



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Dissertação de Mestrado

Gabriel Eduardo Magalhães Mantovani

**MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE:
ESTUDO EM LABORATÓRIO UTILIZANDO 100% RAP E REOB COMO
AGENTE REJUVENESCEDOR**

Belo Horizonte

2022

Gabriel Eduardo Magalhães Mantovani

**MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE:
ESTUDO EM LABORATÓRIO UTILIZANDO 100% RAP E REOB COMO
AGENTE REJUVENESCEDOR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula

Belo Horizonte

2022

Mantovani, Gabriel Eduardo Magalhães.
M293m Misturas asfálticas recicladas a quente : estudo em laboratório utilizando 100% RAP e REOB como agente rejuvenescedor / Gabriel Eduardo Magalhães Mantovani. – 2022.
86 f. : il.
Orientador: Flávio Renato de Góes Padula.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2022.
Bibliografia.

1. Asfalto - Reciclagem. 2. Pavimentos de asfalto - Manutenção e reparos. 3. Concreto asfáltico. 4. Fresagem. I. Padula, Flávio Renato de Góes. II. Título.

CDD: 620.196



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 7/2022 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.013322/2022-11

Belo Horizonte-MG, 22 de março de 2022.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

“MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE: ESTUDO EM LABORATÓRIO UTILIZANDO 100% RAP E REOB COMO AGENTE REJUVENESCEDOR”

Autor: Gabriel Eduardo Magalhães Mantovani

Orientador: Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 23 de março de 2022 esta Dissertação:

Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Raphael Miranda de Souza (EXAMINADOR EXTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

(Assinado digitalmente em 23/03/2022 11:54)

FLAVIO RENATO DE GOES PADULA

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEC (11.56.07)

Matrícula: 1353659

(Assinado digitalmente em 23/03/2022 12:03)

RAPHAEL MIRANDA DE SOUZA

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO

DEC (11.56.07)

Matrícula: 1487328

(Assinado digitalmente em 23/03/2022 14:19)

SIDNEY NICODEMOS DA SILVA

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO

DF (11.56.10)

Matrícula: 2519987

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **7**, ano: **2022**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **22/03/2022** e o código de verificação: **43a5eb578e**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado e iluminado em todos os passos da minha vida.

Ao professor e orientador Doutor Flávio Renato de Góes Padula, pelos ensinamentos, incentivo e confiança a mim concedida.

Aos meus pais Gilvane e Hisley, meus irmãos Gil e Gisella, e todos meus familiares, avós, tios, primos e sobrinhos por serem a minha base e sempre me apoiarem em minhas escolhas.

A minha namorada, Amanda, pelo apoio e companheirismo nessa reta final da minha dissertação. Muito obrigado pelas palavras de carinho e compreensão sobretudo nos momentos mais difíceis.

A todos os meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, por todo bem que me fazem desde sempre.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), pela excelência no ensino, por ser um espaço que privilegia o conhecimento e a pesquisa. Aos docentes e demais funcionários do Departamento de Materiais, do Departamento de Estradas e Transportes e do Departamento de Engenharia Civil. Aos colegas da pós-graduação, em especial Rayanne, Tiago, Mariana e Maísa. E também ao Richard pelo apoio no laboratório para realização dos ensaios.

Aos docentes e discentes da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), particularmente, à professora Dra. Liseane Padilha Thives e ao colega Juliano Spínola, pelos conselhos e ensinamentos, e contribuírem em muito, para a melhoria desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo apoio na concessão da bolsa de estudo – Código de Financiamento 001.

À Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP) – Regional Oeste, pelo fornecimento de material fresado para o desenvolvimento desta pesquisa.

E a todos aqueles que de alguma forma participaram, deram forças, incentivaram e contribuíram para esta grande conquista.

***“For the things we have to
learn before we can do them,
we learn by doing them.”***

Aristotle, The Nicomachean Ethics

RESUMO

O desenvolvimento de pesquisas que buscam incorporar materiais reciclados em novos produtos tem sido cada vez mais constante. Com o aumento do custo dos materiais utilizados na pavimentação junto com políticas cada vez mais rigorosas de proteção ambiental e práticas sustentáveis, a tecnologia de reciclagem de asfalto com alto teor de material fresado ou *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) está se tornando essencial e amplamente investigada em todo o mundo. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico laboratorial de misturas asfálticas recicladas com 100% RAP com adição de agente rejuvenescedor denominado *Re-Refined Engine Oil Bottoms* (REOB). A adição de REOB em misturas asfálticas está em prática há quase três décadas, contudo, há pouco conhecimento sobre o uso de REOB em misturas recicladas com 100% de RAP. No presente estudo foram confeccionadas 18 (dezoito) misturas com diferentes teores do agente rejuvenescedor (0,00%; 0,25%; 0,50%, 1,00%; 2,00% e 3,00%) e adicionalmente foi feita análise com incorporação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 virgem (0,00%; 0,50% e 1,00%) nas misturas recicladas de forma a atender aos critérios das Normas DNIT 43/1995 e 33/2021. Todas as misturas apresentaram estabilidade Marshall superiores à estabelecida pela norma DNIT 43/95, porém, nenhuma apresentou fluência Marshall no intervalo prescrito pela mesma norma, apresentando valores superiores ao limite máximo. Evidenciou-se que à medida em que se aumenta o teor de REOB diminui-se o desgaste cântabro. Quanto à resistência à tração por compressão diametral (RT), baixas dosagens de REOB (0,00%; 0,25%) apresentaram ganho de resistência com incremento do CAP, ao passo que, com o aumento do teor de REOB, juntamente com adição do CAP houve uma redução na resistência. Com os resultados obtidos foi possível definir o teor ótimo de REOB (1,00%) com adição de CAP 50/70 virgem (0,7%) atingindo um teor de ligante total (5,60%) para misturas asfálticas recicladas a quente com 100% RAP. A reciclagem a quente de 100% RAP, com adição de REOB e CAP em proporções definidas através de metodologia adequada, pode ser uma alternativa viável para obras de construção e manutenção de pavimentos asfálticos.

Palavras-chave: Reciclagem asfáltica à quente. 100% RAP. Agente rejuvenescedor. REOB. Ligante envelhecido. Ligante Virgem.

ABSTRACT

The development of research that seeks to incorporate recycled materials in new products has been increasingly constant. With the increasing cost of materials used in paving along with increasingly stringent environmental protection policies and sustainable practices, the technology of recycling asphalt with high content of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is becoming essential and widely investigated worldwide. This research aims to evaluate the laboratory mechanical performance of 100% RAP with the addition of a rejuvenating agent called Re-Refined Engine Oil Bottoms (REOB). The addition of REOB in asphalt mixtures has been in practice for almost three decades, however, there is little knowledge about the use of REOB in recycled mixtures with 100% RAP. In this study 18 (eighteen) mixtures were made with different levels of the rejuvenating agent (0.00%, 0.25%, 0.50%, 1.00%, 2.00% and 3.00%) and additionally analysis was done with the incorporation of Virgin Asphalt Binder 50/70 (0.00%, 0.50% and 1.00%) in the recycled mixtures to meet the criteria of DNIT Standards 43/1995 and 33/2021. All mixtures showed Marshall Stability Test greater than that established by DNIT 43/95, but none showed Marshall Creep Test within the range prescribed by the same standard, presenting values greater than the maximum limit. It was evidenced that as the REOB content increases, the cantabro wear decreases. As for the Indirect Tensile Test (IDT), low doses of REOB (0.00%; 0.25%) showed resistance gain with the increment of virgin asphalt binder, while with the increase of the REOB content, along with the addition of Virgin Asphalt Binder there was a reduction in resistance. With the results obtained it was possible to define the optimum REOB content (1.00%) with addition of virgin asphalt binder 50/70 (0.70%) reaching a total binder content (5.60%) for recycled asphalt hot mixtures with 100% RAP. The hot recycling of 100% RAP, with addition of REOB and virgin asphalt binder in proportions defined through appropriate methodology, can be a viable alternative for asphalt sidewalk construction and maintenance works.

Keywords: Hot asphalt recycling. 100% RAP. Rejuvenating agent. REOB. Aged binder. Virgin binder.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	<i>American Petroleum Institute</i>
AR	Agente Rejuvenescedor
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	Teste de reômetros de feixe de flexão
CAF	Concreto Asfáltico Fresado
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CO ₂	Dióxido de Carbono
CP	Corpo de Prova
D	Desgaste
DET	Departamento de Engenharia de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EM	Especificação de Material
EOR	<i>Engine oil residues</i>
EUA	Estados Unidos da América
FTIR	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier
GEE	Gases do Efeito Estufa
Gmb	Densidade Aparente da Mistura Asfáltica
Gmm	Densidade Específica Máxima da Mistura Asfáltica
GPC	Cromatografia de Permeação em Gel
Gsa	Densidade real
Gsb	Densidade aparente
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
IDT	<i>Indirect Tensile</i>
LAS	Varredura de Amplitude Linear

MARQ	Mistura Asfáltica Reciclada a Quente
ME	Método de Ensaio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
P	Massa do Corpo de Prova antes do ensaio de Desgaste Cantabro
P'	Massa do Corpo de Prova depois do ensaio de Desgaste Cantabro
PG	<i>Superpave Performance Grade</i>
PRO	Procedimento
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RBV	Relação Betume-Vazios
REOB	<i>Re-refined Engine Oil Bottom</i>
RHVDO	<i>Re-Refined heavy vacuum distillation oils</i>
RT	Resistência à Tração
RVTB	<i>Re-Refined Vacuum Tower Bottoms</i>
SARA	Análise de saturação, aromática, resina e asfalto
SUDECAP	Superintendência de Desenvolvimento da Capital
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VAM	Volume de Agregado Mineral
VCB	Volume Cheios de Betume
VTAE	<i>Vacuum Tower Asphalt Extender</i>
Vv	Volume de Vazios da Mistura Asfáltica
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i> Universidade Federal de Santa Catarina
VAM	Volume de Agregado Mineral
VCB	Volume Cheios de Betume
VTAB	<i>Vacuum Tower Asphalt Binders</i>
VTAE	<i>Vacuum Tower Asphalt Extender</i>
Vv	Volume de Vazios da Mistura Asfáltica
WEO	<i>Waste engine oil</i>
WEOR	<i>Waste engine oil residues</i>
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>
WODB	<i>Waste oil distillation bottoms</i>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo de vida do pavimento asfáltico.	23
Figura 2 – Tipos de usinas utilizadas para misturas asfálticas recicladas.....	27
Figura 3 – RAP Quente em Usinas Gravimétricas com Tambor Secador de Fluxo Paralelo Exclusivo	28
Figura 4 – RAP Quente em Usinas Gravimétricas com Tambor Secador de Contrafluxo Exclusivo	28
Figura 5 – Exemplo de tambor para 100% de RAP	29
Figura 6 – Processo produtivo de RAP Quente em Usinas Contínuas com misturador Pugmill – Tambor secador de fluxo paralelo exclusivo para o RAP 30	
Figura 7 – Processo produtivo de RAP Quente em Usinas Contínuas com misturador Pugmill – Tambor secador de contrafluxo exclusivo para o RAP ...	30
Figura 8 – Processo de Re-refinamento do óleo lubrificante usado para produção de REOB	36
Figura 9 – Ensaio teor de ligante a) antes da extração b) após extração.	41
Figura 10 – Curvas granulométricas dos materiais sem ligante.	43
Figura 11 – Granulometria da amostra sem fresado.	43
Figura 12 – Amostra de REOB.....	45
Figura 13 – Fluxograma da pesquisa	47
Figura 14 – Representação da Volumetria na amostra	49
Figura 15 – Estabilidade Marshall das Misturas Asfálticas Recicladas a Quente versus REOB – M1 a M18.....	58
Figura 16 – Fluência das Misturas Asfálticas Recicladas versus REOB – M1 a M18.	59
Figura 17 – CP's após ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas M1, M11 e M18.	60
Figura 18 – Gráfico comparativo de Desgaste Cântabro versus REOB – M1 a M18.	63
Figura 19 – CP's após ensaio de Desgaste Cântabro - Misturas M1, M5, M7, M8, M10, M12, M15 e M18.	64
Figura 20 – Resistência a Tração por Compressão Diametral versus REOB – M1 a M15.	67

