante, foram estabelecidos os teores de dosagem de 0, 3, 5, 7 e 10% do peso do ligante do RAP. Conforme resultados de Porot e Bell (2019), teores de até 10% deste tipo de agente rejuvenescedor (óleo vegetal) são suficientes para restaurar propriedades do ligante envelhecido como penetração e viscosidade, tendo-se estabelecido este como o maior teor para produção do *blending chart*. O procedimento de mistura do AR com o ligante seguiu o protocolo do fabricante (KRATON, 2016), através da adição direta ao ligante aquecido

a 130°C e com mistura manual por 30 segundos. Na sequência o ligante foi novamente aquecido por 10 minutos e homogeneizado por 30 segundos a cada 5 minutos.

Cinco das amostras de ligante + AR foram submetidas ao ensaio de envelhecimento de curto prazo no RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), de acordo com a norma ASTM D 2872-19. Após o ensaio de RTFOT, as amostras envelhecidas e as amostras virgens foram submetidas aos ensaios de cisalhamento no DSR, conforme norma ASTM D7175-15, para obtenção do parâmetro $G^*/\sin\delta$. O ensaio do ligante no DSR nas condições original (diretamente extraído do RAP) e envelhecida (RTFOT) é necessário para a determinação do PGH das amostras conforme especificações das normas ASTM D 6376-16 e ASTM D 7643-16. Seguindo-se estes normativos, para a determinação da temperatura de falha estabeleceu-se os valores mínimos do parâmetro $G^*/\sin\delta$ como 1,0kPa para a condição original dos ligantes e 2,2kPa para a condição envelhecida no RTFOT.

Estes mesmos ensaios foram conduzidos no CAP 50/70 virgem (sem aditivos) e, quando analisados os resultados graficamente, a exemplo do que foi feito por Arámbula-Mercado *et al.* (2018), foi possível determinar o teor aproximado de AR para que o material envelhecido do RAP recupere o PGH de um ligante novo. Este foi o teor utilizado na produção das misturas recicladas. O esquema para determinação do teor ótimo a ser utilizado é mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Esquema para determinação do teor de AR.



Fonte: O Autor.

O desempenho dos ligantes rejuvenescidos também foi avaliado em termos de compliância não recuperável e porcentagem de recuperação na tensão, por meio do ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*), realizado com as amostras após envelhecimento no RTFOT. O ensaio foi realizado à temperatura de 64°C, (PG do ligante virgem), utilizando-se geometria de 25mm de diâmetro e gap de 1,0mm. Neste ensaio são aplicados 20 ciclos, com 1s de aplicação de carga e 9s de recuperação, com carga de 0,1kPa, e mais 10 ciclos com carga de 3,2kPa, conforme norma ASTM D7405-20. A resposta elástica de cada ligante ao cisalhamento é obtida pela taxa de recuperação (%R) e pela compliância não recuperável (Jnr).

A tolerância do material ao dano por fadiga também foi analisada através do ensaio LAS (*Linear Amplitude Sweep*), ou varredura de amplitude linear, na temperatura de 20°C, em amostras com geometria de 8 mm de diâmetro e gap de 2 mm, após o ensaio RTFOT. Através da análise viscoelástica de dano contínuo (VECD) se fez possível determinar os parâmetros A e B da curva de tolerância ao dano por fadiga, permitindo o cálculo do número de ciclos para a falha (Nf), em diferentes amplitudes de deformação, conforme norma AASHTO TP 101-18. O critério de falha adotado foi a redução de 35% do parâmetro $|G^*|/\sin\delta$, recomendado por Chen, Zhang e Bahia (2021).

3.2.3.2 Dosagem das misturas de referência

Para a dosagem das misturas de referência optou-se pelo método Superpave, que consiste do método sugerido para o projeto de misturas asfálticas nos Estados Unidos (NIKOLAIDES, 2015). A aplicação do método seguirá o manual de referência da FHWA (FHWA, 2000). Os corpos de prova compactados seguindo-se esse método, de acordo com as especificações, podem ser produzidos com 150 mm ou 100 mm de diâmetro. Baseado em um estudo da Autopista Litoral Sul (2014), que recomenda a utilização de CPs com 100 mm para volume de tráfego médio a alto, tendo em vista que esse apresenta densificação e comportamento mecânico mais próximo da realidade de campo, optou-se na presente pesquisa pela compactação dos CPs com este diâmetro.

Para a determinação da granulometria foram produzidas no quatro misturas de teste, variando-se a porcentagem de cada tipo de agregado (brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra). As granulometrias escolhidas para os testes foram determinadas de forma a atender a faixa granulométrica "C" do DNIT (DNIT 031/2004 ES), assim como os pontos de controle da especificação Superpave para tamanho nominal máximo do agregado de 19,0 mm (FHWA, 2000), e zona de restrição. Os agregados separados foram colocados na estufa e mantidos à uma temperatura superior à temperatura de usinagem da mistura sem, entretanto, excedê-la em mais de 10°C, conforme estabelecido na norma DNIT 178/2018 - PRO.

A usinagem para fins de dosagem foi feita de forma manual em fogão, primeiramente adicionando-se o ligante aquecido, posteriormente os agregados graúdos e, após a total cobertura dos agregados graúdos pelo ligante, adicionou-se os agregados miúdos, (agregados aquecidos a 10°C acima da temperatura do ligante) misturando até completa homogeneização. Em cumprimento à norma DNIT 178/2018 - PRO, as misturas foram submetidas à um condicionamento de 2 horas em estufa à temperatura de compactação, de forma a simular o envelhecimento que ocorre durante a usinagem, transporte e a execução do serviço.

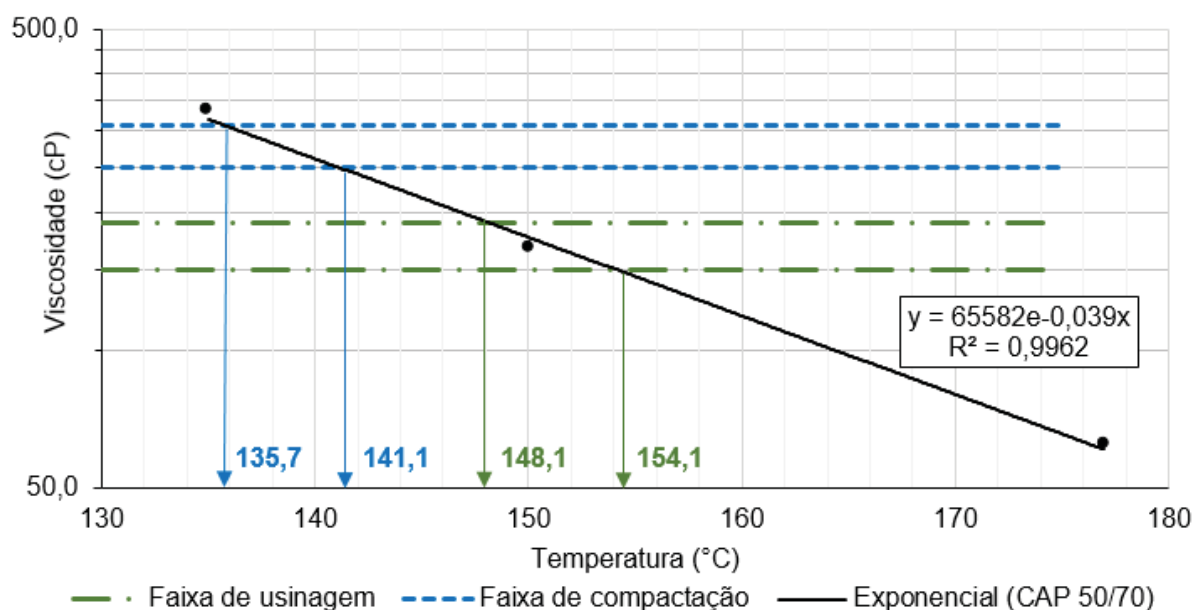
Após o condicionamento, duas amostras de cada granulometria (1200g) foram compactadas no Compactador Giratório Superpave (CGS), utilizando como parâmetros o ângulo de giro de $1,25 \pm 0,2^\circ$, rotação de 30rpm, compressão vertical de 600kPa e N de projeto de 100 giros (100 rotações para o término da compactação), indicado para tráfego médio à alto de vias principais e rodovias rurais. O compactador giratório utilizado, presente no LAMP, é do modelo Servopac, fabricado pela IPC Global. O equipamento monitora continuamente a altura do corpo de prova, fornecendo ao término um relatório com esse dado para cada giro realizado.

Outras duas amostras de 1500g foram produzidas para o ensaio Rice (ABNT NBR 15619/2016, visando a determinação da densidade relativa máxima medida (Gmm). O teor de asfalto é determinado para obter-se um volume de vazios de 4%, verificando-se as demais propriedades volumétricas como vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV) e a proporção entre o material passante na peneira #200 e o teor de ligante.

Uma vez finalizada a dosagem Superpave, os corpos de prova para os ensaios de comportamento mecânico foram produzidos no misturador mecânico, já que este permite a produção mais rápida de maior quantidade de mistura asfáltica. Esse mesmo misturador foi utilizado para a produção de todas as misturas analisadas nesta pesquisa. O processo de produção adotado para as misturas asfálticas no misturador foi escolhido de maneira a se aproximar ao máximo do processo manual, feito na panela, adotando-se um tempo total de 4 minutos, considerando que este tempo garantiu a adequada homogeneidade das misturas no equipamento utilizado. O mesmo tempo também empregado para as misturas recicladas, conforme explicado no item 3.2.3.3. O processo das misturas convencionais no misturador mecânico resume-se ao que segue: adição do ligante virgem e dos agregados graúdos (aquecidos a 10°C acima da temperatura do ligante) na panela do misturador; mistura por 120 segundos; adição dos agregados miúdos (aquecidos a 10°C acima da temperatura do ligante) na panela; mistura por mais 120 segundos.

As temperaturas de usinagem e compactação foram determinadas em função das faixas de viscosidade do ligante CAP 50/70 utilizado, estabelecidas na norma DNIT 178/2018-PRO, como mostra a Figura 30. A temperatura média resultante para a usinagem foi de 151,1°C e para a compactação de 138,4°C, para atingir as viscosidades de 0,17 Pa.s e 0,28 Pa.s, respectivamente.

Figura 30 - Faixas de temperatura de usinagem e compactação em função da viscosidade do CAP 50/70.



3.2.3.3 Dosagem das misturas recicladas

As misturas recicladas seguiram a dosagem Superpave realizada para a mistura de referência, com a mesma granulometria e teor de asfalto já determinados. No caso destas, entretanto, além dos agregados virgens previamente obtidos (brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra), foram incluídas as duas frações de RAP para compor a granulometria da mistura. Conforme explicado no capítulo 3.2.1, o RAP foi separado nas frações graúda (retida na #4) e miúda (passante na #4), antes da extração do ligante. Então, para ambas as frações do fresado, foram determinados o teor de asfalto, granulometria e densidade real e aparente dos agregados. Em razão de a granulometria do RAP se apresentar muito próxima da granulometria do pó de pedra, este não foi utilizado na dosagem das misturas recicladas, sendo integralmente substituído pela composição das frações de RAP. As misturas recicladas foram então produzidas por uma combinação de brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e RAP (sem utilizar o pó de pedra).

Especificamente para o RAP, a proporção na mistura foi mantida em 50%. Este percentual de incorporação foi determinado levando em consideração que a granulometria do próprio RAP apresenta características muito finas (capítulo 3.1.1), de forma que um teor superior à 50% impediria a produção de misturas com a mesma granulometria da mistura de referência (enquadrada na faixa "C" da norma DNIT 031/2004 ES). Ademais, uma vez que é um dos objetivos deste trabalho analisar a dosagem e eficácia do emprego de AR nas misturas recicladas, não se poderia optar por misturas com teores baixos de RAP (menores que 20%), pois estas sequer precisariam do uso do aditivo (FAROOQ; MIR; SHARMA, 2018). Ainda, conforme pesquisas de Copeland (2011), os maiores desafios ao emprego da reciclagem estão nas misturas com altos teores de RAP, razão pela qual são necessários avanços nas pesquisas. Como exemplo citam-se as pesquisas de Song, Huang e Shu (2018) e de Genesseeux (2015), que adotaram este mesmo percentual de incorporação de RAP.

Para efeitos de determinação do teor ótimo de ligante, muito embora no referencial bibliográfico desta pesquisa tenha-se mostrado que o grau de ativação do ligante contido no RAP está geralmente entre 0 e 100%, poucas pesquisas foram

realizadas no sentido de determinar efetivamente este parâmetro, ou estabelecer um valor médio para utilização. Sendo assim, foi considerada na dosagem a ativação total do ligante contido no RAP, conforme conclusões de Gennesseaux (2015). Ainda, para o cálculo do teor de ligante das misturas recicladas foi empregado o método substituição, no qual desconta-se a quantidade de AR adicionada do total de ligante, por ser superior a 2% (ARÁMBULA-MERCADO; 2018). A adição do AR nas misturas foi feita diretamente no RAP, conforme conclusões de Lu, Saleh e Nguyen (2019), dentro do tambor do misturador mecânico. O AR foi espargido no RAP aquecido, dentro da panela do misturador, através de um spray manual. A quantidade adicionada foi controlada pesando-se o espargidor com AR antes e depois da adição, em processo repetido até se atingir a quantidade exata necessária na mistura.

Em relação ao aquecimento do RAP, usualmente nas usinas utiliza-se o método de transferência de calor dos agregados virgens superaquecidos, de forma a permitir sua mistura com o ligante novo e/ou agentes de reciclagem (ARRA, 2015). Esse método, contudo, não é adequado para uso em teores maiores de RAP nas misturas, a exemplo do adotado nesta pesquisa (50%), pois exigiria que os agregados virgens fossem aquecidos à uma temperatura muito elevada para que o equilíbrio fosse atingido na temperatura de mistura. Sendo assim, considerando as conclusões de Gaspar (2019), nesta pesquisa o RAP foi aquecido separadamente do agregado virgem, porém na mesma temperatura, visando maior homogeneidade na mistura entre os ligantes novo e envelhecido.

O processo de usinagem seguiu o protocolo do fabricante do AR, adaptando-se os tempos para que a mistura total fosse feita em 4 minutos. De início, o RAP foi aquecido (à temperatura da mistura) na panela do misturador mecânico por 2 horas antes do processo de usinagem, sendo mexido a cada minuto por uma rotação do misturador (este processo permite a desagregação dos grumos). O AR (em temperatura ambiente) foi adicionado diretamente ao RAP pré-aquecido, através do espargimento com spray manual, e misturado por 60 segundos no misturador mecânico. Na sequência foram adicionados os agregados virgens (aquecidos a 10°C acima da temperatura do ligante) e misturado por mais 60 segundos. Por fim, adicionou-se o ligante virgem e misturou-se por mais 120 segundos, seguindo-se o processo de usinagem das misturas convencionais. A homogeneidade do conjunto poderia ser atingida em até 3 minutos de mistura total (LU, SALEH E NGUYEN; 2019),

sendo este o tempo sugerido pelo fabricante do AR, porém nesta pesquisa optou-se por um tempo de mistura de 4 minutos, considerando o elevado teor de RAP e supondo-se a reativação completa do ligante envelhecido.

Figura 31 - (a) Aquecimento do RAP na panela; (b) adição do AR no RAP com spray e mistura por 60s; (c) adição do agregado virgem aquecido; (d) mistura do RAP com o agregado virgem por 60s; (e) adição do ligante virgem; (f) mistura final por 120s.



Fonte: O Autor.

3.2.3.4 Dosagem das misturas mornas

As misturas mornas produzidas nesta pesquisa não precisaram ser efetivamente dosadas em termos de granulometria e teor de ligante. Haja vista a necessidade de se produzirem misturas com características similares às misturas a quente, mantendo o controle destas variáveis, não foram alteradas estas características das misturas, sendo apenas adicionado o aditivo surfactante e reduzida a temperatura de usinagem e compactação.

O teor de agente surfactante recomendado pelo fornecedor é de 0,4 a 0,5% do peso total de ligante (virgem + envelhecido do RAP). No presente trabalho, seguindo-se a linha das pesquisas internacionais mais recentes (LU; SALEH; NGUYEN, 2019; FAROOQ, MIR E SHARMA, 2018), adotou-se o teor de 0,5% do peso total de ligante. No caso das misturas recicladas mornas, o teor de aditivo surfactante foi mantido em 0,5% do total de ligante (ligante virgem + ligante do RAP). A porção total do aditivo foi adicionada e misturada ao ligante virgem.

É recomendado pelo fabricante que a mistura do surfactante seja feita diretamente no ligante aquecido à mesma temperatura de mistura a quente (151,1°C), utilizando-se de aparelho misturador de baixo cisalhamento para homogeneização. Assim, seguindo-se o adotado por Capitão, Picado-Santos e Martinho (2012), os aditivos de misturas mornas foram pré-misturados por alguns segundos com o ligante aquecido, através de um aparelho misturador, antes da mistura com os agregados. A Figura 32 demonstra o método de dosagem do aditivo em balança, com o uso de uma pipeta, e de mistura com o ligante virgem, através de misturador de solos, por período aproximado de 120 segundos.

Foram então usinadas quatro amostras para cada mistura morna da pesquisa, sendo duas para compactação do CGS (1200g) e outras duas (1500g) para verificação da variação da densidade relativa máxima medida. Para a produção das misturas mornas, o fornecedor recomenda fortemente a utilização do misturador mecânico, capaz de melhor ativar as propriedades do produto por conta do maior cisalhamento gerado pelo equipamento (informação verbal), sugestão que foi acatada nesta pesquisa.

Figura 32 - Procedimento de (a) dosagem com pipeta e (b) mistura do aditivo surfactante para misturas mornas no ligante virgem.



Fonte: O Autor.

Antes da produção das misturas, todavia, é necessário se estabelecer quais serão as temperaturas de trabalho, considerando que a tecnologia de misturas mornas emprega temperaturas mais baixas. Hettiarachchi *et al.* (2019) cita que se deve operar dentro da faixa de temperatura de 115–135 °C. Gadler (2018), por exemplo, promoveu a redução de temperatura em 40°C em relação às misturas a quente, verificando posteriormente ter sido uma redução demasiada. Considerando estas experiências, no presente trabalho adotou-se uma redução de temperatura de 30°C, valor de redução usualmente empregado em outras pesquisas, em relação às temperaturas empregadas para as misturas a quente. As temperaturas de usinagem e compactação das misturas mornas seriam, portanto, de 121,1°C e 108,4°C, respectivamente.

3.2.3.5 Resumo das misturas asfálticas produzidas

Detalhados os processos de dosagem, o Quadro 2 apresenta um resumo das misturas asfálticas produzidas nesta pesquisa.

Quadro 2 - Misturas produzidas na pesquisa.

Descrição	Código	Teor de RAP	Teor de AR	Teor de surfactante
Mistura convencional a quente	MCQ	-	-	-
Mistura reciclada a quente	MRQ	50%	Conforme dosagem	-
Mistura convencional morna	MCM	-	-	0,5%
Mistura reciclada morna	MRM	50%	Conforme dosagem	0,5%

Fonte: O Autor.