Figura 21 – Resistência a Tração por Compressão Diametral versus CAP 50/70 virgem – M1 a M15.....	68
Figura 22 – Corpos de prova após ruptura no ensaio - Misturas M1, M7 e M13 com 0% CAP).....	69
Figura 23 – Corpos de prova após ruptura no ensaio (Misturas M2, M8 e M14 com 0,50% CAP).....	69
Figura 24 – Corpos de prova após ruptura no ensaio (Misturas M3, M9 e M15 com 1,00% CAP).....	69
Figura 25 – Resultados agrupados do Volume de Vazios (%) versus Teor Total de Ligante.....	70
Figura 26 – Resultados agrupados da Relação Betume-Vazios versus Teor Total de Ligante.....	71
Figura 27 – Resultados agrupados do Desgaste Cântabro versus Teor Total de Ligante	72
Figura 28 – Resultados agrupados da Estabilidade Marshall versus Teor Total de Ligante.....	72
Figura 29 – Resultados agrupados da Fluência Marshall versus Teor Total de Ligante	73
Figura 30 – Resultados agrupados da Resistência à tração por compressão diametral versus Teor Total de Ligante	74
Figura 31 – Relação Estabilidade Marshall versus Resistência à tração por compressão diametral	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do Cimento Asfálticos de Petróleo (CAP) 50/70 - Classificação por penetração	35
Tabela 2 – Estudos com REOB/VTAE/WODB/EOR	39
Tabela 3 – Granulometria amostra após extração ligante	42
Tabela 4 – Densidades	44
Tabela 5 – Especificações Técnicas do REOB.	45
Tabela 6 – Comparação dos valores de CAP fornecidos pelo Fabricante e pela Especificação Técnica.....	46
Tabela 7 – Propriedades volumétricas das misturas asfálticas recicladas	49
Tabela 8 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 1 a 3 (0,00% REOB)..	55
Tabela 9 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 4 a 6 (0,25% REOB)..	56
Tabela 10 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 7 a 9 (0,50% REOB).	56
Tabela 11 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 10 a 12 (1,00% REOB).	56
Tabela 12 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 13 a 15 (2,00% REOB).	57
Tabela 13 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 16 a 18 (3,00% REOB).	57
Tabela 14 – Desgaste Cântabro - Misturas 1 a 3 (0,00% REOB).	61
Tabela 15 – Desgaste Cântabro - Misturas 4 a 6 (0,25% REOB).	61
Tabela 16 – Desgaste Cântabro - Misturas 7 a 9 (0,50% REOB).	62
Tabela 17 – Desgaste Cântabro - Misturas 10 a 12 (1,00% REOB).	62
Tabela 18 – Desgaste Cântabro - Misturas 13 a 15 (2,00% REOB).	62
Tabela 19 – Desgaste Cântabro - Misturas 16 a 18 (3,00% REOB).	63
Tabela 20 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - M1 a M3 (0,00% REOB).	65
Tabela 21 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - M4 a M6 (0,25% REOB).	65
Tabela 22 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - M7 a M9 (0,50% REOB).	66

Tabela 23 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - M10 a M12 (1,00% REOB).....	66
Tabela 24 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - Misturas 13 a 15 (2,00% REOB).....	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	Justificativa e Relevância da Pesquisa.....	19
1.3	Organização da Pesquisa	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Reciclagem de Pavimentos Asfálticos.....	22
2.2	Misturas Asfálticas Reciclagem a Quente	25
2.3	Materiais Asfálticos (Ligantes e Agentes Rejuvenescedores)	31
2.3.1	REOB	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Materiais.....	40
3.1.1	Material Fresado (RAP).....	40
3.1.1.1	Caracterização do Material Fresado (RAP)	40
3.1.1.1.1	Determinação do Teor de Ligante	41
3.1.1.1.2	Análise granulométrica por peneiramento	42
3.1.1.1.3	Densidades aparente, real e absorção dos agregados	44
3.1.2	Materiais Asfálticos	45
3.1.2.1	Agente Rejuvenescedor - REOB	45
3.1.2.2	Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 50/70.....	46
3.2	Métodos.....	46
3.2.1	Dosagem das Misturas Asfálticas Recicladas a Quente	48
3.2.2	Caracterização Mecânica das MARQ	51
3.2.2.1	Estabilidade e fluência Marshall.....	51
3.2.2.2	Desgaste Cântabro	52
3.2.2.3	Resistência à tração por compressão diametral	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Estabilidade e Fluência	55
4.2	Desgaste Cântabro.....	61
4.3	Resistência a Tração por Compressão Diametral	65

4.4	Critério de Escolha de Dosagem Ótima	70
5	CORRELAÇÃO DOS ENSAIOS	75
6	CONCLUSÕES	76
	BIBLIOGRAFIA	79

1 INTRODUÇÃO

Durante a vida útil especificada em projeto, os pavimentos asfálticos necessitam de manutenção regular e reabilitação/reconstrução periódica para responder de forma eficaz as cargas de tráfego e condicionamento ambiental. A manutenção que inclui a retirada da camada de revestimento produz uma determinada quantidade de resíduos asfálticos e requer um fornecimento contínuo de ligante asfáltico e agregado mineral, ambos provenientes de recursos naturais não renováveis (ZHANG; BAHIA, 2021). Mesmo quando atingem o fim de sua vida útil, os materiais nele contidos mantêm um valor considerável (MCDANIEL *et al.*, 2001). Desse processo de corte da camada superior do pavimento asfáltico, denominado fresagem, é gerado um material composto por agregados soltos recobertos por ligantes asfálticos ao qual denomina-se Concreto Asfáltico Fresado (CAF) ou Pavimento Asfáltico Recuperado, no inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP).

Mesmo considerando a pequena extensão pavimentada do país, 12,4% de toda a malha nacional, tem-se estudado o reaproveitamento desses materiais quando atingem a vida útil de serviço. Como afirmam Zaumanis *et al.* (2019) o RAP tem potencial para ser reutilizado na mesma camada asfáltica em vez de rebaixar o material para uso em camadas inferiores, como também demonstrado em múltiplos estudos de pesquisa (BÜCHLER *et al.*, 2018; VALDÉS *et al.*, 2011; WIDYATMOKO, 2008).

A utilização de técnicas de reciclagem tem mostrado benefícios econômicos e ambientais no consumo de matérias-primas constituídas por 100% de material reciclado sem o comprometimento significativo no desempenho da mistura (ERDEM; BLANKSON, 2014; SINGHVI; OZER; AL-QADI, 2016). Dessa forma, a reciclagem de mistura asfáltica a quente contendo 100% RAP fecha o ciclo de materiais utilizando totalmente os materiais valiosos encontrados no asfalto recuperado em aplicações de alta qualidade (ZAUMANIS; MALLICK; FRANK, 2014b).

Este panorama reflete a necessidade da reutilização de materiais e, por conseguinte, a necessidade de pesquisas de processos, de métodos e de produtos que tornem essa prática viável, principalmente nos aspectos técnicos e financeiros. As condições de aplicabilidade dependem de uma série de fatores que conduzem à adoção das diferentes soluções para a restauração. Assim, Ma *et al.* (2021) enfatizaram que há uma grande preocupação de usar materiais 100% RAP nas misturas asfálticas e o quanto o ligante envelhecido pode ser ativado e mobilizado para revestir os agregados, uma vez que esse material fresado tornou-se rígido, frágil e menos elástico, o que faz com que seja difícil ativá-lo. Desta forma, normalmente, aumenta-se a rigidez da mistura (AL-QADI *et al.*, 2012), podendo causar danos à fadiga e uma fragilidade em baixas temperaturas (WEST *et al.*, 2011), o que causa preocupação em relação as deteriorações, inclusive referente a rachadura prematura do pavimento (ZHANG *et al.*, 2017a).

Devido ao processo de envelhecimento a longo prazo, a estrutura química do RAP, bem como suas propriedades físicas e reológicas, sofrem alterações irreversíveis (GRILLI; GNISCI; BOCCI, 2017). Para obter uma capacidade de trabalho adequada e um bom desempenho mecânico de uma nova mistura betuminosa contendo RAP, são incorporados Agentes Rejuvenescedores (AR's). Entre as composições desses produtos estão óleos vegetais, óleos orgânicos e óleos de resíduos reciclados a fim de restaurar as propriedades reológicas e químicas do ligante envelhecido. Além disso, estuda-se a possibilidade de com sua adição permitir um maior quantidade de RAP na mistura reciclada (MAZZONI; BOCCI; CANESTRARI, 2018) e também alcançar um bom desempenho mecânico (PASETTO *et al.*, 2021).

Mazzoni *et al.* (2018) utilizaram três diferentes AR's para avaliar as propriedades reológicas do ligante no reaproveitamento em uma reciclagem a quente. Os resultados mostraram que os AR's modificam a química do ligante e, conseqüentemente, o comportamento reológico, aumentando a resposta elástica. Além disso, observaram que a oxidação é menos prejudicial, em termos de rigidez, sobre o ligante envelhecido. Pasetto *et al.* (2021) mostraram que o rejuvenescimento da mistura envelhecida também demonstrou garantir a

restauração das principais propriedades reológicas (ou seja, rigidez e viscoelasticidade) e características mecânicas de falha (ou seja, fadiga e deformação permanente). Assim, seus achados demonstram a possibilidade da utilização de uma maior quantidade de material fresado reciclado a quente, pelo menos em temperaturas médias e altas, graças ao uso do aditivo selecionado.

Entre os diversos AR's disponíveis, um deles é o *Re-Refined Engine Oil Bottom* (REOB), que consiste no resíduo que sobra da reciclagem do óleo do motor usado e contém uma alta quantidade de metais residuais e dispersantes de óleo de motor degradados (OMARI; AGGARWAL; HESP, 2016). Há um desafio para detectar REOB em ligantes asfálticos devido a diferentes fontes e nomenclaturas de REOB e tecnologias existentes na indústria do asfalto, especialmente para quantificar o REOB no produto asfáltico final (YAN *et al.*, 2020).

O REOB, que possui diversas nomenclaturas, é um tipo de resíduo usado para reduzir as altas e baixas temperaturas no sistema *Superpave Performance Grade* (PG) desde a década de 1980 (ASPHALT INSTITUTE, 2016). Por conta dos potenciais benefícios que esse produto pode proporcionar aos revestimentos asfálticos, Herrington *et al.* (1993), Herrington; Hamilton (1998) e, mais recentemente, D'Angelo *et al.* (2013) Dedene; You (2014) e Yan *et al.* (2020) estudaram o seu impacto ao ser misturado ao asfalto e avaliaram seu efeito no desempenho da mistura produzida a quente.

Além das pesquisas desenvolvidas no CEFET-MG de Fonseca (2018) e Cerdeira (2018), pode-se citar a pesquisa de Zaumanis; Mallick; Frank (2013) que avaliaram misturas recicladas com 100% RAP, adicionado REOB. Diante desse panorama, fica evidente a grande necessidade em desenvolver pesquisas capazes de analisar o comportamento de misturas com alto teor de RAP e compará-lo com o das misturas convencionais. Neste cenário, a inovação da pesquisa aqui apresentada está na reciclagem de 100% RAP de origem nacional com adição de REOB e do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) virgem, sem utilização de agregados virgens. Como produto desta pesquisa, se busca uma dosagem de mistura asfáltica 100% reciclada que se apresente como alternativa

em serviços de reparos tipo tapa-buracos frequentemente realizadas pelas prefeituras e órgãos públicos responsáveis por manutenção das vias e rodovias.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente com 100% RAP com adição de até 3,00% de REOB como agente rejuvenescedor e de até 1,00% CAP 50/70 virgem.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral definiram-se alguns objetivos específicos:

- Avaliar os efeitos da adição de diferentes percentuais (0,00%; 0,25%; 0,50%; 1,00%; 2,00% e 3,00%) do agente rejuvenescedor (REOB) na mistura asfáltica reciclada a quente com 100% RAP por meio de ensaios mecânicos (Estabilidade e fluência Marshall, desgaste cântabro e resistência à tração por compressão diametral);
- Avaliar, pelos mesmos ensaios, os efeitos da adição de baixas dosagens (0,00%; 0,50% e 1,00%) do ligante virgem CAP 50/70 às misturas recicladas a quente com 100% RAP e REOB;
- Definir o teor ótimo de adição do REOB e do CAP 50/70 virgem para misturas asfálticas recicladas a quente com 100% RAP.

1.2 Justificativa e Relevância da Pesquisa

Desde o surgimento da tecnologia de reciclagem de pavimentos asfálticos, a indústria tem procurado diferentes maneiras de melhorar a qualidade das misturas recicladas e utilizar maior proporção de RAP em misturas asfálticas. Isso fomentou a descoberta de novas tecnologias capazes de minimizar esses impactos ambientais e dar uma nova destinação à materiais com grande valor agregado (MCDANIEL *et al.*, 2001).

Durante o processo de fresagem, que consiste na operação de corte, por uso de máquinas especiais, de parte ou de todo o revestimento asfáltico existente em um trecho de via, há uma produção elevada de grumos que são pedaços constituídos de um ou mais agregados, envoltos por material fino e CAP (BONFIN, 2007). A granulometria do material fresado está diretamente relacionada à velocidade de operação da máquina fresadora, assim como na técnica de fresagem empregada e no sentido do giro do cilindro do fresador. A estabilidade granulométrica de misturas depende diretamente do tamanho e formato das partículas, o que influencia na resistência ao cisalhamento, devido ao atrito gerado entre as partículas. Durante a fresagem, ocorre o aumento de área superficial dos agregados, o que demanda adição de CAP virgem. O CAP presente no RAP encontra-se oxidado, demandando adição de REOB para rejuvenescimento.

Além de análises granulométricas, é importante restabelecer as propriedades químicas e reológicas das novas misturas recicladas utilizando como agente rejuvenescedor o óleo denominado *Re-Refined Engine Oil Bottom* (REOB), também avaliado por Paliukaite; Assuras; Hesp (2016) e Zhang; Bahia (2021), e com acréscimo do ligante virgem CAP 50/70, visto que Willis *et al.* (2012) obtiveram melhorias na vida de fadiga ao acrescentar um ligante virgem às misturas recicladas a quente contendo 25 e 50% RAP.

As dosagens para esta pesquisa do REOB e de CAP 50/70 foram determinadas a partir da pesquisa de Fonseca (2018), que obteve uma resistência à tração por compressão diametral de 0,69MPa com 5,00% de REOB e 0,65 MPa com 10,00% de REOB. Além das análises mecânicas utilizando o REOB de mesma composição, também buscou-se definir o teor ótimo de ligante e de REOB para misturas com 100% RAP que se espera apresentar bom desempenho em campo.

No Brasil, não existem dados precisos sobre a produção e o reaproveitamento de material fresado, já que a reciclagem asfáltica não é considerada uma prática rotineira. No entanto, é uma atividade que tem grande potencial para permitir um melhor aproveitamento dos recursos financeiros destinados à expansão e à manutenção da infraestrutura rodoviária.

1.3 Organização da Pesquisa

Com o objetivo de expor de maneira clara e ordenada todos os passos desta pesquisa, o estudo foi estruturado nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Introdução

Introduz o tema estudado, abordando o assunto da pesquisa, fixa o objetivo geral do estudo e o modo de alcançá-lo através dos objetivos específicos delimitados. Neste capítulo ainda é abordado a relevância e a organização da pesquisa.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

São apresentados os principais tópicos inerentes à reciclagem de pavimentos asfálticos, tecnologias de produção, constituintes das misturas asfálticas recicladas a quente, bem como o papel dos agentes rejuvenescedores neste processo.

Capítulo 3 – Metodologia

Aborda todos os materiais empregados e suas respectivas caracterizações e especificações, as normativas e importância dos ensaios realizados em laboratório relevantes para alcançar os objetivos propostos.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

Apresenta os resultados obtidos com os ensaios de mecânicos das misturas asfálticas recicladas. Discute-se com trabalhos anteriormente publicados.

Capítulo 5 – Correlação dos Ensaios

Apresenta uma análise da correlação entre os ensaios de Estabilidade Marshall e Resistência à tração por compressão diametral.

Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações

O último capítulo retrata as principais conclusões obtidas acerca do objeto de pesquisa, algumas considerações complementares verificadas no transcorrer do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reciclagem de Pavimentos Asfálticos

Os modais de transporte são peças fundamentais para a vitalidade econômica global de um país, (HU *et al.*, 2019). No Brasil, o sistema rodoviário exerce quase que a totalidade de locomoção de cargas e pessoas. Esse intenso tráfego causa uma enorme sobrecarga sobre os pavimentos e também ao meio ambiente, no que diz respeito às emissões de Dióxido de Carbono (CO₂). A sociedade tem buscado uma melhor qualidade de vida o que levou a explorar o planeta, sobretudo nas últimas décadas, de forma descontrolada. Resultou em uma elevada redução atual de recursos naturais, acarretando numa busca por uso de alternativas sustentáveis (BEHNOOD, 2019; SILVA; OLIVEIRA; JESUS, 2012).

Durante o período de serviço dos pavimentos asfálticos, a estrutura suporta diversas condições climáticas e cargas repetidas, o que acarreta alguns problemas permanentes, como fadiga, afundamento de trilha de roda, painéis etc. A remoção de pavimentos asfálticos antigos produz grande quantidade de RAP. O uso desses materiais em novas aplicações de pavimentação é uma abordagem valiosa para conservar recursos naturais, reduzir os custos gerais da mistura asfáltica, além de também mitigar os impactos ambientais (BEHNOOD, 2019; WILLIAMS; WILLIS; SHACAT, 2020), fechando o ciclo de vida do asfalto (ZAUMANIS *et al.*, 2021).

Quando um pavimento asfáltico em uso torna-se deteriorado estruturalmente, há necessidade de restaurar sua capacidade de carga através de colocação de espessuras adicionais de camadas. Isso é feito através do corte de todo ou parte do revestimento deteriorado por equipamento especial – fresadora – e execução de nova camada de revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2010). Na pavimentação, o uso do RAP em misturas recicladas tornou-se uma prática habitual em todo o mundo. Essa prática sustentável realizado em estruturas rodoviárias dará o potencial de proporcionar enormes benefícios ambientais, sociais e econômicos (AL-QADI *et al.*, 2007; PASETTO *et al.*, 2021).

A Figura 1 ilustra o ciclo de vida do asfalto que consiste no dimensionamento e projeto do pavimento, dosagem e projeto da mistura asfáltica, produção do asfalto, pavimentação, serviço e vida útil e fresagem.



Fonte: ZAUMANIS *et al.* (2021).

Kandhal; Mallick (1997) destacam 4 vantagens que envolvem a reciclagem de misturas asfálticas:

- O reaproveitamento, tanto dos agregados, quanto do ligante asfáltico remanescente no material reciclado (insumo de maior custo em uma mistura asfáltica);
- A correção de possível erro de dosagem do projeto inicial da mistura;
- A reciclagem da espessura total da camada de revestimento; e,
- A possibilidade de análise laboratorial dos materiais após a remoção da camada fresada.

O processo de reciclagem de misturas asfálticas se baseia na reutilização dessas misturas em estado envelhecido e degradado, aproveitando-se os agregados e ligantes remanescente, oriundos do processo de fresagem. Nesse método de reciclagem é possível ou não, a utilização de agentes rejuvenescedores, espumas de asfalto, cimento asfáltico de petróleo ou emulsão asfáltica de petróleo e aglomerantes hidráulicos novos (BERNUCCI; MOURA; LEITE, 2002).

Na União Europeia e nos Estados Unidos, mais de 123 milhões de toneladas de RAP são disponibilizados anualmente (EAPA, 2018). Por essa razão, indústrias de pavimentação, agências e pesquisadores estão incessantemente na busca de resultados significativos para maximizar tais vantagens, aumentando a quantidade de RAP dentro de novas misturas asfálticas. No entanto, a grande,

preocupação é quanto ao desempenho imprevisível das misturas recicladas e aos diversos fatores que interferem no comportamento em serviço (SREERAM; LENG, 2019). Esse bom comportamento tem relação direta às propriedades do RAP por conter a presença de ligante envelhecido, oxidado e endurecido (SREERAM; LENG, 2019; ZAUMANIS *et al.*, 2014b).

Assim, de forma a maximizar os benefícios econômicos e ambientais busca-se elevar o teor de material reciclado na mistura. Entretanto, a avaliação do comportamento e desempenho das misturas recicladas é essencial para que seja possível produzir misturas com propriedades similares ou melhores que as convencionais. Além disso, existem diversos fatores que podem limitar o teor de RAP na mistura final, como por exemplo, as características do material fresado e o tipo de usina para a produção da mistura reciclada (KANDHAL; MALLICK, 1997).

O uso de proporções de RAP em elevadas quantidades em misturas asfálticas impede o descarte desse material em aterros sanitários, ao mesmo tempo reduz a quantidade de novos agregados extraídos do planeta, sendo assim uma alternativa eficaz tanto em níveis ambientais quanto energéticos (CHIU; HSU; YANG, 2008; SAYAGH *et al.*, 2010).

Se tratando da redução de custos, Yao *et al.* (2022) investigaram a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso do asfalto modificado de Polietileno Tereftalato (PET) contendo RAP na manutenção e reabilitação do pavimento analisado do ponto de vista do ciclo de vida. Os resultados mostram que a incorporação de resíduos PET e RAP no pavimento poderia reduzir os custos do ciclo de vida e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em até 26,2% e 29,0%, respectivamente. Aurangzeb *et al.* (2014) também observaram uma redução significativa no consumo de energia e na emissão de GEE quando o RAP foi introduzido nas misturas. Considerando apenas o processo que envolve a produção do ligante, observou-se redução de até 28% tanto no consumo de energia quanto nas emissões de GEE. Verificou-se também que a fase de construção contribuiu muito pouco (cerca de 6-8%) para a energia total e os GEE.

Observou-se redução de 26%, 33% e 40% na energia de matérias-primas para as misturas com 30%, 40% e 50% RAP, respectivamente.

Dessa forma, tem-se o grande desafio em utilizar um grande conteúdo de RAP de forma a não produzir misturas asfálticas rígidas com baixa capacidade de trabalho e durabilidade, acarretando em falhas prematuras de campo (MOGAWER *et al.*, 2012; SINGHVI *et al.*, 2016). Assim, pesquisadores tem direcionados seus trabalhos para quantificar e qualificar o grau de mistura entre o RAP e os agregados virgens, bem como sua totalidade, realizando abordagens de análise: mecânica, química, física e visual (OREŠKOVIĆ *et al.*, 2020).