O processo de dosagem Superpave foi conduzido através da produção de amostras por usinagem manual na panela e fogão. Após dosadas as misturas, as amostras destinadas aos ensaios de desempenho mecânico foram usinadas no misturador mecânico disponível no LAMP, em razão da maior capacidade de produção do equipamento e também para seguir as orientações do fabricante do agente surfactante. Considerando que este tipo de misturador confere certa variabilidade à composição de agregados nos corpos de prova, o volume de vazios pretendido (4% para a maioria dos ensaios) sofreu variações quando fixado o número de giros do compactador no momento da compactação (100 giros). Sendo assim, para garantir que todas as misturas possuísem volumes de vazios semelhantes e próximos ao pretendido, a compactação das misturas foi feita fixando-se a densidade dos corpos de prova, e não o número de giros do compactador. Desta maneira, os resultados de volume de vazios se mostraram muito mais consistentes, a ponto de reduzir drasticamente o descarte de corpos de prova e, consequentemente, de insumos da pesquisa.

3.2.4 Etapa 4 – Ensaios de caracterização mecânica

Considerando que a dosagem do AR tem impacto direto tanto na fadiga como na deformação permanente das misturas, é prudente que ambos os ensaios sejam realizados. Sendo assim, os ensaios de caracterização mecânica conduzidos no trabalho são listados abaixo:

- Resistência à tração (DNIT 136/2018-ME);
- Módulo de resiliência (DNIT 135/2018-ME);
- Resistência à fadiga (DNIT 183/2018-ME);

- Deformação permanente (DNIT 184/2018-ME);
- Dano por umidade induzida (DNIT 180/2018-ME)

O cálculo da resistência à tração (RT) da amostra foi realizado, não apenas pela análise do parâmetro em si, mas também para se determinar a carga do ensaio de módulo de resiliência e fadiga, mais adiante explicados. A resistência foi determinada na prensa Marshall, através da compressão diametral do corpo de prova. A determinação foi feita para 3 corpos de prova, sendo adotada a média aritmética como resistência à tração da mistura.

Os ensaios de módulo de resiliência e resistência à fadiga foram realizados através da máquina universal, ou *UTM – Universal Testing Machine*, instalada no LAMP. A determinação do módulo de resiliência das misturas foi feita de acordo com a norma DNIT 135/2018 – ME, em três corpos de prova para cada mistura, sendo o valor final adotado como a média dos valores obtidos em cada CP. Quanto à carga repetida aplicada neste ensaio, a norma ASTM D 4123 recomenda um valor de 10 a 50% da RT. Já a norma nacional DNIT 135/2018–ME estabelece que a carga deve estar entre 5 e 25% da RT média obtida. Ainda, a norma NBR 16018/2011 estabelece um valor entre 10 e 20% desta mesma resistência. O valor adotado nesta pesquisa, a exemplo de outros trabalhos do PPGEC (GADLER, 2018; JOENCK, 2019), foi o equivalente à 20% da carga máxima da tensão de tração por compressão diametral.

No ensaio de vida à fadiga foram aplicados três níveis de tensão, sendo estes de 20, 30 e 40% do valor da resistência à tração da amostra (RT), também tomando como base os trabalhos supracitados. Os corpos de prova utilizados são de 10cm de diâmetro, mesmo tipo utilizado para os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração, compactados no Compactador Giratório Superpave - CGS. O critério de falha adotado é o estabelecido na norma DNIT 183/2018-ME, que é a ruptura completa do corpo de prova. Para permitir que os ensaios fossem executados automaticamente e sem acompanhamento ao longo de todo o processo de aplicação de cargas (considerando que levam muitas horas até romper), foi estabelecido o critério de parada da máquina quando a deformação do pistão atingisse 10mm. Nessa condição, o corpo de prova já estaria completamente rompido. Foram produzidos e ensaiados três corpos de prova para cada um dos níveis de tensão escolhidos, com volume de vazios de $4,0\% \pm 0,5\%$.

A determinação da deformação permanente foi feita através do ensaio uniaxial de carga repetida, conhecido por *Flow Number* (FN). O ensaio consiste na aplicação de cargas uniaxiais repetidas no corpo de prova, na temperatura de 60°C, com ciclos de 1 segundo, sendo 0,1s de aplicação de carga e 0,9s de repouso. O parâmetro *flow number* (ou número de fluxo) é definido como o ciclo onde a taxa de deformação registrada é mínima. Esse ensaio foi realizado no centro de pesquisa do Grupo CCR, localizado em Santa Isabel/SP.

A resistência ao dano por umidade induzida é representada pela razão entre as resistências à tração (RRT) de amostras condicionadas (saturadas) e não condicionadas (secas), sendo as primeiras submetidas ao congelamento à -18°C e posterior aquecimento em banho maria à 60°C, enquanto as segundas são diretamente ensaiadas à temperatura de 25°C. Foram realizados ensaios em seis corpos de prova para cada mistura, sendo três para cada condição.

Para a dosagem e determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas foi necessária a confecção da quantidade de amostras e corpos de prova (CPs) mostrada na Tabela 6. O quadro considera que os corpos de prova efetivamente necessários para cada ensaio, porém, a produção das amostras e CPs foi maior, visto que alguns não atingiram as características exigidas para cada ensaio, exigindo o descarte. O procedimento de dosagem pelo método Superpave foi feito somente para a mistura de referência MCQ, utilizando-se os mesmos parâmetros para as demais.

Tabela 6 - Quantidade de amostras e corpos de prova produzidos na pesquisa, por ensaio.

Ensaio	Quantidade de amostras e CPs para cada ensaio			
	MCQ	MRQ	MCM	MRM
Determinação da Gmm (Ensaio Rice)	10	2	2	2
Determinação dos parâmetros Superpave (CGS)	12	2	2	2
Resistência à tração	3	3	3	3
Módulo de Resiliência	3	3	3	3
Fadiga	9	9	9	9
Deformação permanente	2	2	2	2
Dano por umidade induzida	6	6	6	6
Subtotal	45	45	27	27
TOTAL				126

Fonte: O Autor.

3.2.5 Etapa 5 - Simulação de dimensionamento no software MeDiNa

De posse dos resultados de caracterização mecânica de cada mistura, se faz possível, através da análise de um pavimento flexível típico no programa MeDiNa, estabelecer a vida útil de diversas estruturas hipotéticas em termos de número N admissível. Nesta etapa, cada pavimento simulado possui a mesma estrutura (mesma espessura e propriedade das camadas), mas com o material da camada de revestimento variando entre cada uma das misturas estudadas nesta pesquisa. Para o pré-dimensionamento da estrutura do pavimento inicial, utilizou-se o método do DNER, proposto pelo Eng. Murillo Lopes de Souza. Os parâmetros considerados foram o número $N=1 \times 10^7$, para tráfego médio a alto (FHWA, 2000) e CBR=8% hipotético.

A estrutura do pavimento adotada é mostrada na Figura 33, tendo os valores de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson sido arbitrados com base nos intervalos para cada tipo de camada, conforme disposto na instrução de projeto de pavimentação IP-DE-P00/001 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP, 2006). Segundo a norma, os valores de MR para camadas de brita graduada variam de 150 a 300MPa, tendo-se adotado o último, e os valores para camada de macadame hidráulico (não há intervalo apresentado para macadame seco) variam de 250 a 450MPa, tendo-se adotado o primeiro. Para o solo do subleito, considerou-se um solo de comportamento laterítico, cujo MR varia de 100 a 200MPa, tendo-se adotado a média. A norma recomenda também os valores de coeficiente de Poisson de 0,30 para misturas asfálticas, 0,35 para materiais granulares e 0,40 para solos do subleito.

Figura 33 - Estrutura de pavimento utilizada no software MeDiNa para comparação das misturas.

MeDiNa - v.1.1.3.0 - set/2019

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: felipe.joenc EMPRESA: DNIT

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	MRM	7,5	3240	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada Simples	15,0	300	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Macadame Seco	20,0	250	0,35
SL	SUBLEITO	Solo siltoso	0,0	150	0,40

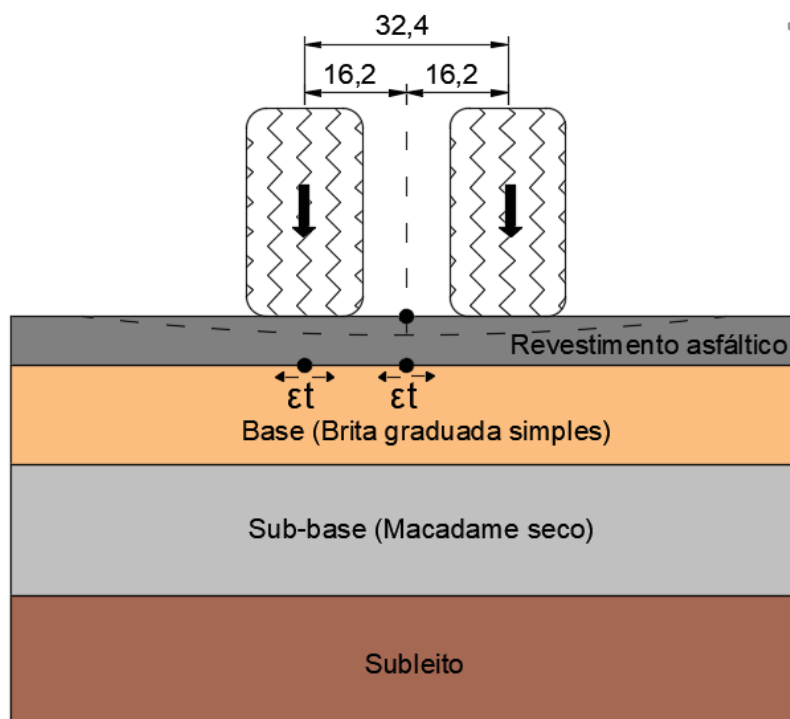
Tipo de Via: Sistema Arterial Primário
 VMD (1º ano): 2750
 FV: 1.000
 N anual (1º ano): 1.00e+06
 % Veículos na faixa de projeto: 100
 N Anual da faixa: 1.00e+06
 Taxa de crescimento (%): 0,0
 Período de projeto (anos): 10
 N Total: 1.00e+07

N Total:
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto

Fonte: Software MeDiNa

Adicionalmente, com base na estrutura do pavimento pré-dimensionado, foram feitas análises mecanicistas no software AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), auxiliar do software MeDiNa, considerando-se a passagem de um eixo padrão de rodado duplo (largura de 32,4cm e ponto de carga máxima exatamente no centro, $x=16,2\text{cm}$). Através do AEMC é possível determinar a maior deformação na fibra inferior da camada de 7,5cm do pavimento asfáltico (tomada aos 7,49cm de profundidade). Aplicando esse valor de deformação na equação de fadiga de cada mistura asfáltica (determinada através do ensaio de fadiga), foi possível determinar o número admissível de eixos padrão de 8,2tf (número N) que cada mistura estudada resistiria até falhar. O esquema utilizado na análise mecanicista é mostrado na Figura 34. Cabe citar que para a determinação dessas tensões no AEMC, considerou-se todas as camadas aderidas. Já para o dimensionamento da espessura da camada de revestimento no MeDiNa, realizada para cada uma das misturas estudadas, conforme indica o manual do programa, as camadas foram consideradas não aderidas. Nesse dimensionamento, a espessura das demais camadas foi mantida fixa.

Figura 34 - Esquema de determinação das tensões máximas no revestimento.



Fonte: O Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

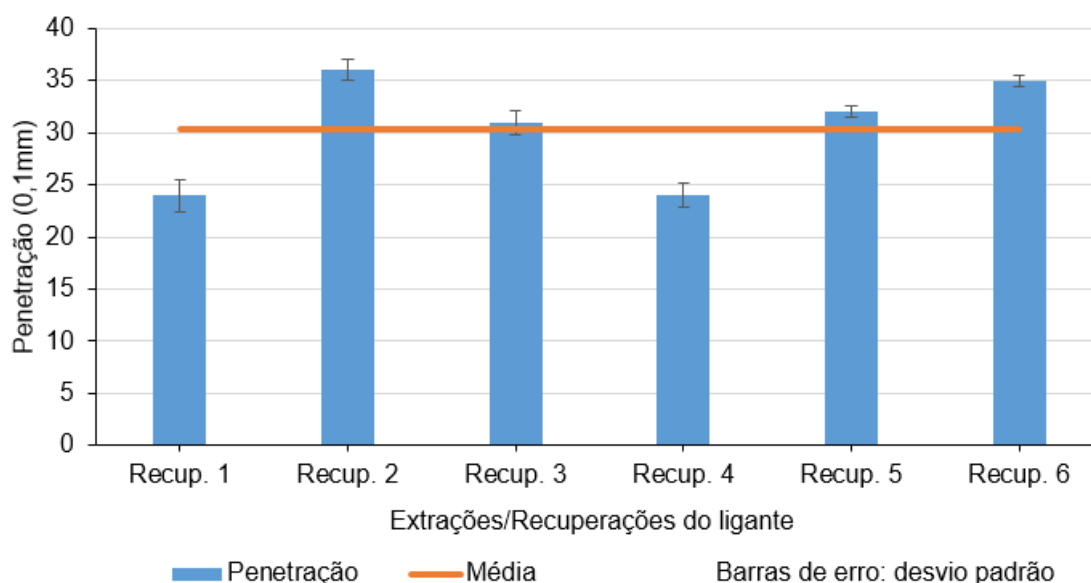
Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa. Será analisado o comportamento mecânico das misturas recicladas, de maneira a verificar se o processo de reciclagem produz misturas de desempenho compatível às misturas convencionais, principalmente em termos de fadiga e deformação permanente. A mesma análise será feita para a técnica de misturas mornas, combinada também com a técnica de reciclagem.

4.1 ETAPA 1 – GESTÃO DO RAP

Para a obtenção de quantidade suficiente de ligante do RAP para as análises, foram realizadas 12 extrações. Considerando que o teor de ligante presente no RAP era em torno de 5,1% e que a porção para cada extração é de 1000g, foi possível a obtenção de pouco mais de 600g de ligante envelhecido no total.

Conforme mostra a Figura 35, após o descarte das amostras com penetrações elevadas (*outliers*), os resultados de penetração das extrações/recuperações variaram entre 24 e 36 décimos de milímetro.

Figura 35 - Resultado da penetração das amostras válidas após a extração e recuperação do ligante do RAP.



É importante ressaltar que as quantidades de ligante obtidas em cada uma das extrações foi diferente, considerando que os volumes de solução (solvente + ligante) rotaevaporados em cada dia também eram diferentes em cada dia trabalhado. As amostras com maior volume de ligante obtiveram maiores valores de penetração, o que indica que quanto maior o volume de ligante no processo de rotaevaporação, mais difícil pode ser o processo de eliminar o solvente residual nele contido.

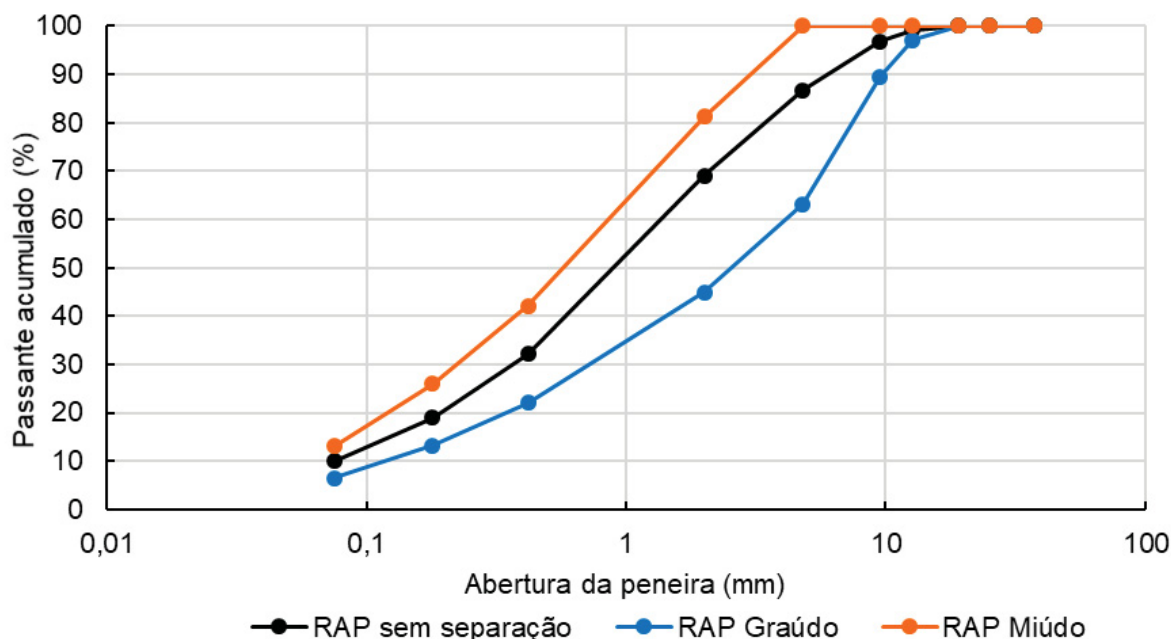
Após a homogeneização de todas as extrações/recuperações em uma única porção, o resultado foi um ligante homogêneo com penetração em torno de 32 décimos de milímetro. Em se tratando de um CAP 50/70, cuja penetração deveria variar entre 50 e 70 décimos de milímetro quando virgem, percebe-se que se trata de um ligante envelhecido.

4.2 ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

4.2.1 Agregados

Os agregados presentes no RAP foram avaliados após a extração do ligante no Rotarex, tendo sido previamente secos em estufa para eliminação da água e/ou solvente. A curva granulométrica das amostras é mostrada na Figura 36. O ensaio mostrou que a fração graúda do RAP, retida pela peneira 4 (4,8mm) antes da extração, ainda apresentou 63,2% de material passante nesta peneira após a extração. Essa elevada presença de materiais finos na porção graúda acaba por limitar a utilização da porção miúda na composição das misturas recicladas. Por vezes, a porção graúda por si só já possui quantidade de material das peneiras menores superior à estabelecida no projeto de mistura asfáltica, reduzindo ou eliminando a necessidade de utilização da porção miúda. Isso mostra que, quando considerado ativação do total ligante, a granulometria do RAP utilizada no projeto de misturas recicladas deve sempre ser determinada após a extração do ligante, considerando que antes deste processo os agregados permanecem em grumos e não caracterizam a real dimensão dos agregados presentes.

Figura 36 - Curvas granulométricas do RAP após extração do ligante.



A análise da massa específica real dos agregados é mostrada na Tabela 7. Para a determinação da densidade real da fração graúda do RAP foi necessária sua separação novamente pela peneira 4, de forma que a fração fina pudesse ser ensaiada segundo a norma DNER-ME 084/1995 e a fração grossa segundo a norma DNER-ME 081/1998. A densidade resultante foi obtida pela média ponderada das frações, considerando-se a composição de 63,2% de fração fina e 36,8% de fração grossa, obtida no ensaio de granulometria.

Tabela 7 - Massa específica real e absorção dos agregados do RAP e virgens.