De forma a reaproveitar o RAP em novas misturas, foram elaborados diferentes processos e sua escolha depende diretamente das características do material a ser reciclado e do produto final desejado. Com isso, ele pode ser incorporado a misturas asfálticas usinadas a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), a misturas asfálticas mornas (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*), ou ainda ser reaproveitado através de processos de reciclagem a frio. A reciclagem a frio pode ser feita com a adição de ligante hidráulico, de emulsão asfáltica, ou de espuma de asfalto. As duas primeiras possuem a vantagem de possibilitar que o ligante asfáltico envelhecido presente no RAP seja ativado, graças ao aumento da temperatura e à adição de agentes rejuvenescedores, e assim substituir boa parte do ligante asfáltico virgem que seria adicionado à mistura, este que costuma ser o material de maior custo no pavimento (BROSSEAUD, 2011; ZAUMANIS; MALLICK, 2015).

2.2 Misturas Asfálticas Reciclagem a Quente

Atualmente, em muitos projetos de construção, o asfalto é reciclado em camadas de base não ligadas, adicionando uma porcentagem relativamente pequena, que varia de 10 a 30% ao novo asfalto (WILLIAMS; WILLIS; SHACAT, 2020). Essas misturas são aplicadas principalmente em acostamentos e estradas rurais, tendo como processo a reciclagem fria no local ou usinado a quente. Isso significa que o RAP está se acumulando em estoques, usados em aplicações não betuminosas de baixo valor, como vias não pavimentadas, ou sendo desperdiçados (WEST; WILLIS; MARASTEANU, 2013). Essa prática não é

verdadeiramente sustentável quando se é utilizado em aplicações de menor valor (ZAUMANIS *et al.*, 2016).

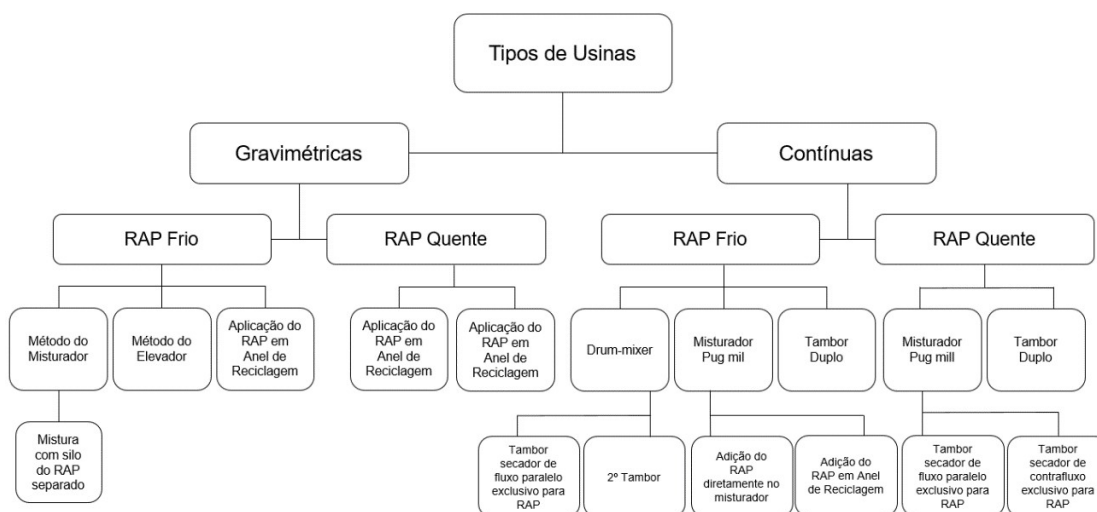
Considera-se que o uso mais econômico do RAP está nas camadas intermediárias e superficiais de pavimentos flexíveis porque o RAP por ser um material mais barato pode substituir uma porção do material virgem mais caro (COPELAND, 2011). Isso é ainda mais importante atualmente devido ao encolhimento da oferta de matérias-primas e ao aumento da conscientização ambiental.

A quantidade máxima de RAP a ser reutilizada na produção de misturas quentes depende não apenas da capacidade de corrigir as características físico-químicas do ligante envelhecido, mas também da tecnologia de produção (MOGAWER *et al.*, 2012; ZAUMANIS; MALLICK, 2015). Esse beneficiamento ainda vai variar da área de produção e das plantas, que são locais onde são produzidas estas misturas em larga escala, podendo ser realizado ainda em usinas estacionárias, usinas móveis, ou local (*in situ*), cada qual com vantagens e desvantagens específicas, de forma que atendam às especificações de misturas asfálticas destinadas às camadas de base, de ligação ou de rolamento (DNER, 1998).

A reciclagem a quente no local, *in situ*, denominada no inglês, *Hot in-place recycling* (HIR) é considerada como a forma mais eficaz de reutilizar o RAP, com benefícios de evitar o transporte de materiais RAP para a planta central e os produtos da planta central de volta aos locais de pavimentação, o que reduz o consumo de energia fóssil e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (YU *et al.*, 2018; ZHONG *et al.*, 2021).

Nessas plantas, o sistema de reciclagem de pavimentos se difere em Contínuas ou Gravimétricas. A Figura 2 apresenta um fluxograma desses dois tipos de usinas utilizadas para misturas asfálticas recicladas. Ambas possuem reciclagem a quente e a frio.

Figura 2 – Tipos de usinas utilizadas para misturas asfálticas recicladas

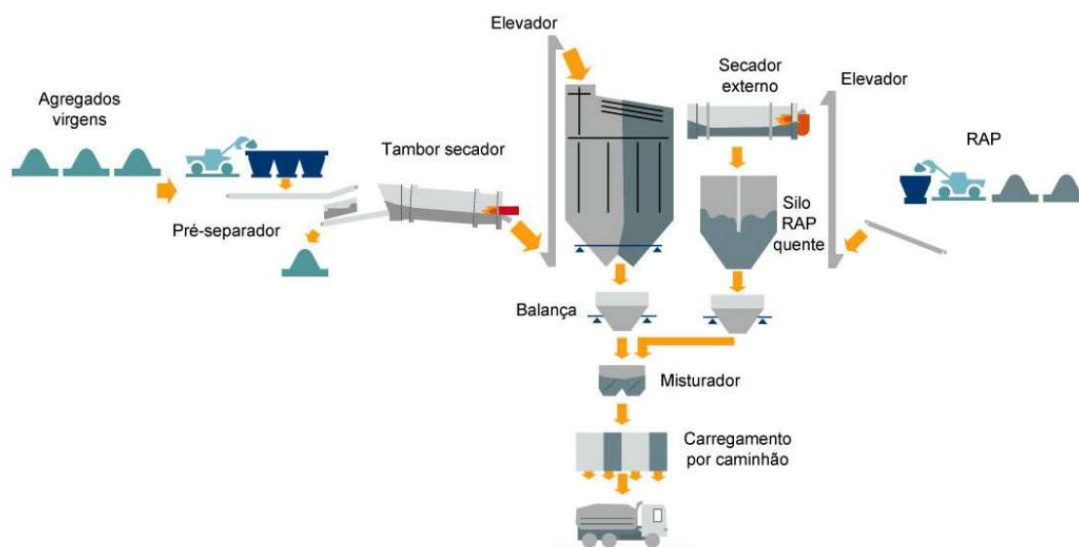


Fonte: DNIT (2021).

As usinas gravimétricas são conhecidas por terem a produção da mistura asfáltica por bateladas devidamente controladas por pesagem. Os silos frios armazenam os agregados e por meio de uma correia transportadora migram para um tambor secador para secagem e aquecimento através da energia de um queimador. Após a retirada da umidade, um elevador de caneca transporta os materiais para a parte superior de uma torre de pesagem. Um conjunto de telas vibratórias classifica as partículas na granulometria desejada que posteriormente são separadas nos silos quentes (SUZUKI, 2019).

Para misturas asfálticas recicladas a quente em usinas gravimétricas como ilustrada pela Figura 3, o RAP é adicionado em um tambor secador de fluxo paralelo dedicado exclusivamente a este material, onde há uma fonte de calor exclusiva para aquecer o RAP. Nesse processo, deve-se ter um elevador quente e um silo balança também dedicados exclusivamente ao RAP. Os fenômenos principais de troca de calor são condução, convecção e radiação. A radiação deve ser minimizada pelo projeto do tambor (DNIT, 2021).

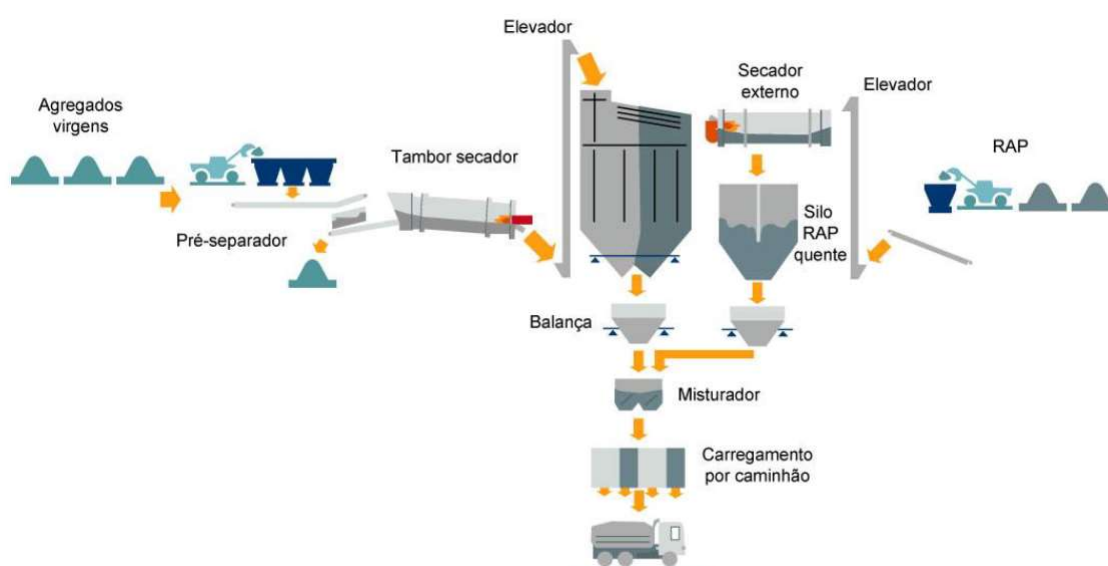
Figura 3 – RAP Quente em Usinas Gravimétricas com Tambor Secador de Fluxo Paralelo Exclusivo



Fonte: DNIT (2021).

Para usinas onde o RAP é adicionado em um tambor secador de contrafluxo dedicado exclusivamente a este material, como mostrado na Figura 4, há um aquecimento indireto do RAP. Também necessita-se de um elevador quente e um silo balança também dedicados exclusivamente ao RAP (DNIT, 2021).