Agregado	Massa específica real (g/cm³)	Absorção de água (%)
Brita ¾"	2,771*	0,85%*
Pedrisco	2,728*	1,01%*
Pó de Pedra	2,610*	-
RAP Miúdo	2,691	-
RAP Graúdo (fração miúda)	2,688	-
RAP Graúdo (fração graúda)	2,668	0,55%
RAP Graúdo (resultante)	2,681	-

* Dados obtidos de Joenck (2019).

Os resultados mostram que as densidades dos agregados do RAP se situam entre aquelas previamente obtidas para os materiais virgens equivalentes (pedrisco e pó de pedra), demonstrando que se tratam de agregados semelhantes, e que não haverá significativa diferença de densidade entre as misturas convencionais e com adição de RAP. A absorção do agregado do RAP também se mostrou inferior à absorção do agregado virgem.

4.2.2 Ligante do RAP

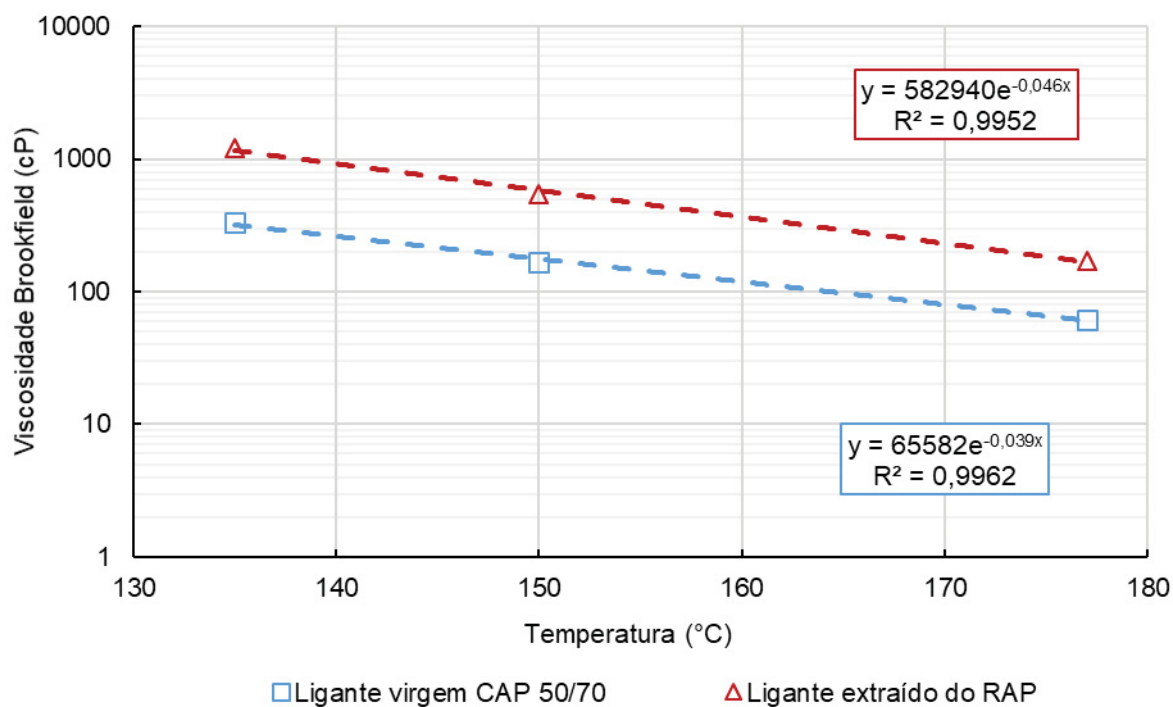
Os resultados dos ensaios para o ligante extraído do RAP são resumidas na Tabela 8, e comparados com os mesmos parâmetros previamente obtidos para o ligante virgem CAP 50/70. A massa específica do ligante do RAP mostrou-se superior à do ligante virgem, constatação que encontra sentido no fato de que os ligantes envelhecidos perdem parte de suas frações leves, permanecendo com maior concentração de asfaltenos e, portanto, mais densos.

Tabela 8 - Comparativo das propriedades dos ligantes virgem e extraído do RAP.

Característica	Método	Ligante virgem	Ligante do RAP	Unidade
Penetração	DNIT 155/2010	52	32	0,1mm
Viscosidade Brookfield 135°C sp21 20rpm	NBR 15184/2004	331	1220	cP
Viscosidade Brookfield 150°C sp21 50rpm	NBR 15184/2005	166	538	cP
Viscosidade Brookfield 177°C sp21 100rpm	NBR 15184/2006	62	172	cP
Massa Específica	DNER 193/96	0,993	1,050	-

Os resultados do ensaio de viscosidade obtidos no viscosímetro rotacional Brookfield são mostrados na Figura 37. A viscosidade do ligante extraído do RAP mostrou-se até 270% superior à do ligante virgem entre as temperaturas ensaiadas (135°C a 177°C), faixa de trabalho usual dos ligantes asfálticos. Na temperatura de 150°C, muito próxima à temperatura de usinagem das misturas desta pesquisa (151,1°C), essa diferença ainda permanece elevada, com viscosidade do ligante do RAP a maior em 224%, demonstrando se tratar um ligante já envelhecido.

Figura 37 - Resultados de viscosidade no viscosímetro Brookfield.



4.3 ETAPA 3 – DOSAGEM DO AGENTE REJUVENESCEDOR E DAS MISTURAS

Após a unificação dos ligantes extraídos em uma porção única, e descarte dos *outliers*, foram produzidas as amostras com os teores de 0, 3, 5, 7 e 10%, para a produção do *blending chart*.

4.3.1 Dosagem do AR

4.3.1.1 Performance Grade

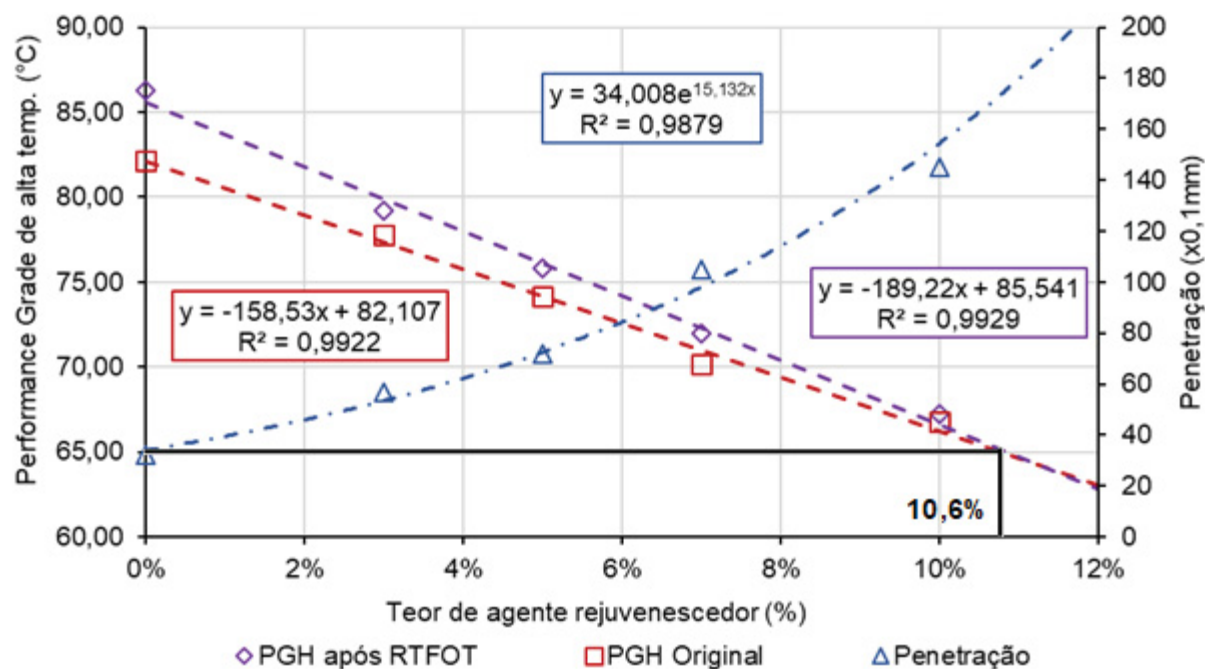
Os resultados obtidos para o Performance Grade de alta temperatura (PGH) são apresentados na Tabela 9 e na Figura 38.

Tabela 9 - Valores do PG contínuo de alta temperatura das amostras após ensaio no DSR.

Ligante	Amostra	PGH Original*	Média PG Original	PGH após RTFOT**	Média PG após RTFOT
CAP 50/70	1	65,10	65,10	63,20	63,20
	2	65,10		63,20	
RAP + 0%	1	81,50	82,10	86,30	86,25
	2	82,70		86,20	
RAP + 3%	1	77,80	77,75	79,20	79,20
	2	77,70		79,20	
RAP + 5%	1	73,50	74,15	75,80	75,80
	2	74,80		75,80	
RAP + 7%	1	70,60	70,15	72,10	71,95
	2	69,70		71,80	
RAP + 10%	1	66,80	66,75	67,20	67,20
	2	66,70		67,20	

* Temperatura de falha definida com parâmetro $G^*/\sin\delta = 1,0\text{kPa}$ ** Temperatura de falha definida com parâmetro $G^*/\sin\delta = 2,2\text{kPa}$

Na Tabela 9 verifica-se que no ligante do RAP sem adições (0%) houve uma variação maior entre os resultados da condição original e após o RTFOT, em comparação ao ligante virgem CAP-50/70. Para este último, o PGH determinado para ambas as condições variou em cerca de 2°C apenas, ao passo que para a amostra de RAP + 0% esta variação foi de 4°C. Isto poderia indicar a presença de solvente residual nas amostras, porém tal conclusão não pode ser extraída diretamente neste caso, uma vez que para as amostras com adição de AR a variação situou-se abaixo dos 2°C. Os resultados em geral demonstraram que mesmo um teor de 10% de AR, considerado elevado, não foi capaz de recuperar o PGH do ligante original, tanto na condição original como na envelhecida no RTFOT.

Figura 38 - *Blending chart* para determinação do teor ideal pelo PG.

Através da Figura 38 é possível perceber que os resultados de PG se aproximam com adequada precisão de uma função linear, podendo ser representados pelas retas cujas equações são exibidas no gráfico. No gráfico também são mostrados os resultados de penetração para os ligantes rejuvenescidos, cuja correlação com o teor de AR é exponencial, conforme sugerido por Zaumanis, Mallick e Frank (2014).

Para se estimar o teor ideal de AR, definido como aquele capaz de recuperar o PG do ligante virgem utilizado, optou-se por utilizar a reta da condição original dos ligantes. Dois motivos embasaram essa adoção: a condição envelhecida no RTFOT geraria teores mais elevados, considerando os resultados mais afastados do PG para o CAP 50/70 e RAP+10%; e o fato de que a condição original seria, neste caso, a determinante para a definição do PGH dos ligantes rejuvenescidos, tendo apresentado os menores valores entre as duas condições, conforme norma ASTM D 7643-16. O teor ideal, definido pela extrapolação da reta foi de 10,6% de AR.

Oportuno destacar que quando da produção das amostras iniciais, o teor de 10% reduziu demasiadamente a viscosidade do ligante, aumentando a penetração para 145x0,1mm, dificultando inclusive a realização dos ensaios no DSR por ter escorrido do amostrador quando aquecido. Um teor ideal de 10,6% poderia, portanto, ser considerado bem elevado caso a propriedade a ser recuperada fosse a viscosidade

ou penetração do ligante virgem. Estes parâmetros já foram empregados em outras pesquisas (GADLER, 2018; ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2014) e são alternativas mais práticas para dosagem de AR. No presente caso, se fosse utilizada a penetração do ligante virgem (52x0,1mm) como parâmetro a ser recuperado, o teor ideal de AR seria em torno de 2,8% apenas; ou seja, 3,8 vezes menor do que o teor de AR necessário para recuperar o PGH. Essa afirmação pode confirmar o exposto na Figura 6, que mostra que a recuperação do PGH exige teores de AR mais altos.

4.3.1.2 Suscetibilidade à deformação permanente pelo MSCR

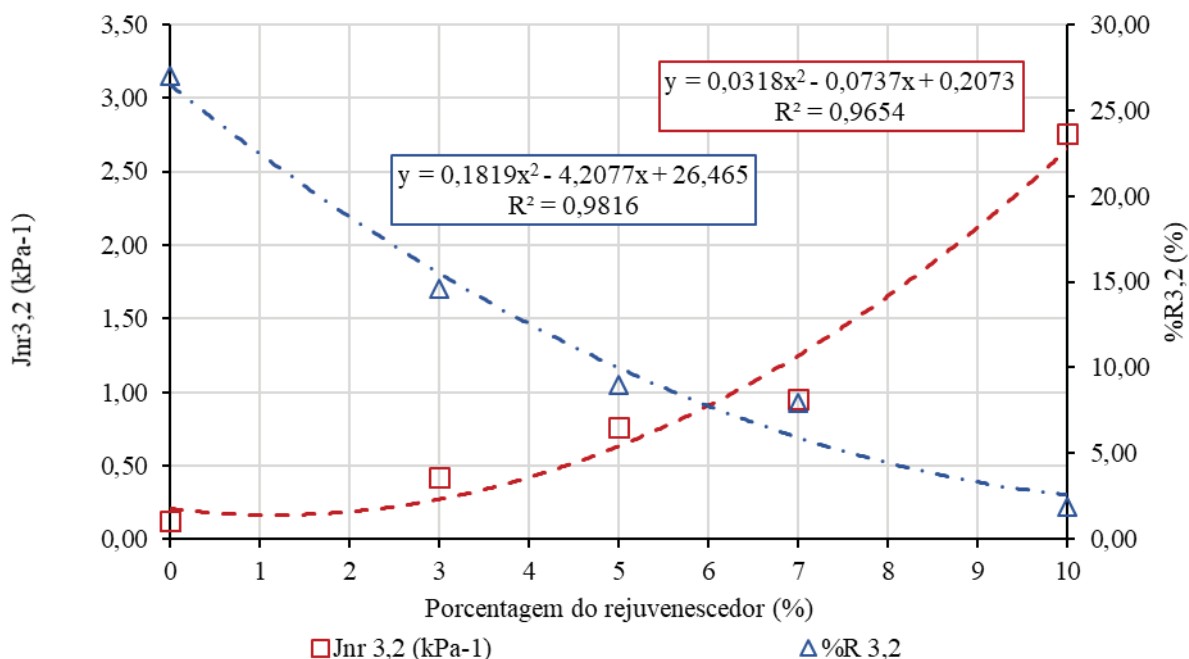
A susceptibilidade à deformação permanente foi avaliada por meio do ensaio MSCR, realizado também no DSR, estando os resultados expressos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do ensaio MSCR, realizado a 64°C (PGH do ligante virgem).

Ligante	%R _{0,1}	J _{nr0,1} (kPa ⁻¹)	%R _{3,2}	J _{nr3,2} (kPa ⁻¹)
CAP 50/70 RTFOT	0,09	4,825	-0,14	5,24
0% RTFOT	28,35	0,126	26,96	0,129
3% RTFOT	18,3	0,399	14,59	0,425
5% RTFOT	14,78	0,685	9,02	0,759
7% RTFOT	14,35	0,833	7,96	0,95
10% RTFOT	5,09	2,42	1,9	2,755

Os resultados demonstraram que, embora o teor de AR máximo utilizado de 10% tenha aparentado ser demasiado, o parâmetro J_{nr} determinado para esse teor não foi tão prejudicado, a ponto de permanecer inferior ao do ligante virgem, demonstrando um comportamento melhor à deformação permanente da amostra rejuvenescida. As correlações entre o teor de agente rejuvenescedor e as variáveis J_{nr} e %R podem ser aproximadas por equações do segundo grau, como mostra a Figura 39. Por meio destas equações, o valor correspondente de J_{nr} para o teor estimado de 10,6% seria de 3,00kPa⁻¹ com tensão de 3,2kPa, ao passo que o %R seria de 2,30% nesta mesma tensão.

Figura 39 - Gráfico de relação da taxa de recuperação (%R_{3,2}) e compliância não recuperável (Jnr_{3,2}) com o teor de AR.



A norma AASHTO M-332-18 estabelece a seguinte classificação de tráfego, baseada no Jnr:

- tráfego padrão ($Jnr_{3,2} \leq 4,5 \text{ kPa}^{-1}$);
- tráfego pesado ($Jnr_{3,2} \leq 2,0 \text{ kPa}^{-1}$);
- tráfego muito pesado ($Jnr_{3,2} \leq 1,0 \text{ kPa}^{-1}$); e,
- tráfego extremamente pesado ($Jnr_{3,2} \leq 0,5 \text{ kPa}^{-1}$).

Por esta classificação, o Jnr encontrado com o teor estimado de AR de 10,6% seria classificado como tráfego padrão, e um teor de AR abaixo de 8,8% já produziria um ligante apto ao tráfego pesado. Para se manter no limite do tráfego padrão, o teor de AR precisaria ser inferior a 12,8%. Verifica-se ainda que o Jnr_{3,2} para o CAP 50/70, cujo valor resultou em $5,24 \text{ kPa}^{-1}$, não se mostra adequado mesmo para tráfego padrão, conforme a norma citada. O teor que reestabeleceria este valor no ligante envelhecido seria de 13,8% de AR, porém não haveria sentido adotar-se um teor tão alto, pois representaria uma piora no desempenho do ligante.

4.3.1.3 Tolerância ao dano por fadiga pelo LAS

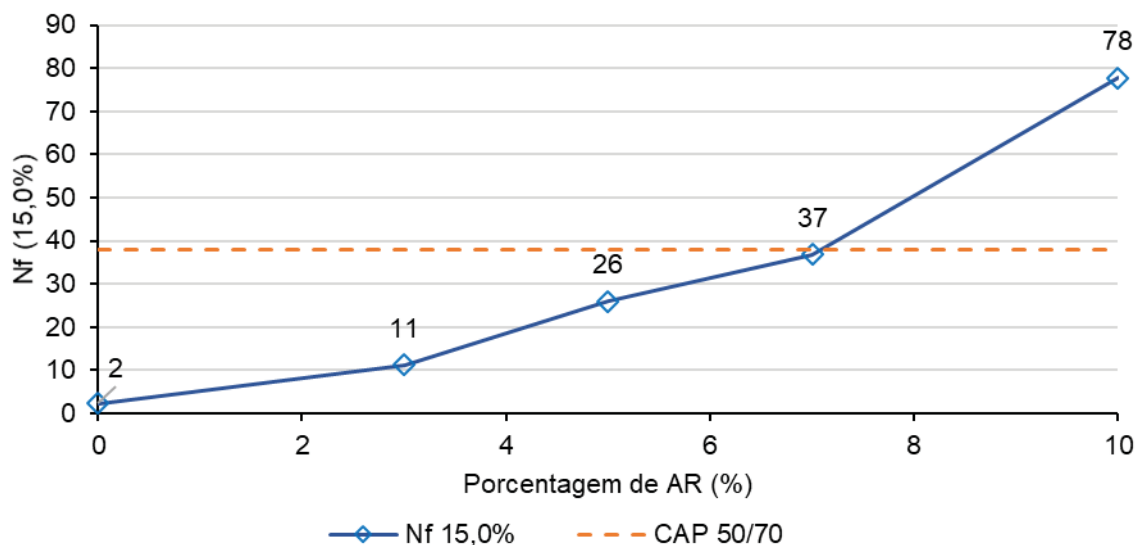
Os resultados resumidos das análises de tolerância à fadiga do ensaio LAS, são apresentados na Tabela 11 e na Figura 41. No quadro são apresentados os números de ciclos para ruptura nas amplitudes de 2,5, 5,0 e 15,0%, uma vez que as demais amplitudes seguem a mesma tendência.