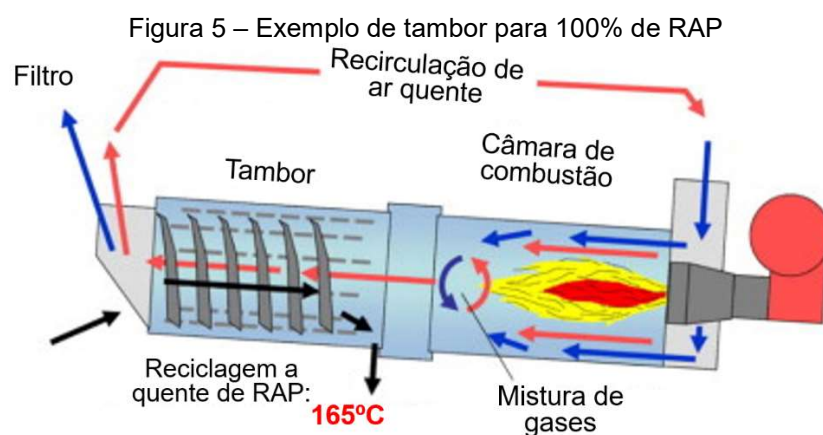
Figura 4 – RAP Quente em Usinas Gravimétricas com Tambor Secador de Contrafluxo Exclusivo



Fonte: DNIT (2021).

No caso de misturas recicladas a quente contendo 100% RAP as usinas gravimétricas possuem um diferencial que está no tambor secador, que faz com que o RAP não tenha contato direto com a chama do secador. Um exemplo é o tambor secador de contrafluxo de duas fases. A fase de aquecimento e secagem

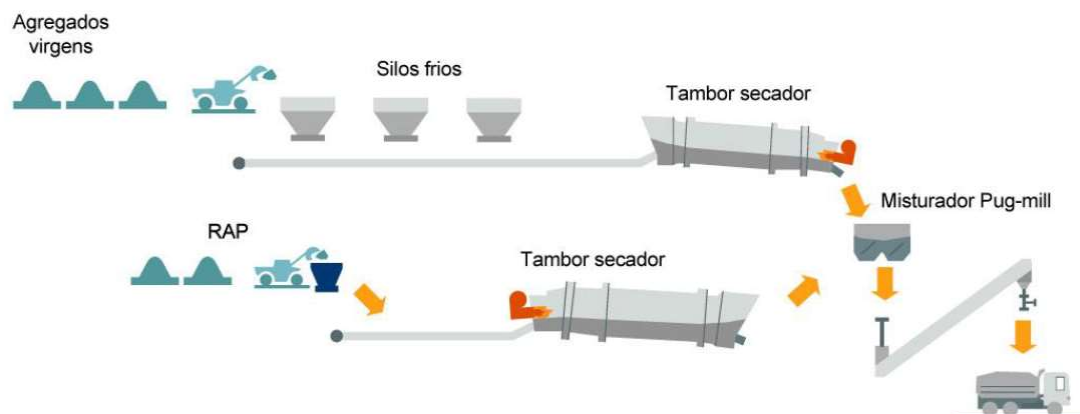
do tambor gira, enquanto que a câmara de combustão é estática. O RAP é aquecido pelo ar quente e é descarregado antes de entrar em contato com a chama, reduzindo assim as emissões e limitando o envelhecimento do ligante do RAP. Posteriormente, o material é conduzido para a balança e o misturador. O agente rejuvenescedor e o novo ligante, se houver, são adicionados e misturados com o RAP (DNIT, 2021). A Figura 5 detalha internamente o tambor secador para 100% RAP.



Fonte: (ZAUMANIS; MALLICK; FRANK, 2014b).

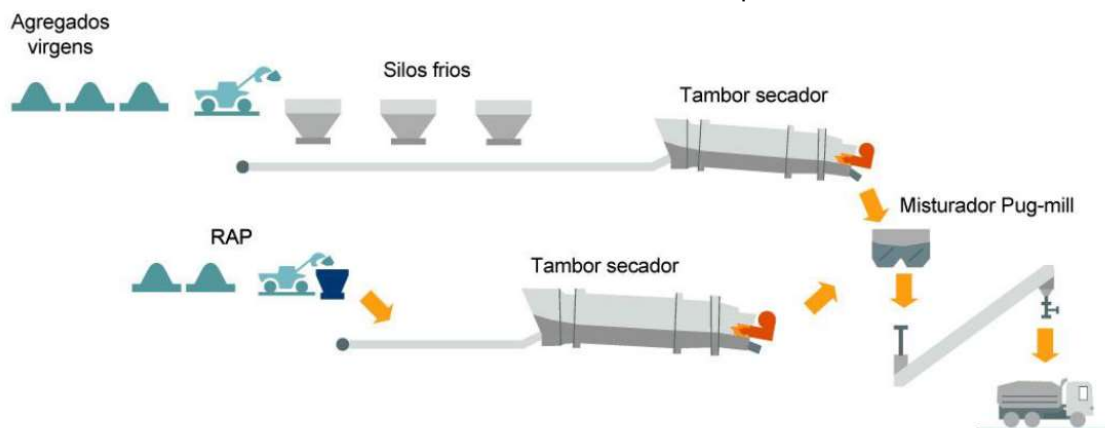
Enquanto isso, as usinas contínuas ou volumétricas, como o próprio nome sugere, têm a produção da mistura asfáltica de maneira ininterrupta, onde a pesagem dos agregados é feita de forma individual. As correias possuem um dispositivo eletrônico que faz a pesagem dos materiais e a regulação das quantidades automaticamente. Os agregados são encaminhados para um tambor ligeiramente inclinado, que pode ser do tipo fluxo paralelo, Figura 6, ou contrafluxo, Figura 7, do sentido da chama do queimador para a secagem e aquecimento dos agregados. O CAP é então adicionado e a homogeneização da mistura pode ser feita no próprio tambor misturador (*drum-mixer*), ou em um misturador externo (*pugmill*). Para ambas técnicas, os fenômenos principais de troca de calor são condução, convecção e radiação. (DNIT, 2021; SUZUKI, 2019).

Figura 6 – Processo produtivo de RAP Quente em Usinas Contínuas com misturador Pugmill – Tambor secador de fluxo paralelo exclusivo para o RAP



Fonte: DNIT (2021).

Figura 7 – Processo produtivo de RAP Quente em Usinas Contínuas com misturador Pugmill – Tambor secador de contrafluxo exclusivo para o RAP



Fonte: DNIT (2021).

Após definida a alternativa de solução por reciclagem, a etapa seguinte consiste em dosar os componentes da mistura final reciclada, ou seja, determinar as porcentagens dos materiais e misturas intervenientes de maneira a satisfazer os requisitos das especificações próprias para os serviços de reciclagem. Esses requisitos constam das especificações DNER ES-187a/96 - Concreto Betuminoso Reciclado a Quente na Usina e DNER ES-187b/96 - Concreto Betuminoso Reciclado a Quente no Local (DNIT, 2021).

2.3 Materiais Asfálticos (Ligantes e Agentes Rejuvenescedores)

Existem muitos termos diferentes usados para materiais que restauram as propriedades reológicas de ligante envelhecido, semelhantes ao seu estado original sem envelhecimento. Esses termos são usados alternadamente como rejuvenescedores, agentes de reciclagem, modificadores ou aditivos. A restauração é obtida por meio da renovação dos voláteis e óleos, geralmente melhorando a flexibilidade e as propriedades de adesão, visando retornar a proporção de asfaltenos/maltenos de um ligante envelhecido ao seu estado original (CHEN *et al.*, 2014; JOHNSON; HESP, 2014).

Durante a construção e a vida útil de pavimento asfáltico, as propriedades mudam de tal forma que os ligantes se tornam mais rígidos e menos resistentes à fadiga/rachaduras em baixa temperatura (CHEN *et al.*, 2021). Isso ocorre devido à evaporação e oxidação dos componentes voláteis de um ligante que ocorre desde o momento em que é construído até o final de sua vida útil. A mistura asfáltica em si muda (do ponto de vista químico e reológico) ao longo do tempo devido ao envelhecimento (FERREIRA *et al.*, 2021).

A quantidade de asfaltenos no ligante é o principal determinante da viscosidade do asfalto, pelo fato de serem mais viscosos do que resinas e óleos. Os agentes rejuvenescedores são materiais que contêm em sua composição óleos saturados que através de um determinado método de aplicação são capazes de restaurar parcialmente a totalmente as propriedades do ligante asfáltico oxidado ao seu estado viscoelástico original (AIREY, 2003; WU *et al.*, 2007).

Os agentes rejuvenescedores podem ser adicionados à mistura, uma vez que atuam para restaurar as propriedades relacionadas ao desempenho do ligante envelhecido. A estrutura coloidal e os componentes químicos do ligante envelhecido são restaurados por meio de um processo de difusão, levando a uma viscosidade e rigidez reduzidas e a uma ductilidade aumentada. Quando o rejuvenescedor é selecionado adequadamente, as propriedades das misturas usando RAP são geralmente satisfatórias. Estudos relataram o efeito positivo do uso de rejuvenescedores, principalmente na resistência à formação de fissuras (ZAUMANIS; MALLICK; FRANK, 2014a).

Zaumanis *et al.* (2014b) afirmam que a redução da rigidez da mistura asfáltica envelhecida é o maior desafio relacionado à aplicação dos agentes rejuvenescedores, pois se utilizados inadequadamente podem causar aumento das deformações plásticas. Segundo o autor, dois fatores merecem destaque no intuito de evitar problemas desse tipo, são eles: a escolha adequada da dose do rejuvenescedor, a fim de evitar o amolecimento exacerbado da mistura devido ao excesso da quantidade aplicada e a execução, de forma correta, do processo de difusão dos agentes rejuvenescedores nos ligantes asfálticos. A difusão inadequada do agente rejuvenescedor na mistura pode gerar resultados falsos de desempenho de laboratório e campo (CERDEIRA, 2018).

O principal desafio com o aumento da quantidade de RAP é o aumento da alta rigidez e fragilidade do ligante envelhecido no material reciclado, o que causa uma preocupação de fissuração prematura dos pavimentos. Assim, com a função de compensar os efeitos do envelhecimento oxidativo do ligante reciclado, busca-se dosagens capazes de permitir maiores porcentagens de RAP sem sacrificar o desempenho. Tem havido uma proliferação de agentes rejuvenescedores entrando no mercado nos últimos anos, mas muitas das informações técnicas e diretrizes de uso permanecem proprietárias ou carecem de justificativa científica (BAI *et al.*, 2019; WU *et al.*, 2007; ZHANG *et al.*, 2017b).

O comportamento mecânico da mistura asfáltica está diretamente ligado à dosagem ideal da mistura, assim, ligante e agregado exercem fundamental importância nesse quesito. O ligante, como resultado de sua consistência e reologia; e o agregado, com as forças de fricção interna entre suas partículas. Dosagens impróprias estão entre as principais causas da deformação permanente que é considerada como a ocorrência simultânea da deformação viscosa do ligante asfáltico e da deformação plástica da estrutura mineral da mistura asfáltica. Também, o emprego de quantidades excessivas de ligante asfáltico é um dos grandes causadores do afundamento de trilha de roda (JOLIET; MALLOT, 2000; ROBERTS *et al.*, 1996)

O processo de reciclagem de misturas asfálticas consiste no aquecimento e escarificação da superfície da estrada existente, seguido pela mistura com os

agentes de rejuvenescimento e a técnica de compactação, que é adequada para pavimentos sujeitos a pequenas fissuras dentro de 25–50 mm de profundidade. Nesse processo, a qualidade da mistura reciclada se dá pela graduação do agregado, conteúdo do ligante, reologia do ligante e propriedades volumétricas da mistura (STROUP-GARDINER, 2012).

Hafeez *et al.* (2014) exploraram a influência das técnicas de reciclagem no desempenho de misturas asfálticas e nas propriedades reológicas dos ligantes. Os resultados indicaram que aditivos alternativos podem melhorar a mistura e a compatibilidade dos materiais novos e antigos. Ma *et al.* (2020) investigaram dois métodos diferentes de incorporação de rejuvenescedor e relataram que as misturas de ligante terão melhores propriedades reológicas adicionando o rejuvenescedor ao ligante envelhecido primeiro.

Dessa forma, entender esse processo e o comportamento do ligante presente nos asfaltos envelhecidos é uma das principais tarefas da tecnologia de pavimento de asfalto atualmente. E assim, desenvolver aditivos e agentes rejuvenescedores capazes de restaurar as propriedades reológicas do ligante envelhecido de forma eficiente e garantir bom desempenho. Várias pesquisas seguem essa linha em realizar ensaios para caracterizar e analisar as propriedades físicas, químicas e reológicas de ligantes rejuvenescidos (CAO *et al.*, 2018; MAZZONI *et al.*, 2018; NIE *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2014).

Os principais aspectos dessas modificações visam melhorar as propriedades de sustentabilidade, adesão ou coesão durante o serviço e, especialmente, em baixas temperaturas. Na literatura, é bastante aceito o entendimento de que o processo de envelhecimento do ligante é o fator que tem influência maior nas propriedades de desempenho do ligante e, conseqüentemente, do asfalto. Esse envelhecimento ocorre sobretudo devido às ações termo-oxidativas e radicais polares gerados, por exemplo, sob radiação ultravioleta. Do lado químico, o teor de aromáticos diminui, enquanto a quantidade de resinas aumenta gerando efeitos diretamente nas propriedades reológicas e mecânicas dos ligantes asfálticos em uso (BAI *et al.*, 2019; LESUEUR *et al.*, 1996).

Em geral, para ser obter os parâmetros, dosagens e determinação das propriedades das misturas asfálticas e seu comportamento mecânico e reológico são realizados estudos em laboratório, logo, todo esse conhecimento tem fundamental importância sobretudo no dimensionamento da estrutura de pavimentos, por apresentarem um comportamento complexo, de forma a garantir condições ideais para o projeto e gerência do pavimento a ser executado (MELO, 2014).

Nessas análises são utilizados ensaios tradicionais como teste de penetração e ponto de amolecimento, além de caracterização química como a análise de saturação, aromática, resina e asfalto (SARA); cromatografia de permeação em gel (GPC) e Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR); quanto à caracterização reológica tem-se os teste de reômetro de feixe de flexão (BBR), testes de varredura de frequência com reômetros de cisalhamento dinâmico (DSR), e de varredura de amplitude linear (LAS).

De acordo com Silva (2011), o CAP é um produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente, líquido a altas temperaturas e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas. E seu uso intensivo do CAP em pavimentação se deve ao fato da forte união com os agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável, grande poder impermeabilizante, além de ser um material durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos.

O par de valores, CAP 30/45; CAP 50/70; CAP 85/100 e CAP 150/200 significa os limites inferior e superior permitidos para a penetração, medida em décimos de milímetro. A Tabela 1 informa os valores requeridos pela especificação proposta pelo DNIT NORMA 095/2006 – EM – Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de Material para o CAP 50/70.

Tabela 1 – Especificações do Cimento Asfálticos de Petróleo (CAP) 50/70 - Classificação por penetração

Características	Unidades	Limites	Métodos		
			ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	50-70	NBR 6576	D5	ME 003/99
	°C	46	NBR 6560	D36	
Viscosidade Saybolt Furol					
a 135°C, mín	s	141	NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 150°C, mín	s	50			
a 177°C	s	30-150			
Viscosidade Brookfield					
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín	cP	274	NBR 15184	D 4402	-
a 150°C, SP 21, mín	cP	112			
a 177°C, SP 21	cP	57-285			
Índice de susceptibilidade térmica		(1,5) a (+0,7)	-	-	-
Ponto de fulgor mín	°C	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5		D 2872	-
Ductilidade a 25° C, mín	cm	20	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	NBR 6560	D 36	-
Penetração retida, mín (3)	%	55	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

Para se enquadrar nessa classe e apresentar um bom desempenho em serviço, o ligante asfáltico deve atender rigorosamente a esse série de requisitos destes ensaios citados.

2.3.1 REOB

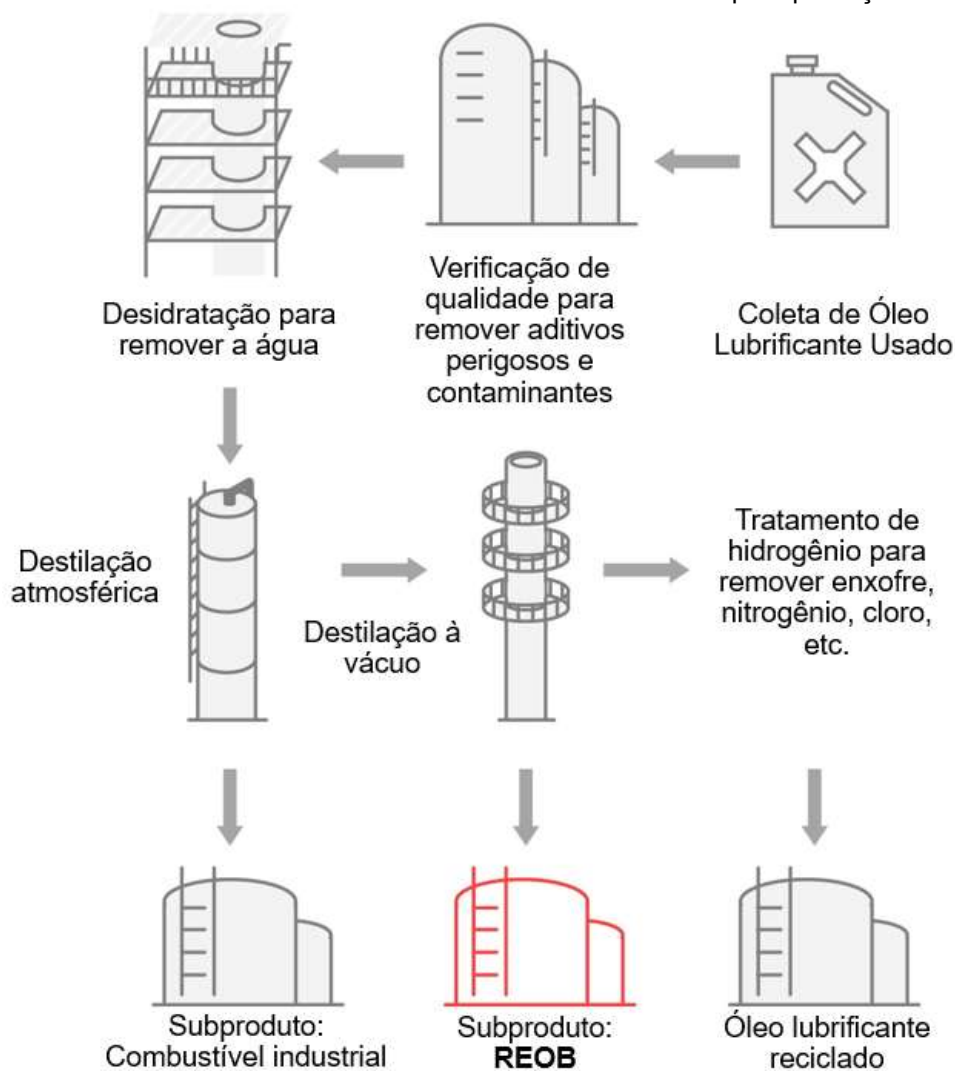
Dentre os diversos agentes rejuvenescedores disponíveis, esta pesquisa utilizou um produto obtido do processo de reciclagem de óleo do motor, denominado em inglês *Re-refined engine oil bottoms* (REOB), como será referido neste trabalho.

Na indústria e na literatura internacional, o REOB tem sido conhecido por vários termos, incluindo *Vacuum tower asphalt binders* (VTAB), *Vacuum tower asphalt*

extenders (VTAE), Re-Refined vacuum tower bottoms (RVTB), Waste engine oil residues (WEOR), Waste engine oil (WEO), Engine oil residues (EOR), Waste oil distillation bottoms (WODB), Re-Refined heavy vacuum distillation oils (RHVDO), Re-Refined heavy vacuum distillate bottoms (RHVDB), asphalt flux, asphalt extenders e asphalt blowdowns (BARBORAK; COWARD; LEE, 2016).

Depois que os óleos do motor recuperados foram testados para garantir que estejam livres de compostos indesejáveis, contaminantes perigosos e livres de água, eles entram no processo de refino. A Figura 8 ilustra o processo de re-refinamento dos óleos lubrificantes usados. Nesse processo incluem etapas de desidratação, destilação atmosférica, destilação a vácuo e tratamento de hidrogênio.

Figura 8 – Processo de Re-refinamento do óleo lubrificante usado para produção de REOB



Fonte: (YAN *et al.*, 2020).

O subproduto que equivale à fração não destilável da destilação atmosférica seguido de destilação a vácuo é o REOB. O re-refinamento do óleo lubrificante usado produz cerca de 12% a 15% de REOB, sendo os demais produtos óleos combustíveis e óleo lubrificante reciclados. (YAN *et al.*, 2020). Embora o REOB tenha sido usado para modificar pastas asfálticas desde a década de 1980, preocupações foram recentemente expressas na indústria de pavimentação asfáltica devido à falta de pesquisas abrangentes (D'ANGELO *et al.*, 2013).

A composição do REOB em sua maior parte é enxofre, fósforo, ferro e zinco, mas também com quantidades de cálcio, molibdênio e cobre, de acordo com o *Texas Department of Transportation* (2015). Esse produto vem sendo utilizado como aditivo para modificar os ligantes desde a década de 80 para diversas funções, e com os bons resultados alcançados, houve um aumento em seu interesse e uso justamente pela expansão da reciclagem de asfalto, impulsionando a demanda por misturas mais flexíveis. A fim de melhorar a plasticidade, essa alternativa se deu justamente para proporcionar à mistura reciclada melhores propriedades reológicas ao ligante do RAP que se apresenta duro e oxidado (ASPHALT INSTITUTE, 2016).

O REOB é um material que vem sendo pesquisado recentemente em aplicações nas misturas asfálticas e que confere características reológicas interessantes a mistura que permite sua aplicação a temperatura ambiente (a frio). Nos Estados Unidos da América (EUA), por exemplo, da quantidade de óleo de motor reciclado coletada anualmente, 83% são queimados como combustível e 17% são refinados. Segundo dados do Departamento de Energia dos EUA (2006), o refino normalmente produz 75% de óleo base, 12% de óleo combustível e 12% de resíduo que é o produto usado para modificar ligantes asfálticos (KASKOW; VAN POPPELEN; HESP, 2018).

A literatura sobre o desempenho de pavimentos asfálticos modificados com REOB também é limitada. Herrington *et al.* (1993) pesquisaram a adição de REOB usados em ligantes como alternativa para seu descarte na Nova Zelândia. Como parte da pesquisa, foram construídas seções de teste para determinar o desempenho a longo prazo. O comportamento dos resíduos de aglutinante

misturado foi semelhante ao do betume convencional, exceto por uma ductilidade inferior, no entanto, não foram encontradas outras publicações sobre o desempenho de longo prazo.

Alguns estudos já foram feitos com o uso do REOB em misturas asfálticas, como em Gibson *et al.* (2015), que relataram o desempenho de ligantes de asfalto e misturas contendo 0; 2; 5; 6 e 15% REOB. As misturas foram testadas para danos causados pela umidade, fadiga, resistência à tração indireta e fissuras a baixa temperatura. Verificou-se que concentrações mais elevadas de REOB resultaram em perda de desempenho para o ligante e as misturas de asfalto, enquanto as concentrações mais baixas desse componente apresentaram resultados mistos.