Tabela 11 - Resumo dos resultados do ensaio de varredura de amplitude linear (LAS).

Amostra	Parâmetro A	Parâmetro B	Nf (2,5%)	Nf (5,0%)	Nf (15,0%)	$ G^* _{\text{sen } \delta}$ inicial	$ G^* _{\text{inicial}}$
CAP 50/70	63.811	-2,74	5.162	770	38	13,69	18,24
0,0	378.021	-4,43	6.538	304	2	31,50	57,81
3,0	265.818	-3,72	8.787	666	11	17,01	27,05
5,0	305.170	-3,46	12.800	1.162	26	12,40	18,55
7,0	370.139	-3,40	16.365	1.547	37	9,81	14,25
10,0	230.397	-2,95	15.409	1.991	78	4,96	6,52

A partir dos resultados, verifica-se que a tolerância ao dano por fadiga dos ligantes aumentou com a adição de AR; resultado já esperado, sendo essa melhora proporcional ao teor de AR adicionado. Considerando que o ensaio é realizado com amostras após o envelhecimento de curto prazo (RTFOT), pode-se inferir que na prática, os efeitos do AR se manteriam satisfatórios após o processo de usinagem e compactação das misturas asfálticas. Analisando os resultados de Nf para a amplitude de deformação de 15,0%, por exemplo, conclui-se que um teor pouco acima de 7,0% (Nf=37) já seria capaz de recuperar a mesma vida à fadiga do ligante virgem (Nf=38). Os resultados da vida de fadiga para essa amplitude são mostrados na Figura 40. Percebe-se que nessa amplitude de deformação os resultados se apresentam quase lineares até o teor de 7%, apresentando um salto maior para o teor de 10%.

Figura 40 – Vida de fadiga do ligante virgem e ligantes rejuvenescidos para a amplitude de 15,0%



Na Figura 41 são mostradas as curvas da vida de fadiga do ligante do RAP com os diferentes teores de AR, assim como do ligante virgem, em todas as amplitudes avaliadas.

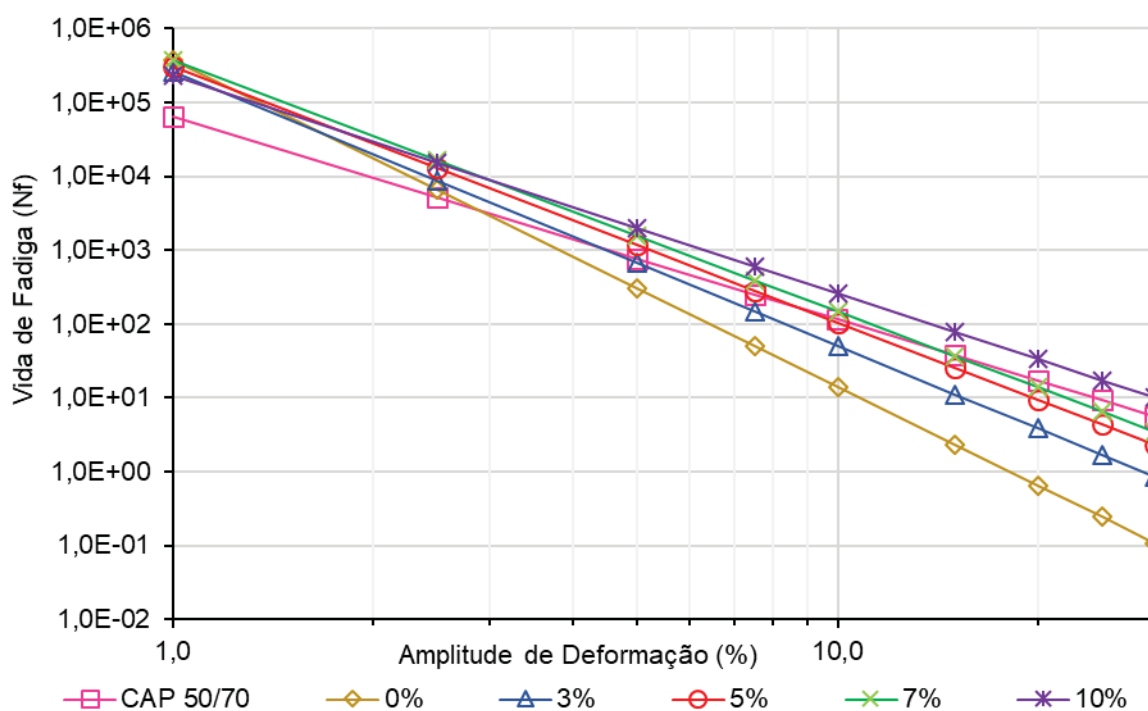


Figura 41 – Vida de fadiga do ligante virgem e ligantes rejuvenescidos.

Verifica-se que nas amplitudes acima de 10%, mais representativas para a avaliação da vida de fadiga (CHEN, ZHANG E BAHIA, 2021), apenas o teor de 10%

de AR apresentou comportamento superior ao do CAP 50/70 em termos de tolerância ao dano. O teor de 5%, entretanto, já apresentou significativa melhora em relação ao teor de 0%, sendo possível verificar no gráfico que o aumento de vida útil (em termos de número de ciclos) entre os teores de 0% e 5% foi bem maior que o aumento verificado entre os teores de 5% e 10%. Como conclusão tem-se que o teor estimado pelo PGH (10,6%) seria também adequado em relação ao seu comportamento à fadiga, superando inclusive o desempenho do ligante virgem utilizado.

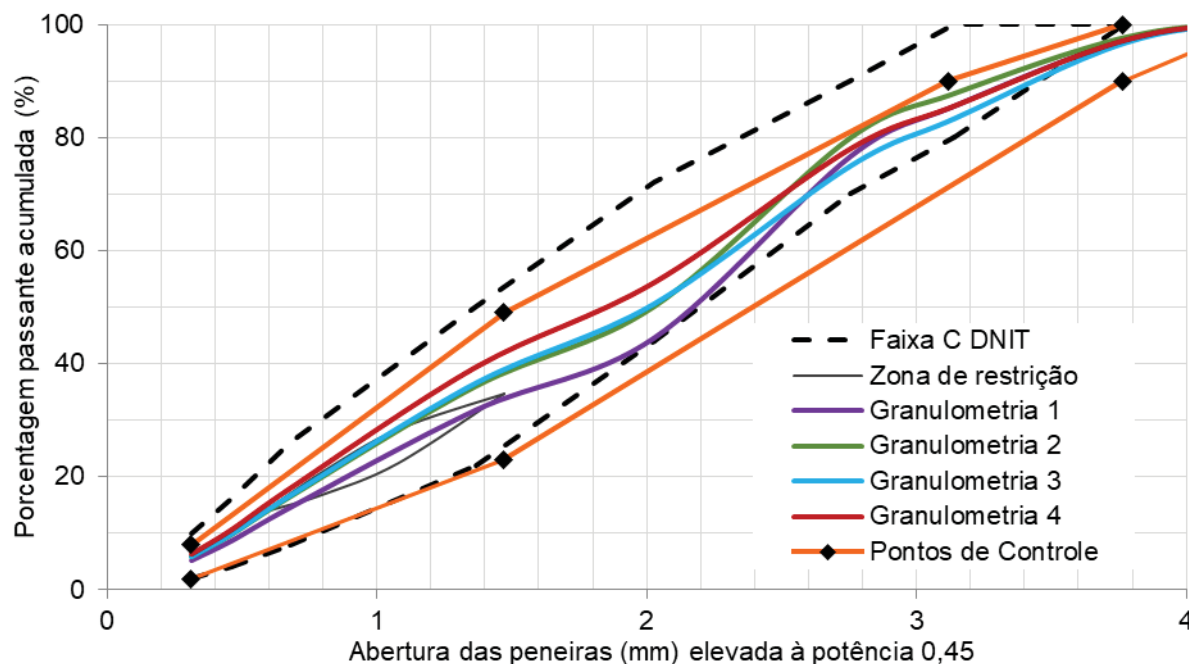
Há que se considerar também que a inclinação das retas é determinante para a predição do comportamento do ligante em amplitudes diferentes. Retas mais inclinadas (a exemplo da reta 0%) demonstram comportamentos de ligante mais suscetíveis à fadiga, considerando que há maior redução de vida útil com o aumento de amplitude de deformação. Retas menos inclinadas (a exemplo da 10%), por sua vez, demonstram comportamento mais favorável.

Considerando os resultados obtidos na etapa de dosagem, o teor ótimo de AR adotado, tido como aquele capaz de recuperar o PGH do ligante virgem, seria de 10,6%. Este foi o teor adotado para a produção das misturas asfálticas recicladas, contendo 50% de RAP, na sequência da pesquisa.

4.3.2 Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem da mistura asfáltica convencional desta pesquisa, que serviu de referência para a produção de todas as misturas do trabalho, foi realizada segundo os preceitos da metodologia Superpave, conforme o Manual da FHWA (2000). De início foram estabelecidas quatro composições granulométricas diferentes, buscando-se respeitar os pontos de controle do método Superpave, assim como a zona de restrição e os limites da Faixa C do DNIT. As granulometrias definidas para teste são mostradas na Figura 42. Em função da granulometria do pó de pedra utilizado, encontrou-se dificuldade para evitar a zona de restrição do método, sem escapar dos limites da Faixa C do DNIT e dos pontos de controle, de forma que uma das misturas produzidas (Granulometria 1) resultou em curva que atravessa essa área.

Figura 42 – Granulometrias testadas na dosagem da mistura de referência.



Para cada uma destas granulometrias, foram produzidos corpos de prova com um teor inicialmente estimado em 4,5%, baseado nos resultados já definidos por Joenck (2019) utilizando os mesmos agregados. O número de giros para compactação das amostras no CGS foi estabelecido em 100, conforme esclarecido no capítulo de métodos. Para cada mistura foram então determinadas as propriedades volumétricas, quais sejam: massa específica real seca da combinação dos agregados (G_{sa}), massa específica aparente seca da combinação dos agregados (G_{sb}), massa específica efetiva (G_{se}), grau de compactação inicial ($\% G_{mm}$ no $N_{inicial}$), grau de compactação de projeto ($\% G_{mm}$ no $N_{projeto}$), volume de vazios (V_v), volume de vazios no agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV), teor de ligante efetivo (P_{le}) e proporção de pó/asfalto (P/P_{le}). Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros volumétricos das misturas com as granulometrias iniciais.

Parâmetros Volumétricos	Granulometria 1	Granulometria 2	Granulometria 3	Granulometria 4	Critério Superpave
G _{sa}	2,795	2,795	2,793	2,794	-
G _{sb}	2,669	2,663	2,661	2,656	-
G _{se}	2,790	2,814	2,795	2,771	-
%G _{mm} N _{inicial}	86,2	86,2	87,1	87,1	<89%
%G _{mm} N _{projeto}	95,8	95,4	96,3	96,8	96%
V _v , %	4,225	4,636	3,676	3,179	4%
VAM	11,600	11,116	10,659	10,755	> 13%
RBV	63,580	58,290	65,509	70,445	65% a 75%
P _{le}	2,963	2,595	2,785	3,030	-
P/P _{le}	1,744	2,240	2,122	2,094	0,6 a 1,20

Pela análise dos parâmetros volumétricos, extrai-se que a mistura que mais se adequa aos limites do critério Superpave é a da granulometria 3, considerando especialmente a densificação e volume de vazios aos 100 giros, que deveria se aproximar dos 4%, e o RBV acima de 65%. Cabe citar que em todas as misturas, a proporção de pó/asfalto superou o limite máximo do método Superpave. Tal parâmetro, contudo, mostrou-se difícil de ser ajustado para os agregados utilizados face à sua maior massa específica, o que afetou no teor efetivo de ligante, razão pela qual optou-se por prosseguir a despeito desta constatação. O mesmo vale para os vazios do agregado mineral, que se situaram abaixo dos 13%, porém próximos de tal medida, não caracterizando uma deficiência na mistura.

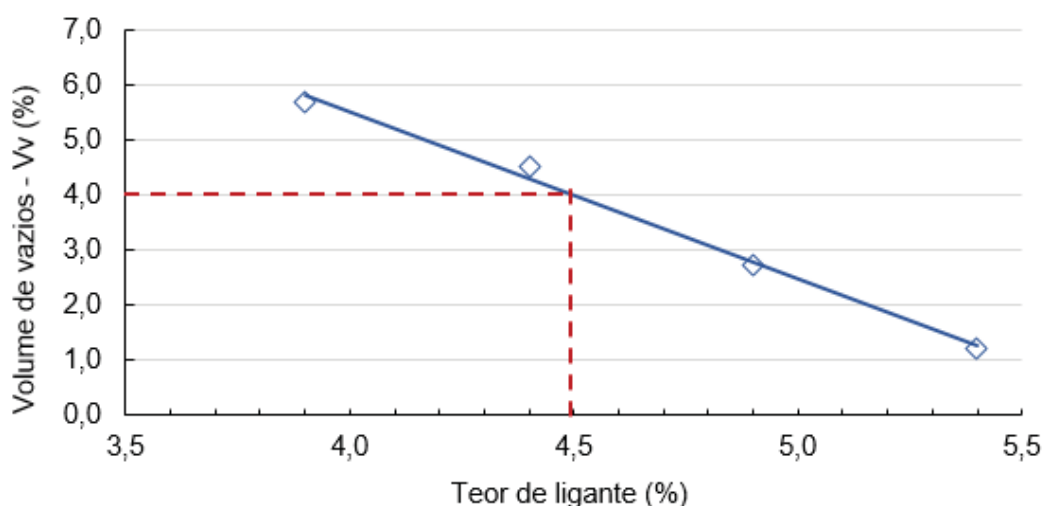
Escolhida a granulometria 3, procedeu-se com a correção do teor de ligante estimado ($P_{b,estimated}$), para que a mistura resultante possuisse volume de vazios pretendido de 4,0%, tendo este resultado em um teor de 4,4% de ligante. Foram então produzidas misturas nos teores de $\pm 0,5\%$ e $\pm 1,0\%$ do teor calculado, resultando nos teores de 3,9%, 4,4%, 4,9% e 5,4%. Os parâmetros volumétricos das misturas resultantes são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros volumétricos das misturas com diferentes teores de asfalto.

Parâmetros Volumétricos	Teor de ligante				Critério Superpave
	3,90%	4,40%	4,90%	5,40%	
G _{sa}	2,793	2,793	2,793	2,793	-
G _{sb}	2,661	2,661	2,661	2,661	-
G _{se}	2,8	2,8	2,8	2,8	-
%G _{mm} N _{inicial}	85,4	86,0	87,8	89,2	<89%
%G _{mm} N _{projeto}	94,327	95,495	97,271	98,803	96%
V _V , %	5,673	4,505	2,729	1,197	4%
VAM	11,109	10,889	10,819	10,523	> 13%
RBV	48,937	58,626	74,775	88,621	65% a 75%
P _{le}	2,193	2,555	3,219	3,679	-
P/P _{le}	2,695	2,313	1,836	1,606	0,6 a 1,20

A partir dos resultados foi traçada a curvas de volume de vazios em função do teor de asfalto, que permite determinar o teor ideal para se atingir o volume de vazios de 4,0%, conforme mostra a Figura 43, sendo o teor ótimo determinado de 4,5%.

Figura 43 – Gráfico do volume de vazios em função do teor de asfalto, e determinação do teor ótimo.



Considerando ter sido esse o teor inicialmente adotado, cujas propriedades volumétricas já foram checadas no início do procedimento de dosagem (Tabela 12), define-se este como o teor adotado para todas as misturas produzidas na pesquisa. Ressalta-se não ser o objetivo da pesquisa buscar atender a todos os parâmetros Superpave, situação que demandaria a substituição de frações granulométricas individuais, ou mesmo dos agregados utilizados. Considerando ser o intuito da

pesquisa a análise do comportamento da mistura convencional em relação às misturas recicladas e mornas, e considerando que as mesmas características de dosagem serão mantidas para todas as misturas (granulometria e teor de asfalto), entende-se a dosagem aqui conduzida como suficiente para os objetivos pretendidos.

As informações de dosagem para a produção de corpos de prova da mistura convencional padrão, com compactação no CGS, são mostradas na Tabela 14.

Tabela 14 - Composição da mistura convencional padrão, para CPs de 1200g.

Peneira	Abertura (mm)	Passante (%)	Retido (%)	Retido (g)
1"	25	100,00	0,00	0,0
3/4"	19,1	96,80	3,20	38,4
1/2"	12,7	83,41	13,39	160,6
3/8"	9,5	75,05	8,37	100,4
#4	4,8	50,62	24,42	293,1
#10	2	36,63	13,99	167,9
#40	0,42	16,71	19,92	239,1
#80	0,18	9,99	6,72	80,6
#200	0,075	5,91	4,08	49,0
FUNDO		0,00	5,91	70,9
Massa dos agregados (g)				1146,0
Teor de ligante (%)				4,5
Massa do ligante (g)				54,0
Massa total do corpo de prova (g)				1200,0

Para a produção das misturas recicladas foi necessário o cálculo da contribuição de agregados e de ligante do RAP, de forma a adicionar os agregados e ligante virgens apenas na proporção necessária para compor a exata granulometria da mistura convencional. Para tanto foi determinado, além da granulometria de cada fração do RAP (graúda e miúda), o teor de ligante presente em ambas, através do ensaio de Rotarex.

Considerando que a fração graúda do RAP (retida na peneira 4) já possui quantidade significativa de agregados menores (após a extração do ligante), o uso da fração miúda foi limitado à 10% da mistura asfáltica, sendo os outros 40% utilizados da fração graúda do RAP, completando os 50% de adição de RAP. A Tabela 15 resume os cálculos e as parcelas da composição das misturas recicladas, e a granulometria de cada um dos materiais constituintes é mostrada na Tabela 16. Verifica-se que a quantidade de agregados virgens retidos na peneira #200 a serem adicionados à mistura é de apenas 0,3 gramas, representando apenas 0,625% do

total de 48,0 gramas necessários para compor essa fração da granulometria em um CP de 1200 gramas. Por esta razão, essa fração de material (#200) foi a que limitou a adição de maior quantidade de RAP miúdo à mistura asfáltica, limitando este percentual à 10% apenas. Um percentual de adição de RAP miúdo maior que 10% implicaria em uma adição de frações da peneira #200 superior ao necessário para a mistura projetada e, portanto, prejudicaria os comparativos da pesquisa.