Fonseca (2018) avaliou o desempenho do REOB em sua pesquisa e ao utilizar 15%, 10% e 5% de REOB em 100% RAP contendo 7,5% de ligante total. O resultado da resistência a tração por compressão diametral para 15% de REOB foi de 0,22MPa, valor médio 66% abaixo do valor mínimo especificado pelo DNIT que exige uma resistência igual ou superior a 0,65 MPa à 25°C. Verificou-se que esse limite mínimo foi respeitado ao diminuir o percentual de REOB 10% para 5% (para a mistura com 7,5% de ligante total), onde as resistências a tração foram de 0,66 e 0,69 MPa respectivamente.

Cerdeira (2018) em sua pesquisa também com 100% RAP, testou diferentes porcentagens de REOB e CAP em suas misturas, atingindo excelentes resultados. Como mostrado acima, a utilização com casos de sucesso do REOB no exterior e em pesquisas aqui no Brasil, apontam como um agente potencial na utilização de reciclagem de misturas asfálticas a quente e, portanto, será esse o produto utilizado na metodologia deste estudo.

A Tabela 2 apresenta a descrição e principais resultados de pesquisas que envolvem a modificação do ligante asfáltico com REOB/VTAE ou sua própria adição. Foi incorporado a primeira pesquisa documentada datada de 1992 até uma mais atual.

Tabela 2 – Estudos com REOB/VTAE/WODB/EOR

Título	Descrição	Resultado	Referências
<i>“Use of Re-refined Oil Distillation Bottoms As Extenders For Roving Bitumens”</i>	Investigaram as propriedades reológicas e o potencial de uso de WODB como extensores para ligantes asfálticos	. Os testes mostraram que misturas produzidas em temperaturas até cerca de 200°C o WODB pode melhorar ligeiramente a estabilidade oxidativa do ligante. Em temperaturas mais altas, as misturas WODB oxidam em uma taxa mais rápida	(HERRINGTON <i>et al.</i> , 1993)
<i>“Asphalt Modification with Used Lubricating Oil”</i>	Investigaram vários materiais asfálticos modificados com diferentes dosagens de óleos lubrificantes usados a fim de melhorar o grau de desempenho de baixa temperatura de acordo com a especificação <i>Superpave</i>	Todas as amostras ficaram mais macias à medida que o óleo foi adicionado. O ponto de amolecimento diminuiu e a penetração aumentou a 25°C com o aumento do nível de óleo	(VILLANUEVA; HO; ZANZOTTO, 2008)
<i>“Characteristics of rejuvenated bitumen with used lubricating oil as rejuvenating agent”</i>	Avaliaram a viabilidade técnica do uso de óleos lubrificantes usado como rejuvenescedor de ligantes asfálticos antes e depois do envelhecimento comparados com a especificação ASTM RA-2 para materiais de rejuvenescimento de asfalto	Os resultados indicam que o óleo lubrificante usado contém alguma fração leve volátil que não só afeta sua viscosidade, mas também a segurança do processo de transporte, armazenamento e aplicação devido à sua baixa temperatura de ponto de fulgor	(ZAMHARI; HERMADI; FUN, 2009)
<i>“Effects of Engine Oil Residues on Asphalt Cement Quality”</i>	Investigaram o envelhecimento químico de cinco ligantes asfálticos modificados com EOR	Verificaram que o EOR aumentam significativamente tanto a oxidação rápida quanto a taxa constante, o que pode causar fadiga prematura e excessiva, além de rachaduras térmicas	(RUBAB <i>et al.</i> , 2011)
<i>“Effects of recycling agents (RAs) on rutting resistance and moisture susceptibility of mixtures with high RAP/RAS content”</i>	Investigaram os efeitos na resistência e suscetibilidade de misturas contendo 30 e 50% de RAP, comparadas a uma mistura de controle sem RAP com adição de 3 ARs, um deles o REOB	Os resultados mostraram que a adição de RAs reduziu a deformação permanente em 12,5 mm e a inclinação da fluência, mas nenhuma das combinações de RAP e RAs produziu uma mistura com menos resistência à deformação permanente do que a mistura virgem	(ZHANG; BAHIA, 2021)

Fonte: Adaptado de Asphalt Institute (2016) e Zhang; Bahia (2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados a relação dos materiais, suas respectivas caracterizações e os ensaios empregados na pesquisa. Os ensaios de laboratório são descritos resumidamente, indicando as normas utilizadas para sua realização, em que constam detalhadamente os procedimentos específicos para cada ensaio. Também são apresentados, neste capítulo, informações adicionais como coleta das amostras, definição e especificação dos materiais.

3.1 Materiais

A seguir, serão descritos os materiais utilizados na presente pesquisa: o Concreto Asfáltico Fresado, o REOB (*re-refined oil engine bottom*) e o Cimento Asfáltico de Petróleo Convencional - CAP 50/70, com suas especificações técnicas de fornecimento ou aquisição.

3.1.1 Material Fresado (RAP)

O RAP utilizado na pesquisa foi coletado no pátio de estoque de pertencente à Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP), localizado na região oeste de Belo Horizonte/MG. Conforme informação obtida pelo engenheiro responsável pelo pátio de estocagem, o material é resultante da fresagem realizada na espessura média de 50 mm de revestimento em concreto asfáltico do arruamento da cidade. O material foi depositado há aproximadamente 5 (cinco) anos. Foram coletadas 15 (quinze) sacos de aproximadamente 20 kg (vinte quilogramas) de material fresado em cada um.

3.1.1.1 Caracterização do Material Fresado (RAP)

Ao se utilizar o RAP em uma mistura reciclada, é importante conhecer suas características, principalmente o teor de ligante asfáltico residual e a curva granulométrica. Esta pesquisa visa estabelecer uma metodologia capaz de viabilizar o uso de material 100% fresado, assim optou-se pela granulometria do RAP recolhido sem acréscimo de agregados virgens e separação.

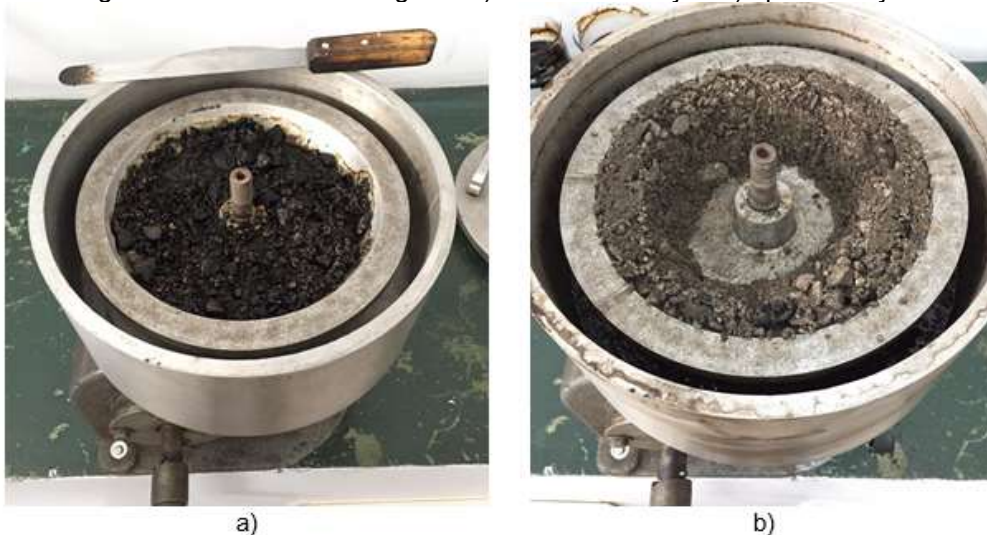
3.1.1.1.1 Determinação do Teor de Ligante

Para determinar o teor de ligante foram utilizados procedimentos de extração por centrifugação do ligante do fresado, para separação do agregado utilizando um solvente, conforme procedimento da norma DNER-ME 053/94 (DNER, 1994). O ensaio foi realizado no laboratório de transportes do CEFET/MG – Campus I. Para o cálculo do teor de ligante foi utilizada a equação 1:

$$P = \frac{\text{Peso do ligante extraído}}{\text{Peso da amostra total}} \times 100 \quad (1)$$

Todas as três amostras continham 1000,0g do fresado, resultando, respectivamente nos teores de 4,8%, 5,0% e 4,9%. O teor médio de CAP obtido foi de 4,9%. As três amostras testadas apresentaram baixa variação, o que confirma boa homogeneidade do RAP. A Figura 9 compara o antes do ensaio e depois da extração do ligante através do Rotarex.

Figura 9 – Ensaio teor de ligante a) antes da extração b) após extração.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 9a ilustra o material logo após ser coberto totalmente pelo solvente. A Figura 9b ilustra a condição final do ensaio, após a retirada de todo o ligante, e finalizado quando o solvente saiu límpido, exatamente como preconizado pela norma DNER 053/94.

3.1.1.1.2 Análise granulométrica por peneiramento

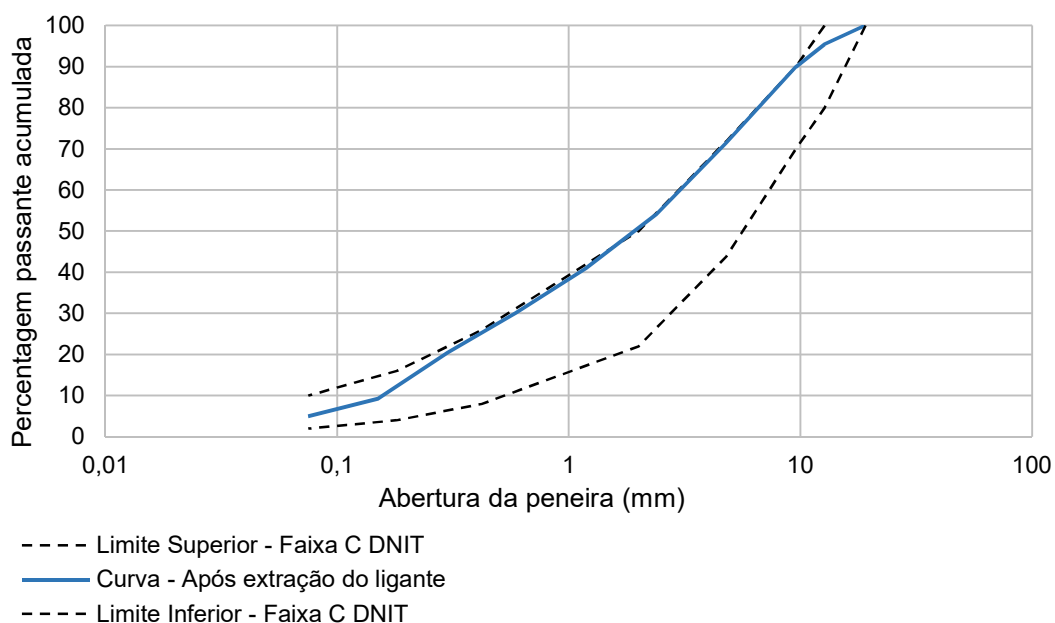
O RAP pós extração do ligante foi submetido ao ensaio de granulometria a fim de verificar os requisitos de tolerâncias, no que diz respeito às respectivas faixas granulométricas específicas para camadas de rolamento, segundo NORMA DNIT 031/2006 - ES - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de Serviço (DNIT, 2006). Para a representação da amostra e conhecimento de sua granulometria, utilizou-se um conjunto de peneiras sucessivas com as aberturas de malha estabelecidas pela norma, mostradas na Tabela 3. Para este ensaio foi utilizado o material retido no prato após a extração do teor de ligante.