Tabela 15 - Composição das misturas recicladas com adição de 50% de RAP.

Massas				
Descrição	RAP Graúdo	RAP Miúdo	Agregado virgem	Mistura total
Percentual na composição (%)	40%	10%	50%	100%
Teor de ligante (%)	4,72%	5,74%	-	4,50%
Massa de ligante (g)	6,89	22,66	-	54
Massa de agregados (g)	114,6	458,4	573	1146
Massa total do material (g)	121,5	481,1	573	1175,6
Ligante virgem a ser adicionado (g)				21,3
AR a ser adicionado (10,6% do total de ligante do RAP) (g)				3,1
Massa total do CP (g)				1200

Tabela 16 - Granulometria das misturas recicladas com adição de 50% de RAP.

Granulometria								
Peneira	Abertura	Retido Total (g)	Compos. RAP Miúdo	Retido RAP Miúdo (g)	Compos. RAP Graúdo	Retido RAP Graúdo (g)	Compos. Agreg. Virgem	Retido Agreg. Virgem (g)
1"	25,0	0,0	100,00	0,0	100,00	0,0	100,00	0,0
3/4"	19,1	37,6	100,00	0,0	100,00	0,0	96,80	37,6
1/2"	12,7	157,4	100,00	0,0	97,11	13,9	83,41	143,5
3/8"	9,5	98,4	100,00	0,0	89,51	36,6	75,05	61,8
#4	4,8	287,1	100,00	0,0	63,19	126,6	50,62	160,5
#10	2,0	164,5	81,27	22,8	44,91	87,9	36,63	53,8
#40	0,420	234,2	42,10	47,6	22,07	109,9	16,71	76,7
#80	0,180	79,0	26,01	19,5	13,23	42,5	9,99	16,9
#200	0,075	48,0	13,14	15,6	6,57	32,0	5,91	0,3
FUNDO		69,5	0,00	16,0	0,00	31,6	0,00	21,9
TOTAIS		1175,6	-	121,5	-	481,1	-	-

Para as misturas mornas e recicladas mornas, foram mantidas as mesmas proporções da Tabela 14 e Tabela 16, respectivamente, com a adição da quantidade de 0,5% de aditivo surfactante ao ligante virgem em peso do ligante total. Na

compactação das misturas mornas, verificou-se uma redução do número de giros necessário para se atingir o volume de vazios esperado, em relação à mistura quente. Esse fato demonstra que estas misturas possuem melhor trabalhabilidade, mesmo com redução da temperatura. Situação semelhante também foi reportada por Gadler (2018) e Johnston *et al.* (2015), com o uso do mesmo aditivo surfactante.

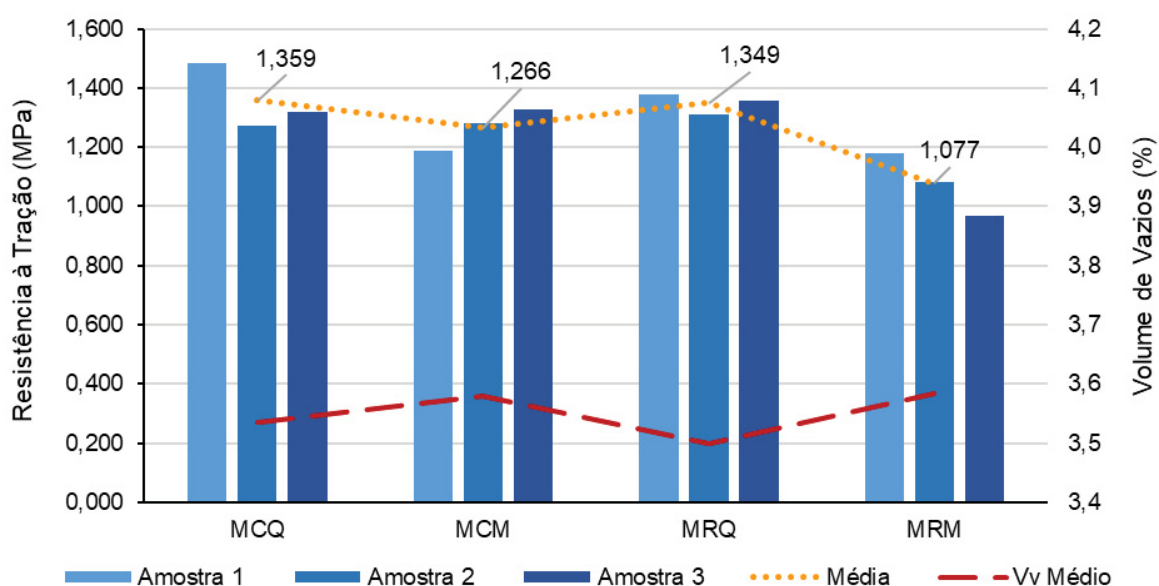
4.4 ETAPA 4 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Na sequência são apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada um dos ensaios de análise do comportamento mecânico das misturas produzidas.

4.4.1 Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração foi conduzido na prensa Marshall, através da compressão diametral de 3 amostras de cada mistura asfáltica estudada. Conforme verifica na Figura 44, todos os resultados superam o mínimo especificado pela norma DNIT 031/2006-ES para camada de rolamento, que é de 0,65 MPa.

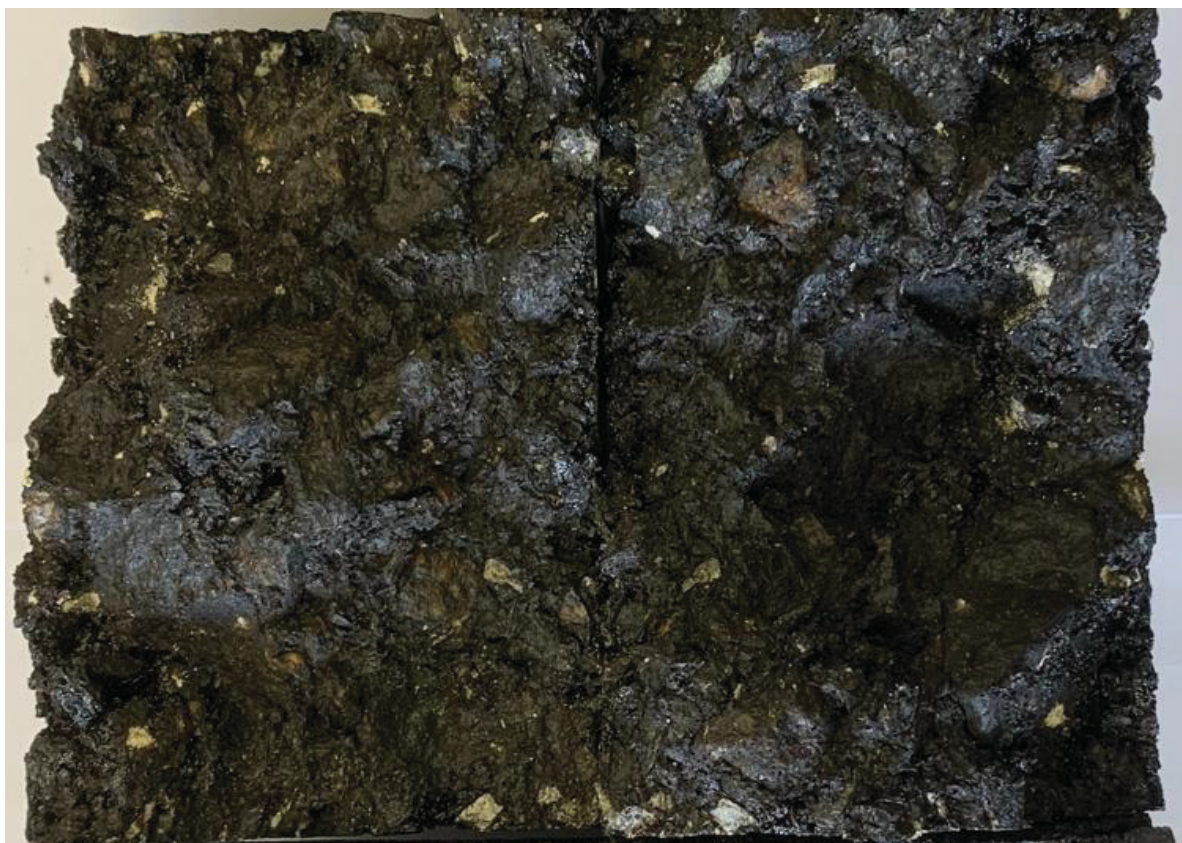
Figura 44 - Resistência à tração por compressão diametral das misturas produzidas



A análise dos resultados mostrou que a utilização de 50% de RAP praticamente não alterou os resultados da mistura a quente. Essa adição, contudo, teve efeitos significativos na mistura morna, considerando ter havido queda de 15% na resistência da mistura reciclada em relação à convencional. A técnica de mistura morna empregada nas misturas sem RAP teve impacto menor nos resultados, apresentando redução de apenas 9% na resistência à tração. O coeficiente de variação dos resultados de uma mesma mistura não foi superior à 10% para nenhuma das misturas, tendo os resultados da mistura reciclada a quente apresentado maior consistência, com variação de apenas 2,6%. O volume de vazios das amostras também pode ter impactado os resultados, podendo-se verificar pelo gráfico que maiores volumes de vazio conduziram a menores resultados de resistência, ainda que essa diferença oscilasse em torno de 0,1% apenas.

A análise dos corpos de prova após a ruptura demonstrou que esta ocorreu principalmente pela falta de coesão do ligante, e em pequena parte nas interfaces ligante-agregado, como mostra a Figura 45.

Figura 45 - Detalhe da superfície de ruptura do corpo de prova da mistura convencional a quente.



Fonte: O Autor.

Na imagem é mostrada a superfície de ruptura de um corpo de prova da mistura convencional a quente, onde é possível perceber que houve pouca quebra de agregados, demonstrando não haver fragilidade nesse material utilizado. Nas misturas recicladas, contudo, verificou-se um aumento sutil na quebra de agregados, o que pode ter ocorrido em função da maior fragilidade dos agregados do RAP, porém não significativo.

O emprego das técnicas combinadas de mistura reciclada e morna foi o que mais apresentou prejuízos na resistência à tração. A mistura reciclada morna (MRM) apresentou redução de até 20% em relação ao resultado das demais misturas no ensaio. Considerando que a ruptura ocorreu majoritariamente por falha coesiva do ligante, deduz-se que a interação entre os aditivos surfactante e rejuvenescedor não ocorreu da forma esperada no ligante, enfraquecendo sua adesão interna entre partículas. A incompatibilidade entre os aditivos poderia ser a causa, porém os resultados obtidos por Lu *et al.* (2016), utilizando o mesmo aditivo surfactante e o mesmo AR desta pesquisa, demonstraram que a combinação de ambos pode conduzir a resultados superiores do que a utilização individual de cada um.

O tempo de mistura do aditivo surfactante com os agregados pode ter tido impacto nos resultados, considerando que nas misturas convencionais esse tempo foi de 240 segundos (o ligante com aditivo era inserido logo no início do processo de usinagem), e nas misturas recicladas foi de apenas 120 segundos (o ligante com o aditivo era adicionado após misturar o RAP + AR com os agregados virgens). Considerando que, conforme o fabricante, o aditivo surfactante necessita de cisalhamento para ativação, o menor tempo de mistura pode não ter fornecido o adequado cisalhamento necessário para os efeitos esperados.

O menor tempo de contato entre o agente surfactante e o ligante do RAP também pode ter afetado os resultados. Isso porque a temperatura de aquecimento do RAP na mistura morna era 30°C inferior ao dos agregados para mistura a quente, e também o aditivo surfactante foi adicionado ao ligante virgem, para então ser misturado com o RAP aquecido. A temperatura inferior de aquecimento dos agregados pode não ter amolecido suficientemente o ligante envelhecido, para uma completa e adequada mistura com o agente surfactante e com o ligante virgem, no tempo de mistura empregado.

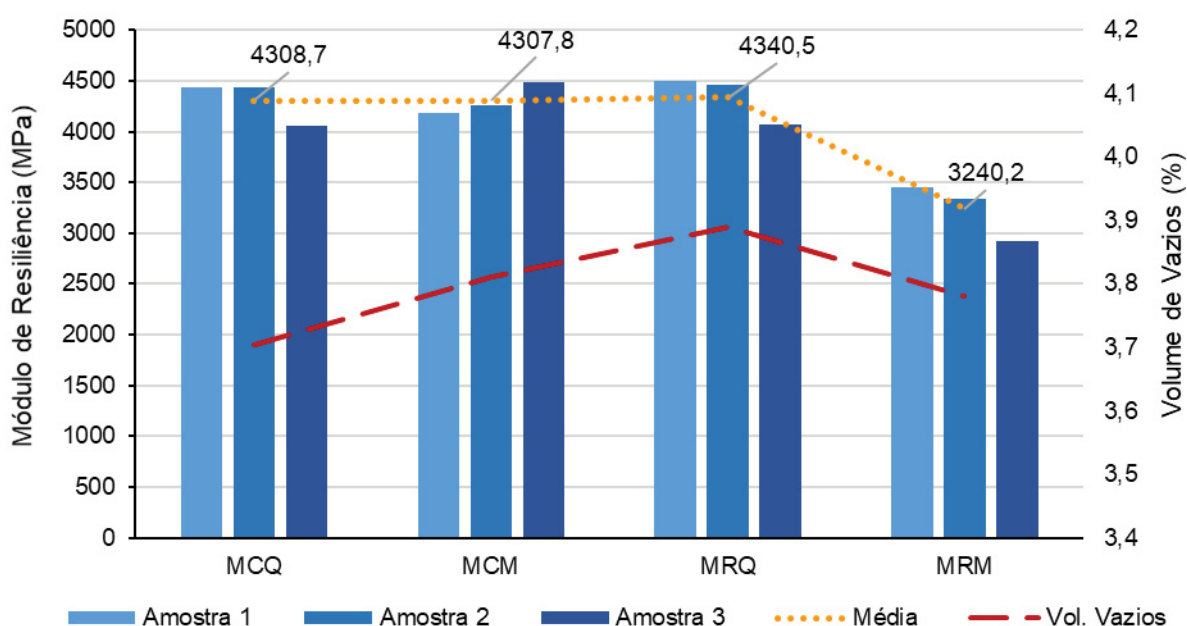
Acredita-se que a combinação destes fatores (menor tempo de mistura do surfactante e temperatura reduzida de aquecimento do RAP) pode ter conduzido a

uma mistura de compostos (ligante envelhecido + ligante virgem + AR + surfactante) insuficientemente homogênea e mais suscetível a falhas, especialmente nas interfaces com o agregado do RAP, aonde há a possibilidade de remanescer uma camada de ligante envelhecido não reativado (Figura 8).

4.4.2 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência (MR) foi determinado para três amostras de cada mistura pré-condicionadas a 25°C, sendo o módulo da mistura tomado como a média dos resultados. Em cada uma das amostras, o módulo foi determinado em duas posições do CP, sendo a segunda determinação em posição girada 90° em relação à primeira, estabelecendo-se a média como resultado final. Tal medida é importante em misturas que utilizam agregados maiores, pois a posição destes no CP pode influenciar os resultados a depender do sentido de aplicação de carga. Os resultados do módulo de resiliência para as misturas da pesquisa são mostrados na Figura 46.

Figura 46 - Módulo de resiliência resultante para as misturas analisadas.



Na análise dos resultados pode-se verificar que as misturas MCQ, MCM e MRQ apresentaram valores equivalentes de MR. A proximidade entre os resultados entre MCQ e MCM indica que a aplicação da técnica de misturas mornas tem pouco impacto no comportamento resiliente da mistura. Porém, Bernucci e Moura (2016), com o uso do mesmo aditivo surfactante, encontraram valores de módulo de resiliência da mistura morna superiores em 35% em comparação ao da mesma mistura usinada a quente. Johnston *et al.* (2015), também utilizando o mesmo aditivo, encontraram resultados opostos, tendo verificado a diminuição do MR na mistura morna, em relação à usinada a quente. Tais análises, combinadas aos resultados da Figura 46, demonstram que não há regra sobre o efeito desse aditivo surfactante no MR das misturas mornas, podendo variar a depender do tipo de ligante e quantidade de aditivo utilizado.

Quanto às misturas recicladas, sabe-se que a adição de RAP às misturas asfálticas provoca um aumento em sua rigidez, que se reflete no aumento do módulo de resiliência. A adição de AR, porém, tem efeito inverso, amolecendo o ligante e reduzindo o módulo. A similaridade entre os resultados das misturas MCQ e MRQ (diferença de apenas 0,7%) é um indicador de que o AR cumpriu adequadamente a sua função, amolecendo o ligante envelhecido e atenuando o impacto de sua maior rigidez no comportamento da mistura reciclada.

Os resultados para a mistura reciclada morna demonstraram novamente que a combinação dos aditivos rejuvenescedor e surfactante se reflete em piora no desempenho, em relação à aplicação destes aditivos isoladamente. A mistura MRM apresentou um MR 25% inferior à média das demais misturas, resultado que remete novamente às possibilidades de redução demasiada (30°C) na temperatura da mistura morna e insuficiente mistura entre o surfactante e o ligante envelhecido (menor tempo de usinagem).

4.4.3 Resistência à Fadiga

Os ensaios de fadiga foram conduzidos na máquina universal UTM do LAMP, utilizando a ruptura completa do corpo de prova como critério de falha, conforme

preconiza a norma DNIT 183-2018 – ME. Os resultados médios para cada nível de tensão e mistura são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados médios dos ensaios de fadiga para cada nível de tensão e mistura.

%RT	T. de Tração (MPa)	Dif. T. (MPa)	ϵ_r médio	Nº Ciclos médio para ruptura	Tempo médio de ensaio
MCQ					
20%	0,272	1,09	0,000046	40680	11h 18m
30%	0,408	1,63	0,000068	8897	2h 28m
40%	0,544	2,17	0,000106	2305	0h 38m
MCM					
20%	0,253	1,01	0,000049	37999	10h 33m
30%	0,380	1,52	0,000088	4915	1h 22m
40%	0,506	2,03	0,000112	1350	0h 22m
MRQ					
20%	0,270	1,08	0,000064	46574	12h 56m
30%	0,405	1,62	0,000096	5828	1h 37m
40%	0,540	2,16	0,000139	1594	0h 27m
MRM					
20%	0,215	0,86	0,000058	40286	11h 11m
30%	0,323	1,29	0,000101	5237	1h 27m
40%	0,431	1,72	0,000117	2469	0h 41m

De posse dos resultados, foram estabelecidas as correlações matemáticas entre as variáveis envolvidas através da aproximação por equações exponenciais, conforme estabelece a norma DNIT 183-2018 – ME. As correlações mais comuns empregadas para expressar a curva de fadiga dos materiais são entre o número de ciclos para falha e a deformação específica resiliente (Figura 47) e entre o número de ciclos para falha e a diferença de tensões (Figura 48), expressas em gráficos log-log.

Conforme estabelecido em norma, o coeficiente de determinação (R^2) destas curvas deve ser maior que 0,8 devendo-se aumentar o número de CPs ensaiados em caso de coeficiente inferior. Verifica-se nos gráficos que todas as curvas obtidas apresentaram valores de coeficiente R^2 superior à 0,8, sendo 0,84 o menor deles e os demais maiores ou iguais à 0,9. Da análise da Figura 47 extrai-se que as misturas com melhor comportamento resiliente foram as misturas recicladas MRQ e MRM, representadas pelas retas superiores, que apresentam um melhor desempenho para uma mesma deformação. Tal constatação demonstra a efetividade do AR no

rejuvenescimento do ligante envelhecido, considerando que usualmente as misturas com adição de RAP apresentam desempenho inferior à fadiga quando não utilizado AR. Já em relação à diferença de tensões, da Figura 48 se destacam as misturas à quente MCQ e MRQ, cujo comportamento se mostrou superior às misturas mornas MCM e MRM.

Figura 47 - Curvas de fadiga das misturas; Número de ciclos para falha X Def. específica resiliente.

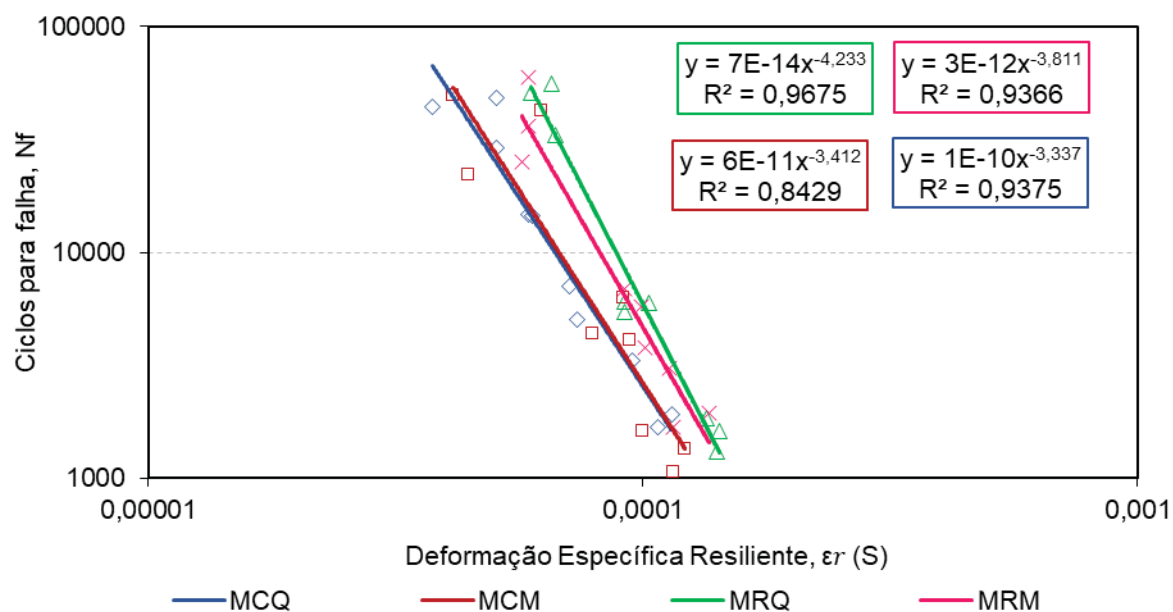
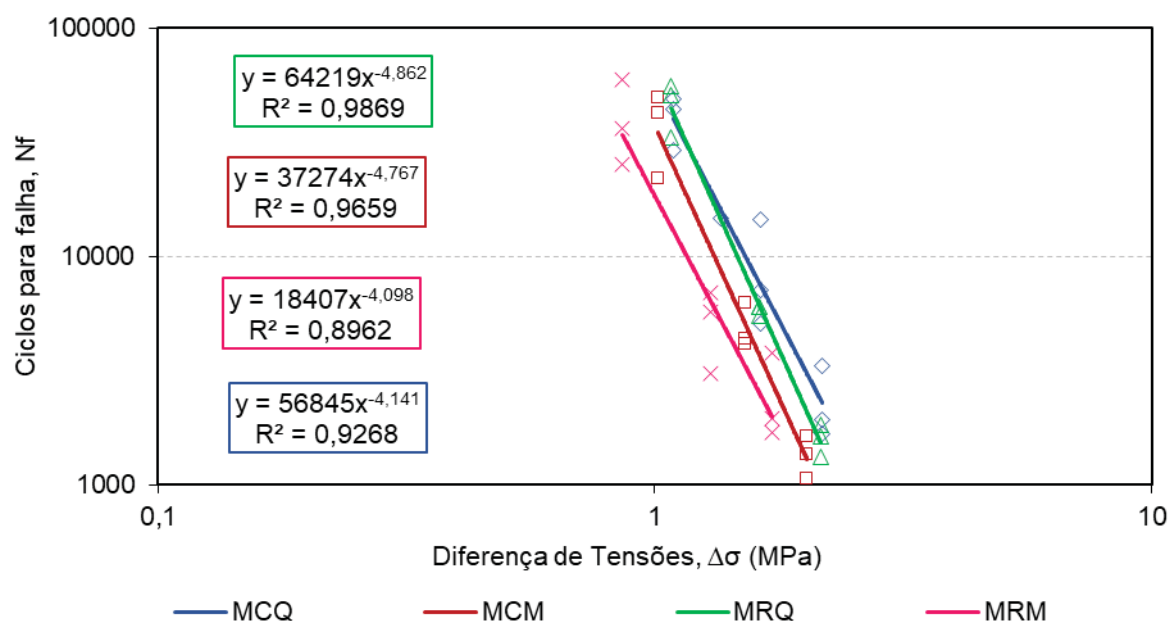


Figura 48 - Curvas de fadiga das misturas; Número de ciclos para falha X Diferença de tensões.



Para buscar uma forma de classificar as misturas asfálticas em termos de desempenho à fadiga, Fritzen *et al.* (2019) fez uso do Fator de Fadiga da Mistura (FFM), que consiste em determinar a área sob a curva de fadiga versus deformação na escala log-log, no segmento compreendido entre 100μ e 250μ de deformação de tração. Correlacionando o FFM com o módulo de resiliência de 105 misturas asfálticas diferentes, e efetuando o cálculo de número de repetições de eixo padrão dessas misturas através do programa MeDiNa, até atingir 30% de área trincada (parâmetro do programa para resistência à fadiga), os autores estabeleceram cinco classes de misturas (0, 1, 2, 3 e 4), subdivididas pelo Número N ao qual essas misturas resistiriam. Os autores ressaltam que as misturas com valores maiores de FFM e módulo de resiliência tenderão a melhores comportamentos à fadiga em pavimentos flexíveis típicos brasileiros. Os limites para cada uma das classes são mostrados no Quadro 3.

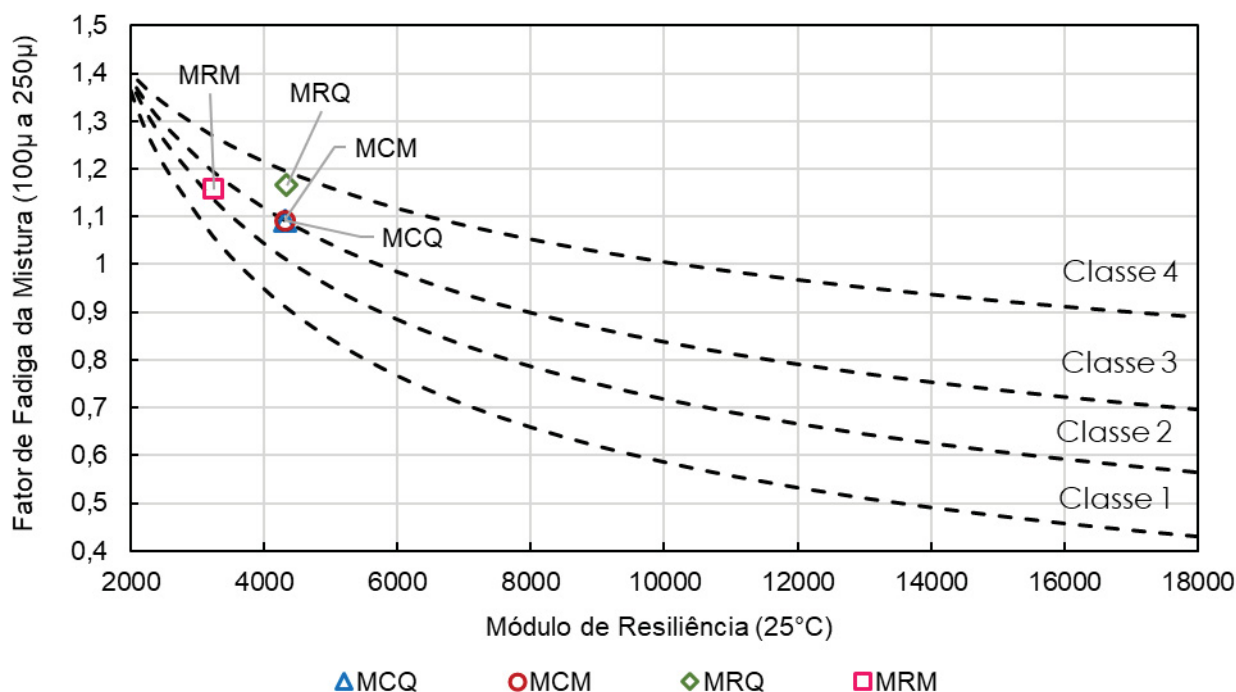
Quadro 3 - Correlações estatísticas entre MR e FFM conforme as faixas de repetições do eixo padrão para 30% de área trincada

Faixa	Intervalo	Regressão	R ²
0	$N \leq 4,5 \times 10^6$	-	-
1	$4,5 \times 10^6 < N \leq 6,0 \times 10^6$	$FFM = 74,58 \times MR^{-0,526}$	0,83
2	$6,0 \times 10^6 < N \leq 7,5 \times 10^6$	$FFM = 31,31 \times MR^{-0,410}$	0,95
3	$7,5 \times 10^6 < N \leq 1,0 \times 10^7$	$FFM = 15,37 \times MR^{-0,316}$	0,93
4	$N > 1,0 \times 10^7$	$FFM = 6,77 \times MR^{-0,207}$	0,67

Fonte: Fritzen *et al.* (2019)

Conforme os autores, as misturas da classe 0 não são indicadas para aplicação em rodovias, não tendo sido consideradas no programa MeDiNa. Os melhores desempenhos são apresentados nas misturas das classes 3 e 4. O resultado da classificação para as misturas da pesquisa é mostrado na Figura 49. Verifica-se que à exceção da MRQ, que se situa na Classe 3, todas as outras misturas se encaixam na Classe 2 estabelecida. Pela análise empírica realizada pelos autores, a mistura MRQ seria capaz de resistir melhor à fadiga que as demais, resistindo à um número N de eixos padrão de até 1×10^7 .

Figura 49 - Fator de Fadiga das misturas (FFM) em função do módulo de resiliência (MR).

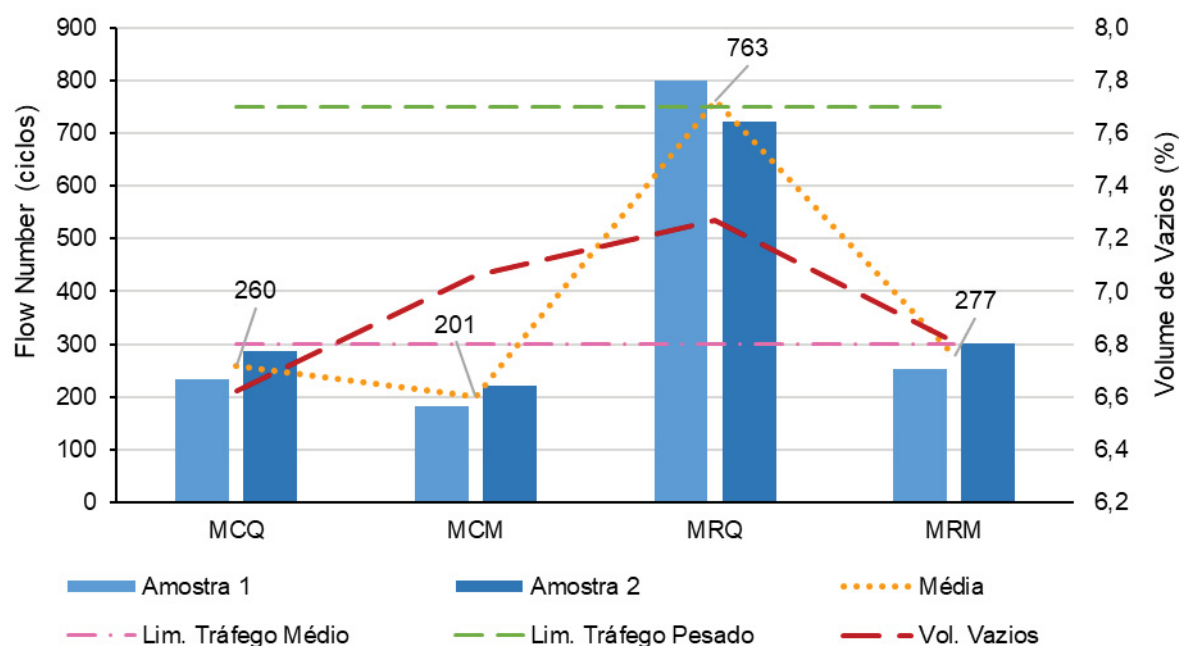


Uma análise mais detalhada sobre esta vida útil será mostrada no item 4.5, aonde será determinado o Número N admissível para cada uma das misturas com base no seu desempenho à fadiga através do software MeDiNa.

4.4.4 Flow Number

Os resultados do FN, realizado com o objetivo de avaliar a suscetibilidade das misturas à deformação permanente, são mostrados na Figura 50 e as classes de desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação são as mostradas no Quadro 4, conforme o Manual de uso do programa MeDiNa (DNIT, 2020). Os limites para tráfego médio e pesado foram inseridos no gráfico para melhor interpretação dos resultados. Percebe-se que apenas a mistura reciclada a quente apresentou resultados satisfatórios para tráfego pesado, com resultado de FN superior à 750 ciclos. As demais misturas se enquadrariam na Classe 2, sendo adequadas para segmentos com número N equivalente ao volume de tráfego baixo.

Figura 50 - Resultado dos ensaios de determinação do Flow Number.



Quadro 4 - Limites das classes de desempenho das misturas asfálticas à deformação permanente.

Classe	Flow Number (FN)	N recomendado Condições Normais	N recomendado Condições Severas
1	FN < 100 ciclos	N < 1e6	Não recomendado
2	100 ciclos ≤ FN < 300 ciclos	1e6 ≤ N < 1e7	N < 1e6
3	300 ciclos ≤ FN < 750 ciclos	1e7 ≤ N < 1e8	1e6 ≤ N < 1e7
4	750 ciclos ≤ FN < 2000 ciclos	N ≥ 1e8	1e7 ≤ N < 1e8
5	FN ≥ 2000 ciclos	-	N ≥ 1e8

Fonte: DNIT, 2020.

Conforme visto no referencial teórico, a suscetibilidade à deformação permanente das misturas asfálticas recicladas é usualmente menor, considerando a maior rigidez do ligante envelhecido. Entretanto, quando se faz uso do agente rejuvenescedor, como no caso da presente pesquisa, o ligante em tese retornaria às suas condições originais ou até mesmo se mostraria mais macio, como foi o caso presente, considerando a proporção de AR determinada no capítulo 4.3.1. Essa verificação foi feita por Suzuki (2019), que comparou os resultados de FN para uma mistura com 50% de RAP com e sem AR, tendo verificado diminuição do FN após adição do AR.

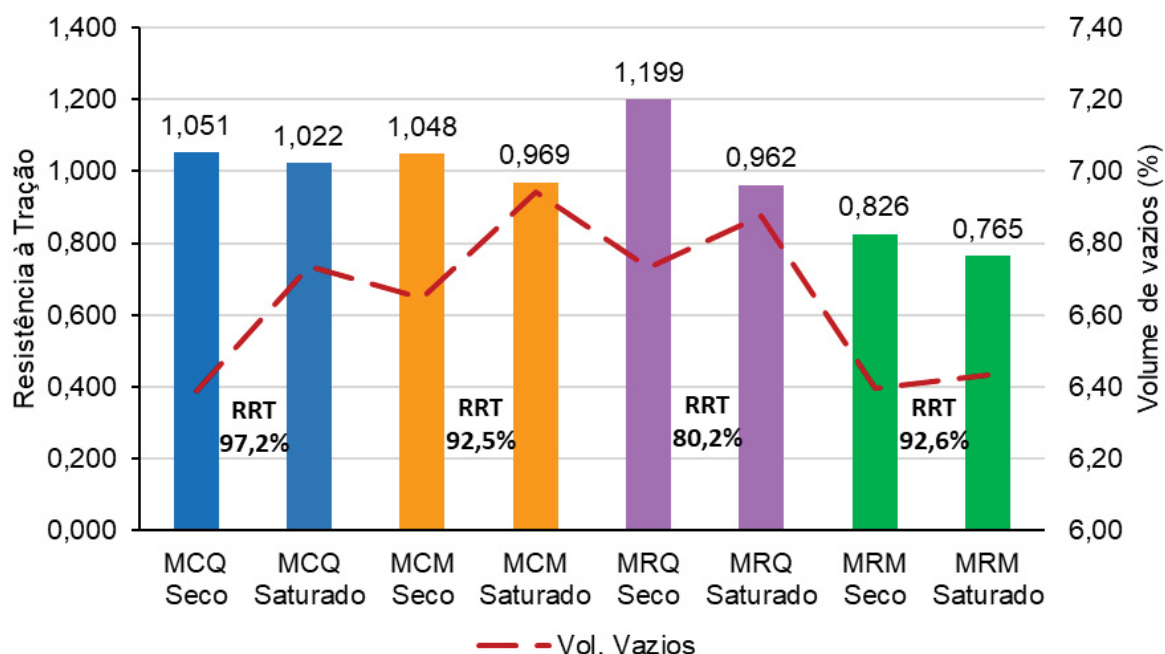
O resultado da mistura MRQ, contudo, demonstra que mesmo com a adição de AR nas proporções determinadas, seu comportamento é consideravelmente superior ao das misturas convencionais. Mesma conclusão foi obtida por Suzuki (2019). Os dados da Figura 50 mostram que a MRQ apresentou um número de ciclos 293% maior que a sua mistura correspondente convencional (MCQ). Esse bom comportamento, porém, não se repetiu para a mistura reciclada morna, cujos resultados situaram-se muito próximos das misturas convencionais. Aparentemente, a redução de 30°C na temperatura de usinagem não produziu efeitos positivos nas misturas, especialmente na mistura MRM, que apresentou redução de 64% em relação à sua equivalente a quente (MRQ).

A análise dos dados mostrou ainda que o volume de vazios não apresentou correlação direta com os resultados. A mistura MRQ, que apresentou a maior média de valor para este parâmetro, apresentou o maior resultado em termos de número de ciclos para o *Flow Number*, contrariando as expectativas de que um maior volume de vazios conduziria à um pior desempenho mecânico.

4.4.5 Dano por Umidade Induzida.

A resistência ao dano por umidade induzida é representada pela razão entre as resistências à tração (RRT) de amostras condicionadas (saturadas) e não condicionadas (secas). As médias dos resultados dos ensaios de resistência à tração das amostras são mostrados na Figura 51. A comparação entre os resultados de RT e os volumes de vazios das amostras demonstra haver uma relação entre estes parâmetros, ainda que sutil, considerando que todas as amostras respeitaram os limites do parâmetro definidos na norma DNIT 180/2018 ($7\% \pm 1\%$). Da análise da Figura 51 resta claro que maiores volumes de vazios tendem a conduzir a piores desempenhos na resistência à tração, tanto para as amostras secas como para as saturadas condicionadas.

Figura 51 - Resultados dos ensaios de resistência à tração das amostras secas e saturadas.



A análise dos resultados permite diagnosticar também que a mistura convencional a quente apresentou o melhor resultado de resistência ao dano, seguida pelas misturas reciclada morna e convencional morna. A mistura reciclada a quente apresentou a menor resistência entre as demais, com RRT de 80,2%. De forma a melhor diagnosticar essa ocorrência, verificou-se que a mistura MRQ apresentou o maior coeficiente de variação entre os resultados de resistência à tração, sendo de 12% em média, enquanto para as demais misturas esse coeficiente foi da ordem de 5% apenas. Ainda, a diferença entre a resistência à tração das amostras secas das misturas MCQ e MRQ mostrada na Figura 44 foi bem inferior à da Figura 51, ainda que o volume de vazios seja diferente para ambas. Tais constatações mostram que a mistura MRQ não necessariamente possui desempenho ruim em relação às demais, mas sim que mais amostras seriam necessárias para confirmação desse desempenho.

Os resultados de RRT para as misturas mornas MCM e MRM vão de encontro às conclusões de Lu *et al.* (2016), cujos resultados também demonstraram não haver alteração na resistência o dano por umidade entre as misturas mornas convencionais e recicladas. Já em relação às misturas quentes e mornas, não há consenso sobre as tendências. Bernucci e Moura (2016) comprovaram haver superioridade das misturas mornas, enquanto Farooq *et al.* (2018) demonstrou melhores resultados das misturas

a quente, ambas as pesquisas utilizando o mesmo aditivo surfactante desta pesquisa. Nos resultados obtidos por este autor para as misturas convencionais MCQ e MCM, a RRT da mistura produzida à quente foi superior. Fato contrário ocorreu nas misturas recicladas, tendo a mistura MRM apresentado comportamento 15,5% superior à MRQ. Deste resultado extrai-se que a adição de RAP à mistura resulta em diminuição na resistência ao dano por umidade, ao passo que a adição de agente surfactante atenua essa diminuição, visto que este proporciona a melhor adesividade do ligante aos agregados.

No entanto, todas as misturas demonstraram comportamento adequado às ações deletérias da água, tendo apresentado resultados de RRT superiores à 70%, mínimo exigido pela norma DNIT ES 031-2006. De acordo com a metodologia Superpave, esse mínimo seria de 80% (FHWA, 2000), também atingido por todas as misturas.

4.5 ETAPA 5 - SIMULAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO NO MEDINA

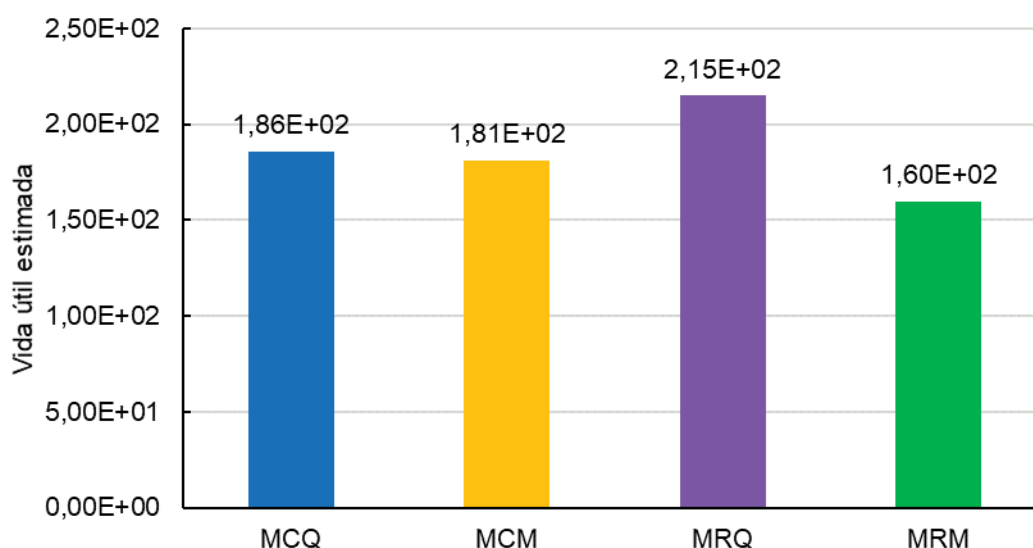
De posse dos dados de comportamento mecânico das misturas, foi feita a análise do dimensionamento nos softwares MeDiNa e AEMC. Os valores de tensão máxima na fibra inferior do revestimento asfáltico, tomados na profundidade de 7,49cm (considerando o revestimento com espessura de 7,5cm), obtidos no AEMC para as diferentes misturas asfálticas analisadas nesta pesquisa são mostrados na Tabela 18. Aplicando-se os valores nas equações de fadiga da Figura 47, é possível se obter a vida útil estimada em termos de repetições de um eixo padrão (número N).

Tabela 18 - Deformações específicas resilientes calculadas pelo software AEMC para cada mistura.

Tipo de mistura asfáltica	MR (MPa)	Modelo vida de fadiga $N=k_2*(1/\epsilon t)^{n_2}$		Equação modelo de fadiga	Deformação específica resiliente (ϵt)	Vida útil estimada
		k_2	n_2			
MCQ	4308,67	1,15E-10	3,337	$y= 1,15E-10x^{-3,337}$	2,1935E-04	1,86E+02
MCM	4307,83	5,94E-11	3,412	$y=5,94E-11x^{-3,412}$	2,1937E-04	1,81E+02
MRQ	4340,50	6,93E-14	4,233	$y= 6,93E-14x^{-4,233}$	2,1875E-04	2,15E+02
MRM	3240,17	2,66E-12	3,811	$Y=2,66E-12x^{-3,811}$	2,4238E-04	1,60E+02

A Figura 52 mostra, em gráfico de barras, o resultado comparativo da vida útil à fadiga estimado para as misturas estudadas, na estrutura de pavimento padrão considerada. Percebe-se que, em termos de vida útil diretamente calculada pelo AEMC, a melhor mistura seria a reciclada a quente, cujo resultado é 15,6% superior à vida útil da mistura convencional à quente de referência. A mistura reciclada morna, entretanto, apresentou redução de 14% em relação à mesma mistura convencional de referência. Os resultados das misturas convencionais quente e morna situaram-se muito próximos, considerando que o MR de ambas já era muito semelhante, apresentando diferença de 2,7% apenas.

Figura 52 - Resultado comparativo de vida útil à fadiga das misturas estudadas.



Na sequência foi feito no software MeDiNa o dimensionamento individual da camada de revestimento para cada mistura, considerando fixos os dados das demais camadas do pavimento, mostrados na Figura 33 do capítulo de Métodos. Os resultados desse dimensionamento para cada camada são mostrados na Tabela 19. Para a mistura MRM o software informou que a espessura seria maior que a admissível para a camada, cujo limite é de 15cm, de forma que foi necessária a divisão em duas camadas para dimensionamento, fixando-se a primeira com 10cm e dimensionando-se a segunda pelo programa. Os resultados exibidos na tabela são os valores teóricos, extraídos diretamente do software. Na prática, as espessuras de

camada de revestimento teriam de ser adotadas em múltiplos de 0,5cm, e não em múltiplos de 0,1cm como mostrado.

Tabela 19 - Resultado do dimensionamento da camada de revestimento asfáltico no MeDiNa.

Tipo de mistura asfáltica	Área trincada estimada (%)	Espessura do revestimento (cm)	Afundamento de trilha de roda (mm)	Nível de confiabilidade do dimensionamento
MCQ	29,8	14,1	3,5	85%
MCM	28,0	14,6	3,4	85%
MRQ	28,7	13,5	3,6	85%
MRM	28,7	16,0	3,4	85%

Verifica-se que pelo resultado do dimensionamento do programa MeDiNa, a mistura que resultou em menor espessura necessária foi a MRQ, resultado que corrobora com a vida útil calculada pela Figura 52, que indicava a superioridade dessa mesma mistura. A espessura da MRQ foi 4,2% inferior à da mistura convencional e 11,9% inferior à da mistura reciclada com aditivo surfactante (MRM).

Vale citar que, diferentemente do AEMC, os critérios de dimensionamento adotados pelo programa MeDiNa não se limitam à simples aplicação do valor de deformação à equação de fadiga da mistura, como feito na Tabela 18. O programa estabelece como critério para dimensionamento por fadiga o atingimento de 30% de área trincada no pavimento. Para tanto, utiliza o estado de tensões calculado em dez pontos na superfície, espaçados de 3,65cm, e mais dez pontos na fibra inferior da última camada asfáltica (DNIT, 2020). O dano por fadiga é calculado em cada um dos 20 pontos, e a média entre eles é utilizada para o cálculo da área trincada, utilizando uma função de transferência já determinada, conforme o manual do programa.

Desta forma, em termos de desempenho do revestimento asfáltico, para um pavimento com estrutura das demais camadas pré-estabelecida, para tráfego médio à alto ($N=1 \times 10^7$), a mistura reciclada a quente (MRQ) apresentou o melhor resultado dentre todas as produzidas, tendo seu dimensionamento resultado na camada mais delgada e econômica em termos de material. Na sequência viriam as misturas MCQ, MCM e MRM, tendo esta última apresentado a menor vida útil dentre todas, com espessura 13,7% superior à espessura média das demais misturas.

Em uma análise orçamentária resumida, considerando-se uma obra de pavimentação rodoviária de 20 quilômetros de extensão, utilizando-se o sistema de custos rodoviários do DNIT, SICRO Paraná de Julho de 2021, o valor estimado para a produção e execução de concreto asfáltico faixa C, com areia e brita comerciais (sem o custo do ligante), seria de R\$123,61 por tonelada. O ligante asfáltico CAP 50/70, conforme planilha de preços de distribuição de insumos asfálticos da ANP, tem um preço de R\$3.383,36 por tonelada (também na data-base de Julho de 2021). Considerando o teor de projeto das misturas desta pesquisa (4,5%), seria necessário acrescentar ao preço por tonelada de CBUQ o valor de R\$152,25 reais a título de ligante asfáltico. O valor por tonelada de execução de CBUQ seria, portanto de R\$275,86 por tonelada. Considerando-se uma densidade média de 2,5 t/m³ para concreto asfáltico, este valor pode ser convertido em R\$689,65 por metro cúbico de CBUQ.

Em uma rodovia de pista simples, com duas faixas de 3,60m, acostamentos laterais de 2,50m e espessura de 14,0cm de CBUQ (espessura dimensionada pelo MeDiNa para a MCQ), seriam necessários 34.160 metros cúbicos de CBUQ, ao custo total aproximado de R\$ 23.558.444,00. A redução de espessura de 0,5cm (considerando a adoção da mistura MRQ) representaria, em termos financeiros, a redução de 1.220 metros cúbicos de concreto asfáltico, com uma economia de custos de R\$ 841.373,00.

Há que se considerar ainda a economia advinda do reaproveitamento do RAP, que reduz a necessidade de uso de ligantes e também de agregados virgens, que não precisariam ser adquiridos ou produzidos. A título exemplificativo, na mistura com 50% de RAP projetada nesta pesquisa, o teor de ligante virgem necessário para produção seria de 2,0% apenas, uma vez que a parcela restante para os 4,5% totais seria proveniente do RAP. O custo do ligante por tonelada de CBUQ, que era de R\$152,25, cairia para R\$67,67. Considerando ainda a redução de 50% da necessidade de agregados virgens, (que conforme composição do SICRO, representam R\$37,84 do custo da produção e execução do CBUQ), fariam o custo de R\$123,61 cair para R\$85,77. O valor final por tonelada de CBUQ seria então de R\$ 153,44 por tonelada, ou de R\$383,59 por metro cúbico.

Porém, faz necessário considerar as desvantagens financeiras do uso dessa mistura, que residiriam, principalmente, no maior custo de transporte, em função da

necessidade de se transportar o material fresado para a usina. No exemplo anterior, considerando uma usina/pedreira localizada a 10km do início do trecho de 20km, ter-se-ia uma distância média de transporte de 20km ($10+20/2$) para transporte do CBUQ. Quando do uso da mistura reciclada, essa distância seria duplicada, considerando mais 20km para transporte do RAP até a usina. Além destes, haveriam também maiores custos para promover a gestão desse material (peneiramento, separação, armazenamento) além, é claro, do custo de aquisição do agente rejuvenescedor e da necessidade de adaptação das usinas para emprego de RAP, custos estes que não são fáceis de se estimar simplificarmente. Um resumo do comparativo com os custos de fácil estimativa é mostrado na Tabela 1.

Tabela 20 - Comparativo de custos para uma obra de pavimentação com 20km de extensão

Comparativo de custos para obra produzida com MCQ e MCM		
	MCQ	MRQ
Extensão do projeto (km)	20	
Largura da pista (m)	12,2	
Espessura do revestimento (cm)	14,0	13,5
Quantidade de CBUQ (m³)	34160	32940
Custo do CBUQ por tonelada (produção e execução) areia e brita comerciais (R\$/t)	123,61	85,77
Custo do ligante (R\$/t)	3383,36	
Teor de ligante virgem (%)	4,50%	2,00%
Custo do ligante por tonelada de CBUQ (R\$/t)	152,25	67,67
Custo unitário por tonelada de CBUQ (produção + execução + ligante)(R\$/t)	275,86	153,44
Densidade do CBUQ (kg/m³)	2500	
Custo unitário por metro cúbico de CBUQ (R\$/m³)	689,65	383,59
Subtotal Custo de produção e execução (R\$)	R\$ 23.558.546,48	R\$ 12.635.553,42
Custo unitário do transporte em caminhão basc. 10m³ rod. pavimentada (R\$/tkm)	0,54	
Distância Média de Transporte - DMT (km)	20	40
Subtotal Custo de transporte (R\$)	R\$ 922.320,00	R\$ 1.778.760,00
Custo total da execução do revestimento (R\$)	R\$ 24.480.866,48	R\$ 14.414.313,42
Economia com o uso da mistura reciclada (R\$)	R\$ 10.066.533,06	

A economia no exemplo citado acima seria da ordem de R\$ 10.066.533,06, o que representaria cerca de 41% do estimado para execução com mistura convencional. Em suma, é evidente que em uma obra rodoviária, muitas outras

variáveis precisariam ser analisadas para composição do orçamento, e um estudo mais aprofundado de custos seria o ideal para uma estimativa apurada de economia financeira. Há que se considerar nesse estudo, principalmente, os custos que aumentam em decorrência do emprego da técnica de reciclagem, que podem não ter sido evidenciados no comparativo aqui realizado. Contudo, baseado nos cálculos e análises expostas, é coerente afirmar que o uso de misturas recicladas pode trazer economias significativas para uma obra de pavimentação, considerando sua capacidade redução das espessuras de camada e, principalmente, o reaproveitamento de materiais recicláveis como o agregado e o ligante asfáltico presentes no RAP.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou os efeitos da adição de diferentes teores de agente rejuvenescedor de óleo de pinho nas propriedades reológicas do ligante CAP 50/70, extraído do RAP, tendo determinado a dosagem ideal através do método de recuperação do Performance Grade de alta temperatura (PGH) do ligante virgem. Foi avaliado também o comportamento de misturas asfálticas recicladas (com adição de 50% de RAP) com o emprego desta dosagem ideal, combinada ainda com a técnica de misturas mornas, comparando-se o resultado com o de misturas convencionais.

Os resultados dos ensaios de caracterização reológica realizados no DSR (PG, MSCR e LAS) permitiram a obtenção as seguintes conclusões:

- Para a recuperação do PGH do ligante virgem são necessários teores maiores de AR do que para a recuperação da penetração. No presente caso, o teor de AR estimado necessário para recuperar o PGH é de 10,6% o qual é 3,8 vezes maior que o teor para recuperação da penetração.
- O percentual de AR estimado para a recuperação do PGH (10,6%) gerou um ligante com viscosidade demasiadamente baixa, com penetração da ordem de 145x0,1mm. Contudo o desempenho do ligante à compliância não recuperável, estimado através do ensaio MSCR, se mostrou satisfatório para um tráfego padrão, sendo inclusive superior ao do CAP 50/70. O teor de AR limite para que o ligante rejuvenescido atendesse a um tráfego padrão seria de 12,8%, enquanto que o teor para equalizar os resultados ao do CAP 50/70 seria de 13,8%
- Como esperado, a tolerância ao dano por fadiga dos ligantes aumentou com a adição de AR, sendo essa melhora proporcional ao teor de AR adicionado. Teores acima de 7,0% já seriam capazes de recuperar a resistência do ligante virgem, tendo o teor estimado de 10,6% superado esta resistência.
- Assim, a partir dos resultados obtidos, é possível afirmar que, para o caso avaliado na presente pesquisa, a dosagem de AR pelo PGH do ligante virgem seria um método adequado para recuperar as

propriedades de tolerância ao dano por fadiga e compliância não recuperável do ligante asfáltico extraído do RAP, mesmo após o envelhecimento de curto prazo, apresentando comportamento inclusive superior ao ligante virgem CAP 50/70, tanto em termos de suscetibilidade à deformação permanente como de vida de fadiga.

Quanto ao comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas, os resultados permitiram a obtenção as seguintes conclusões:

- Em relação à resistência à tração por compressão diametral, a utilização de 50% de RAP praticamente não alterou os resultados das misturas a quente. Essa adição, contudo, teve efeitos significativos nas misturas mornas, verificando-se queda de 15% na resistência da mistura reciclada em relação à convencional. O emprego das técnicas combinadas de mistura reciclada e morna foi o que mais apresentou prejuízos na resistência à tração, verificando-se redução de até 20% em relação ao resultado das demais misturas. Acredita-se que uma combinação de fatores levou a estes resultados, sendo o menor tempo de mistura do surfactante e a temperatura reduzida de aquecimento do RAP (121°C), o que gerou uma mistura de compostos (ligante envelhecido + ligante virgem + AR + surfactante) insuficientemente homogênea.
- Em relação ao módulo de resiliência, as misturas MCQ, MCM e MRQ apresentaram valores equivalentes de MR. A mistura reciclada morna apresentou o pior resultado, o que endossa a possibilidade de redução demasiada na temperatura da mistura morna (30°C) e insuficiente mistura entre o surfactante e o ligante envelhecido. A similaridade entre os resultados de MR das misturas MCQ e MRQ indicou também que o AR cumpriu adequadamente a sua função, apresentado comportamento das misturas recicladas equivalente (e até superior no caso da MRQ) ao da mistura convencional a quente de referência.
- Em relação à deformação permanente, avaliada pelo ensaio de *Flow Number*, concluiu-se que mesmo com a adição de AR, o comportamento da mistura MRQ é da ordem de 300% superior ao da mistura convencional de referência, habilitando-a para uso em rodovias de

tráfego pesado (até $N=10^8$). Esse bom comportamento, porém, não se repetiu para a mistura MRM, cujos resultados situaram-se 23% abaixo da mistura convencional, novamente levando a crer que o tempo e a temperatura de mistura utilizados possam ter afetado seu comportamento mecânico.

- Os resultados do ensaio de dano por umidade induzida mostraram que a adição de RAP à mistura resulta em diminuição de sua resistência a esse dano, sendo que a adição de agente surfactante atenua essa diminuição no caso de misturas recicladas, pois esse tipo de agente resulta em melhor adesividade do ligante aos agregados. Todas as misturas produzidas nesta pesquisa atenderam ao mínimo de RRT de 80% estabelecido na metodologia Superpave.
- Os ensaios de resistência à fadiga das misturas asfálticas apontaram para a superioridade da mistura reciclada à quente (MRQ), situando-se na classe 3 de desempenho à fadiga, enquanto as demais misturas situaram-se na classe 2 (classificação baseada no FFM e MR). O desempenho das misturas à fadiga foi também verificado na análise de dimensionamento através do software MeDiNa, que demonstrou novamente superioridade da mistura MRQ, mostrando que uma espessura 10% inferior à da mistura de referência (MCQ) já seria suficiente para atendimento à um mesmo número $N=10^7$. A mistura MRM não atingiu desempenho à fadiga suficiente para emprego em uma única camada, pois sua espessura dimensionada foi de 16cm, sendo que o limite estabelecido para a espessura de camada asfáltica pelo programa é de 15cm. As misturas convencionais MCQ e MCM apresentaram resultados de espessura de camada parecidos, entre 14 e 15cm dimensionados.
- Em comparativo financeiro simplificado, verificou-se que a economia com uso da mistura MRQ em relação à mistura MCQ em uma obra hipotética de restauração de pavimento com 20km de extensão seria expressiva, chegando à cerca de 41% dos custos de produção e execução do revestimento asfáltico em CBUQ convencional.
- Em uma análise holística dos resultados obtidos com esta pesquisa, é coerente afirmar que as misturas recicladas podem ter um desempenho

superior ao das misturas convencionais, de forma que seu emprego como solução de pavimentação pode e deve ser encorajado. A adição do teor de agente rejuvenescedor com vistas a restaurar o PGH do ligante virgem empregado é uma técnica adequada para dosagem deste aditivo, que necessita de mais estudos nacionais para consolidação como solução para misturas recicladas. Já a utilização das técnicas combinadas de mistura morna e emprego de RAP não se mostraram tão promissoras como previsto, o que destaca a importância de serem conduzidos mais estudos para avaliação dessa interação entre os aditivos.

Apresenta-se na sequência as sugestões para trabalhos futuros, baseadas nas conclusões desta pesquisa:

- Investigar melhor a interação físico-química entre o agente rejuvenescedor e o aditivo surfactante de misturas mornas, e seus efeitos no ligante asfáltico resultante das misturas recicladas.
- Analisar a influência do tempo de mistura do aditivo de misturas mornas nas misturas asfálticas, em especial aquelas com adição de RAP.
- Analisar a influência do tempo de mistura do aditivo rejuvenescedor nas misturas asfálticas recicladas.
- Explorar a dosagem do agente rejuvenescedor pelo PGH do ligante virgem, através da análise com outros ligantes em diferentes níveis de envelhecimento e outros teores de RAP na mistura.
- Verificar o impacto da variação do percentual de RAP nas misturas recicladas a quente e recicladas mornas (inclusive com 100% de RAP), utilizando os aditivos rejuvenescedor e surfactante combinados.
- Investigar melhor o processo de recuperação dos ligantes propor método para identificar a presença de solvente residual nas amostras;

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 101**: Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. Washington, D.C., 2018.

_____. **AASHTO M 332**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Washington, D.C., 2018.

_____. **AASHTO T 315**: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, D.C., 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7175**: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. Philadelphia, Pa., 2015.

_____. **ASTM D 6373**: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. Philadelphia, Pa., 2016.

_____. **ASTM D 7643**: Standard Practice for Determining the Continuous Grading Temperatures and Continuous Grades for PG Graded Asphalt Binders. Philadelphia, Pa., 2016.

_____. **ASTM D 2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). Philadelphia, Pa., 2019.

_____. **ASTM D 7405**: Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. Philadelphia, Pa., 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Preços de distribuição de produtos asfálticos**. 17 nov. 2021. Disponível em: <
<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao-de-produtos-asfalticos>> Acesso em: 20 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 12948**: Materiais para concreto betuminoso usinado a quente. Rio de Janeiro, 1993.

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

_____. **NBR 15235:** Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 15619:** Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2016.

AL-QADI, I.; ELSEIFI, M.; CARPENTER, S. H. **Reclaimed Asphalt Pavement - A literature review**, Research report FHWA-ICT-07-001. Illinois Center for Transportation, 2007.

ARÁMBULA-MERCADO, E. *et al.* **Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents**, Construction and Building Materials - Volume 158, Jan. 2018. Pg. 432-442.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA; **Basic Asphalt Recycling Manual**. Federal Highway Administration. USA, 2015.

AUTOPISTA LITORAL SUL; **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas – Relatório Final**. ANTT, 2014.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – formação básica para engenheiros** 4. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOURA, E. **Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas e de recicladas morna**. Relatório Final. São Paulo: Laboratório de Tecnologia de Pavimentação - USP, 2016.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3 Ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2007.

BOWERS, B. F. **Investigation of Asphalt Pavement Mixture Blending Utilizing Analytical Chemistry Techniques**. 177 p. Tese (Doctor of Philosophy, with a major in Civil Engineering), University of Tennessee, 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2016**. – Brasília: MCIDADES.SNSA, 2018

CAPITÃO, S.D.; PICADO-SANTOS, L.G.; MARTINHO, F.. **Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt**, Construction and Building Materials - Volume 36, Nov. 2012. Pg. 1016-1024.

CAVALCANTE, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

CANCHANYA, J. P. **Avaliação do comportamento mecânico e reológico de mistura asfáltica com adição de 20% de material fresado – RAP**. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CBB Asfaltos. Certificado de ensaio n° 2347-2019, Cimento Asfáltico CAP 50/70, 2019.

CHEN, A. *et al.* **Research on the aging and rejuvenation mechanisms of asphalt using atomic force microscopy**, Construction and Building Materials - Volume 167, Abr. 2018. Pg. 177-184.

CHEN, H.; ZHANG, Y.; BAHIA, H. U. **Estimating asphalt binder fatigue at multiple temperatures using a simplified pseudo-strain energy analysis approach in the LAS test**. Construction and Building Materials, volume 266, Jan. 2021, Pg. 1-8.

CNT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Relatório Gerencial**. Brasília: CNT: SEST : SENAT, 2018a. Disponível em: <http://cms.pesquisarodovias.cnt.org.br//Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20de%20Rodovias%202018%20-%20web%20-%20baixa.pdf> Acesso em: 17 de mar. 2019.

CNT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Acidentes Rodoviários e a infraestrutura**. 140p. Brasília: CNT, 2018b.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the practice**, Report n° FHWA-HRT-11-021, Federal Highway Administration, Washington DC, 2011.

COSTA, C.; PINTO, S. **O uso de reciclagem de pavimentos como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil**, Revista Engenharia – Edição 602, 2011. Pg. 96-102.

CROTEAU, J.M.; TESSIER, B. **Warm mix asphalt paving technologies: A road builder's perspective**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Quebec, Canada, 2008.

DIEFENDERFER, S. D. **Developing a Laboratory Protocol for Asphalt Binder Recovery**. Research report FHWA/VCTIR 15-R7. Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2014.

DER-SP. DEPARTAMENTO ESTRADAS E RODAGEM DE SÃO PAULO – **NORMA IP-DE-P00/001**: Instrução de Projeto de PAVimentação. São Paulo, 2006.

DNER. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **NORMA DNER-ME 053/1994**: Misturas betuminosas – percentagem de betume. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NORMA DNER 084/1995 - ME**: Agregado miúdo – determinação da densidade real - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NORMA DNER 193/96 – ME**: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NORMA DNER-PRO 199/96 – ME**: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NORMA DNER-PRO 120/97 – ME:** Coleta de amostras de agregados. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NORMA DNER 081/1998 - ME:** Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Resolução nº 14 de 8 de Julho de 2021.** SEI nº 8604598. Brasília, 2021.

_____. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos.** Projeto DNIT TED nº682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NORMA DNIT- 031/06 – ES:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NORMA DNIT 131/2010 - ME:** Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NORMA DNIT 155/2010 - ME:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da penetração– Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NORMA DNIT 135/2018 - ME:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. **NORMA DNIT 178/2018 - PRO:** Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NORMA DNIT 180/2018 - ME:** Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. **NORMA DNIT 184/2018 - ME:** Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **Diretrizes básicas para execução de misturas asfálticas mornas com o uso de aditivos surfactantes.** Rio de Janeiro, 2018. 48p.

_____. **NORMA DNIT 412/2019 - ME:** Pavimentação - Misturas asfálticas - Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **SICRO – Sistema de Custos Rodoviários do DNIT – Região Sul - Julho/2021.** 17 nov. 2021. Disponível em: < <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/sul/parana/2021/julho/julho-2021>> Acesso em: 20 nov. 2021.

ESPINOZA-LUQUE, A.F.; AL-QADI, I.L.; OZER; H. **Optimizing rejuvenator content in asphalt concrete to enhance its durability**, Construction and Building Materials - Volume 179, Ago. 2018. Pg. 642-648.

FAROOQ, M.A.; MIR, M.S.; SHARMA; A. **Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator**, Construction and Building Materials - Volume 168, Abr. 2018. Pg. 61-72.

FHWA, Federal Highway Administration; NHI, National Highway Institute. **Superpave Fundamentals Reference Manual**, FHWA-NHI-131053, 2000.

FRITZEN, M. A. *et al.* **Classificação das misturas asfálticas quando ao desempenho à fadiga.** 9º Congresso Rodoviário Português. Lisboa, 2019.

GADLER, F. **Desempenho e propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas produzidas com revestimento asfáltico fresado e agregado de resíduo de concreto em substituição da fração graúda e miúda da granulometria.** 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

GASPAR, M. S. **Mecanismos de interação e ativação entre ligantes nas reciclagem asfáltica a quente e morna.** 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado.** 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GUO, N. *et al.* **Performance evaluation of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt mixtures**, International Journal of Pavement Engineering - Volume 11, 2017. Pg. 981-989.

HUANG, y. h. **Pavement Analysis and Design.** 2 ed. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall, 2004. 785 p.

HUANG, S. C.; BENEDETTO, H. **Advances in Asphalt Materials.** Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 56. Estados Unidos: Elsevier, 2015. 470 p.

HETTIARACHCHI, C. *et al.* **A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology**, Construction and Building Materials - Volume 227, Dez. 2019. Review 117096, 21p.

HOSPODKA, M.; HOFKO, B.; BLAB, R. **Impact of distillation temperature on the solvent residue and viscoelastic properties of asphalt binders**. Road Materials and Pavement Design, Volume 19, Mar. 2017, Pg. 1275–1287.

IM, S.; KARKI, P.; ZHOU; F. **Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators**, Construction and Building Materials - Volume 115, Jul. 2016. Pg. 727-734.

JOENCK, V. C. B. **Avaliação da capacidade autorregenerativa de trincas por fadiga em misturas asfálticas com adição de fibras de aço, escória de alto forno e pó de grafite**. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

JOHNSTON *et al.* **Produção de misturas asfálticas mornas com agente surfactante no Brasil**, Asfalto em Revista – Edição de Nov/Dez de 2015, Dez. 2015. Pg. 18 a 22.

KASEER, F. *et al.* **Performance of asphalt mixtures with high recycled materials content and recycling agents 2018**. International Journal of Pavement Engineering, Ago. 2018.

KASEER, F. *et al.* **Practical Tools for Optimizing Recycled Materials Content and Recycling Agent Dosage for Improved Short- and Long-Term Performance of Rejuvenated Binder Blends and Mixtures**. Journal Association of Asphalt Paving Technologists, 2018.

KASEER, F.; MARTIN, A. P.; ARÁMBULA-MERCADO, E. **Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review**. Construction and Building Materials - Volume 211, Jun. 2019. Pg. 974-987.

KASEER, F.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; MARTIN, A. P. **A Method to Quantify Reclaimed Asphalt Pavement Binder Availability (Effective RAP Binder) in Recycled Asphalt Mixes**. Transportation Research Record Journal of the TRB, Jan. 2019.

KLINSKI, L. M. G.. **Reaproveitamento das misturas asfálticas fresadas nas concessionárias do Grupo CCR**. Seminário Técnico de Reciclagem de misturas asfálticas. Universidade de São Paulo - USP, 17 de abril de 2018. Palestra.

KRATON Corporation. Safety Data Sheet and Product Data Sheet, Sylvaroad™ RP 1000 Performance Additive, 2019.

LOBO, A. V. L. **Avaliação do uso de agregados miúdos reciclados de concretos em concretos betuminosos usinados a quente**. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LU, D.; SALEH, M.; NGUYEN; N.H.T. **Effect of rejuvenator and mixing methods on behaviour of warm mix asphalt containing high RAP content**. Construction and Building Materials - Volume 197, Fev. 2019. Pg. 792-802.

MALLICK, R.B.; EL-KORCHI T. **Pavement engineering: Principles and Practice**. 3 ed. Nova York: CRC Press, 2018. 747 p.

MAPBIOMAS – **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Estatísticas**. 2017. Disponível em: < <http://mapbiomas.org/stats>> Acesso em: 05 mar. 2019.

MENAPACE, I. *et al.* **Effect of recycling agents in recycled asphalt binders observed with microstructural and rheological tests**, Construction and Building Materials - Volume 158, Jan. 2018. Pg. 61-74.

MIKHAILENKO, P.; WEBBER, G.; BAAJ, H. **Evaluation of solvents for asphalt extraction**, Road Materials and Pavement Design - DOI: 10.1080/14680629.2019.1661277, Sep. 2019. 12 p.

MIKHAILENKO, P.; ATAEIAN, P.; BAAJ, H. **Extraction and recovery of asphalt binder: a literature review**, R International Journal of Pavement Research and Technology, Volume 13, Jan 2020. Pg. 20-31.

MOTTER, J. S. **Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto**. 271 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MORILHA, **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NIKOLAIDES, A. **Highway Engineering Pavements: Materials and Control of Quality**. New York: CRC Press, 2015. 868 p.

NOFERINI *et al.*, L., **Investigation on performances of asphalt mixtures made with reclaimed asphalt pavement: effects of interaction between virgin and RAP bitumen**, International Journal of Pavement Research and Technology - Volume 10, Issue 4. Jul. 2017. Pg. 322-332.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Conheça os novos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU**. 12 abr. 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/>> Acesso em: 05 mar. 2019.

OZER, H, *et al.* **Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters**. Construction and Building Materials - Volume 115, Jul. 2016. Pg. 390-401.

POROT, L.; DECAMPS, J. A.; FAUCON-DUMONT; S. **Reuse of very hard Reclaimed Asphalt – Field results**. 2018 International Society for Asphalt Pavements Conference. Fortaleza, 2018.

POROT, L.; BELL, D. **Bringing recycling to the next level using bio-based rejuvenator**. 18th Australian Asphalt Pavement Association Conference 2019. Sidney, Australia, 2019.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2ª ed. Rio Grande do Sul: FEEVALE, 2013. 277p.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B **Warm-mix asphalt: best practices**. 3. ed. Lanham: National Asphalt Pavement Association, Lanham: National Asphalt Pavement Association – NAPA, 2012. 69p.

PROWELL, B. D.; FRANK, B **Method for calculating warm mix energy saving based on stack gas measurements**. Asphalt Pavements – Kim (Ed). London: Taylor & Francis Group: 2014. 9p.

RAUL, F. **Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do Trabalho Científico**. 23 ed. São Paulo: Cortez Editora, 2014. 197p.

SMITH, K. **A rejuvenator derived from pine trees and natural asphalt**. World Highways. 20 nov. 2015. Disponível em: <https://www.worldhighways.com/wh6/feature/rejuvenator-derived-pine-trees-and-natural-asphalt>> Acesso em: 15 mar. 2020.

SNIF – Portal do Sistema Nacional de Informações Florestais. **Pressão em impacto sobre as florestas**. 09 abr. 2018. Disponível em: < <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/conhecendo-sobre-florestas/170-pressao-e-impacto-sobre-as-florestas>> Acesso em: 05 mar. 2019.

SNIS – Portal do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos - 2018**. Dez. 2019. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-residuos-solidos/diagnostico-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-2018>> Acesso em: 28 jul. 2020.

SONG, W.; HUANG, B.; SHU, X. **Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement**. Journal of Cleaner Production - Volume 192, Ago. 2018. Pg. 191-198.

SUZUKI, F. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

SPEIGHT, J. G. **Asphalt materials science and technology**. Estados Unidos: Elsevier Inc. 2016. 631 p.

TAKAHASHI, M. M. **Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

WEST, R.C. **Best Practices for RAP and RAS management**. National Asphalt Pavement Association – NAPA, Maryland, 2015.

WEST, R.C.; COPELAND; A. **High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice - Lessons Learned**. National Asphalt Pavement Association – NAPA, Maryland, 2015.

WILLIAMS, B. A.; COPELAND, A.; ROSS, T. C. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2017, 8th Annual Survey.** National Asphalt Pavement Association – NAPA, Maryland, 2018.

WILLIAMS, B. A.; WILLIS, J. R.; ROSS, T. C. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2018, 9th Annual Survey.** National Asphalt Pavement Association – NAPA, Maryland, 2019.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Global Competitiveness Report 2018.** Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/GCR2018/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2018.pdf> < Acesso em: 07 abr. 2019.

XU, J. *et al.* **Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency based on micro-mechanical properties of layered asphalt binders.** Construction and Building Materials - Volume 163, Fev 2018. Pg. 390-401.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** Tradução: Daniel Grassi. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 205p.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. **Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications.** Construction and Building Materials - Volume 69, Out. 2014. Pg. 159-166.

ZAUMANIS, M. Chapter 10 - Warm Mix Asphalt. In: GOPALAKRISHNAN, K; STEYN; W. J.; HARVEY; J., **Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements**, Green Energy and Technology, Springer-Verlag, 2014. 517 p.

ZAUMANIS, M. *et al.* **Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures.** Construction and Building Materials - Volume 71, Nov. 2014. Pg. 538-550.

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

ZHANG, J. *et al.* **Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage.** Construction and Building Materials - Volume 238, Mar. 2020. Review 117778. 9p.

ZHAO, S *et al.* **Quantitative evaluation of blending and diffusion in high RAP and RAS mixtures.** Materials & Design - Volume 89, Jan. 2016. Pg. 1161-1170.