Tabela 3 – Granulometria amostra após extração ligante		
Peneira (Nº)	Peneira (mm)	% passante acum.
3/4"	19,1	100
1/2"	12,7	95,43
3/8"	9,52	89,93
4	4,76	71,34
8	2,38	53,97
16	1,19	41,01
30	0,59	30,13
50	0,3	20,49
100	0,15	9,28
200	0,075	5,00

Fonte: (DNIT, 2006).

A sequência acima apresenta aberturas tanto da série normal, quanto da série intermediária. Após o ensaio, a massa de material retido em cada peneira foi anotada e em seguida, traçada sua respectiva curva granulométrica, mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Curvas granulométricas dos materiais sem ligante.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que a curva se enquadra ao intervalo determinado pelo DNIT, se sobrepondo ao limite superior da faixa C, que indica uma granulometria com maior presença de finos na amostra.

A Figura 11 ilustra a amostra peneirada após extração do ligante.

Figura 11 – Granulometria da amostra sem fresado.



Fonte: Próprio autor.

Pela figura se tem uma noção da organização desde o peneiramento grosso ao fino após passagem em todas as peneiras. Uma correta graduação do concreto asfáltico garante a rigidez, durabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e deformação permanente da mistura (MEDINA; GORETTI DA MOTTA, 2005; PAPAGIANNAKIS; MASAD, 2012).

3.1.1.1.3 Densidades aparente, real e absorção dos agregados

Foram realizados os ensaios para definições da densidade aparente (G_{sb}), densidade real (G_{sa}) e absorção dos agregados. Sendo o material miúdo ensaiado de acordo com a norma DNER-ME 84/95 (DNER, 1995a) e o material graúdo conforme a norma ABNT NBR NM 53-2003 (ABNT, 2003). Para o material graúdo também será realizado o ensaio de absorção dos agregados, conforme a mesma norma ABNT NBR NM 53-2003 (ABNT, 2003). Segundo a norma DNER-ME 195/97 (DNER, 1997), o ensaio de absorção determina o aumento de massa do agregado em percentagem quando este está com seus poros preenchidos de água.

Os ensaios realizados nas amostras de agregado graúdo e miúdo, obtidas após a extração do ligante asfáltico apresentaram os resultados da Tabela 4.

Tabela 4 – Densidades

	Graúdo	Miúdo
Densidade aparente - G_{sb} (g/cm³)	2,79	
Densidade real - G_{sa} (g/cm³)	2,65	2,62
Absorção (%)	2,00	

Fonte: Próprio autor.

Ressalta-se que a capacidade de absorção dos agregados é de fundamental importância para as misturas asfálticas, porque quanto maior for a capacidade absorviva do agregado, maior a quantidade de ligante que pode ser absorvido, sendo determinante na definição do teor de ligante final da mistura.

3.1.2 Materiais Asfálticos

3.1.2.1 Agente Rejuvenecedor - REOB

O agente rejuvenecedor utilizado nesta pesquisa será o REOB fornecido pela Lwart Lubrificantes. A Figura 12 ilustra uma amostra de REOB incorporada à mistura.

Figura 12 – Amostra de REOB



Fonte: Próprio autor.

As especificações técnicas do REOB são mostradas na Tabela 5:

Tabela 5 – Especificações Técnicas do REOB.

Parâmetros	Unidade	Método	Especificação	Resultado
Aparência	-	Visual	-	Liq. Visc. Esc.
Densidade	g/cm ³	ASTM D1298	0,960 – 1,000	0,998
Grau API*	-	ASTM D1298	10 – 16	10,300
Viscosidade Dinâmica**				
a 50°C	Cp	Brookfield	-	26900
a 60°C	Cp	Brookfield	-	13550
a 100°C	Cp	Brookfield	-	1890
Teor de Água	%	Destilação	Ausente	Ausente

* Grau API – escala arbitrária que mede a densidade dos líquidos derivados de petróleo criada pelo *American Petroleum Institute* (API).

**Viscosidade Dinâmica (Brookfield) em líquidos - força necessária para vencer a resistência que a viscosidade de um material fluido oferece a um movimento rotacional com velocidade constante e uniforme.

Fonte: Fornecido pelo fabricante – NTA Asfaltos.

3.1.2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 50/70

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa é o Cimento Asfáltico de Petróleo Convencional 50/70. A Tabela 6 compara os valores da Especificação Técnica – Classificação por Penetração fornecida pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) com os fornecidos pelo fabricante.

Tabela 6 – Comparação dos valores de CAP fornecidos pelo Fabricante e pela Especificação Técnica

Características	Unidades	Limites	Dados do Fabricante
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	50-70	50-70
	°C	46	46
Viscosidade Saybolt Furol			
a 135°C, mín	s	141	141
a 150°C, mín	s	50	50
a 177°C	s	30-150	70
Viscosidade Brookfield			
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín	cP	274	272
a 150°C, SP 21, mín	cP	112	110
a 177°C, SP 21	cP	57-285	115
Índice de susceptibilidade térmica		(1,5) a (+0,7)	1,5
Ponto de fulgor mín	°C	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,4
Ductilidade a 25° C, mín	cm	20	20
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	7
Penetração retida, mín (3)	%	55	54

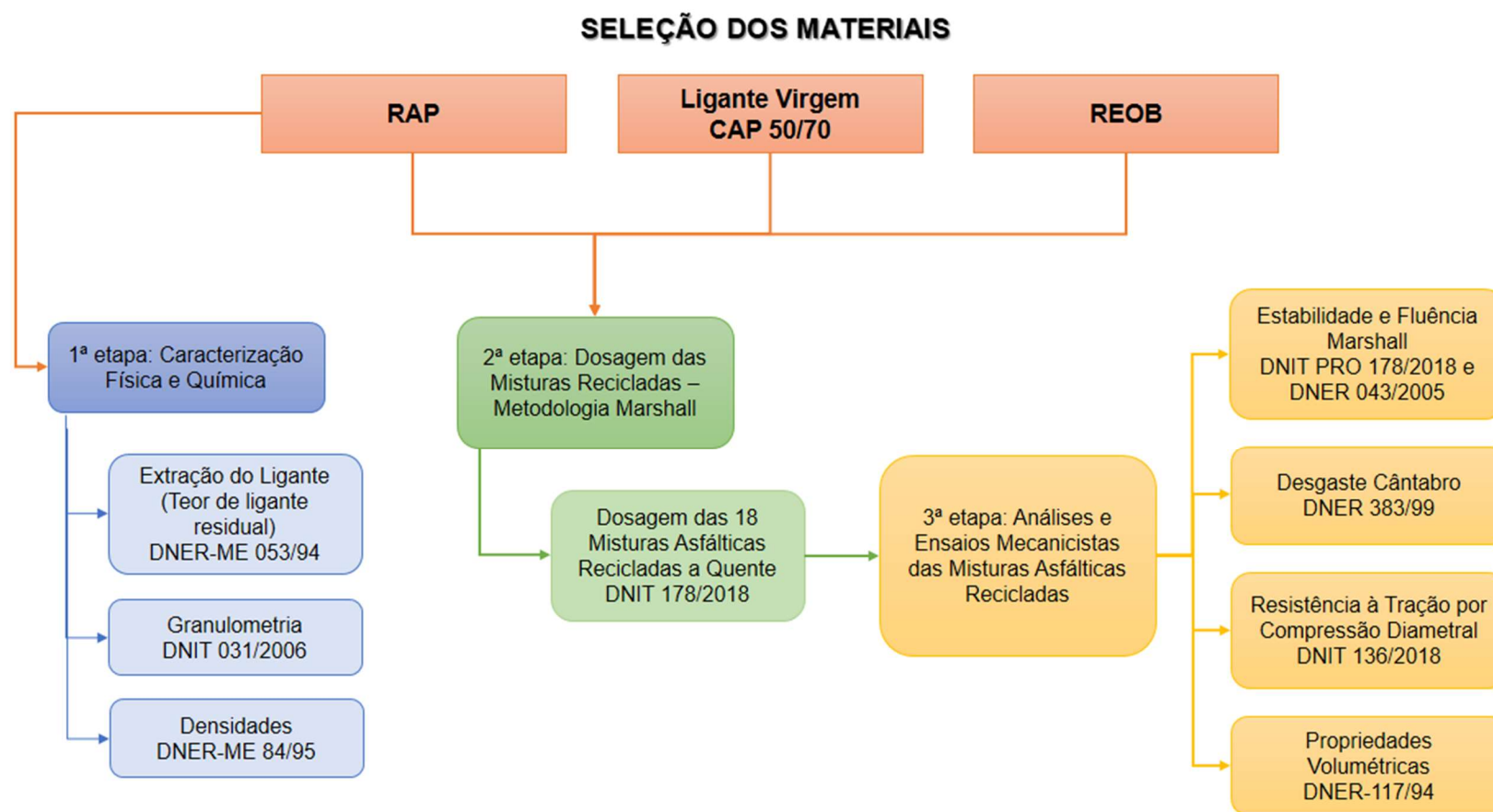
Fonte: DNIT (2006) e LWART (2020).

Com base nos dados fornecidos, o CAP atende aos requisitos baseados na Resolução nº 19 de 11 de julho de 2005 da ANP de acordo com o Regulamento Técnico ANP Nº 03/2005, publicado no Diário Oficial da União em 13/07/2005, se apresentando apto para utilização nas misturas asfálticas.

3.2 Métodos

O método desta pesquisa contempla 3 etapas, conforme ilustra o fluxograma da Figura 13, a seguir descritas:

Figura 13 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Próprio autor.

Na etapa 1 descrito no item 3.1 *Materiais*, contemplou toda a parte de caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa.

A etapa 2 consistiu-se na dosagem das misturas asfálticas recicladas a quente.

Enquanto, a etapa 3 compreendeu-se na avaliação do desempenho mecanicista com ensaios laboratoriais e análises volumétricas das misturas recicladas.

3.2.1 Dosagem das Misturas Asfálticas Recicladas a Quente

Como apresentado no fluxograma, após a caracterização do material fresado – 1ª etapa, deu-se início à 2ª etapa desta pesquisa com a moldagem dos corpos de prova utilizando o compactador Marshall – conforme norma DNIT 178/2018 – PRO – Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório *Superpave* ou o Marshall – Procedimento (DNIT, 2018a). Seguindo a norma, foram utilizados moldes de 100 mm para os Corpos de Prova (CP) com 1200,0g de peso e $(63,5 \pm 1,3)$ mm de altura.

São apresentados na Tabela 7 todas as Misturas Asfálticas Recicladas a Quente (MARQ) com suas respectivas percentagem dos teores de REOB e CAP virgem 50/70 adicionados, bem como o teor de ligante total das misturas. Assim como os seguintes parâmetros volumétricos obtidos para as misturas asfálticas compactadas: massa específica aparente da mistura asfáltica compactada (G_{mb}), massa específica máxima (G_{mm}), Volume de vazios (V_v), Volume de Cheios de Betume (VCB), Volume de Agregado Mineral (VAM) e a Relação Betume-Vazios (RBV).

As propriedades volumétricas da mistura asfáltica são determinadas segundo os procedimentos da norma DNER-117/94, obtidas após a confecção dos corpos de prova. Dois parâmetros muito importantes são os vazios na mistura total ou vazios de ar na mistura asfáltica compactada (no Brasil comumente chamado simplesmente de volume de vazios ou V_v) e o volume de vazios nos agregados minerais (VAM), que representa o que não é agregado numa mistura, ou seja,

vazios com ar e asfalto efetivo (descontado o asfalto que foi absorvido pelo agregado). A Figura 14 ilustra esses parâmetros (BERNUCCI *et al.*, 2010).

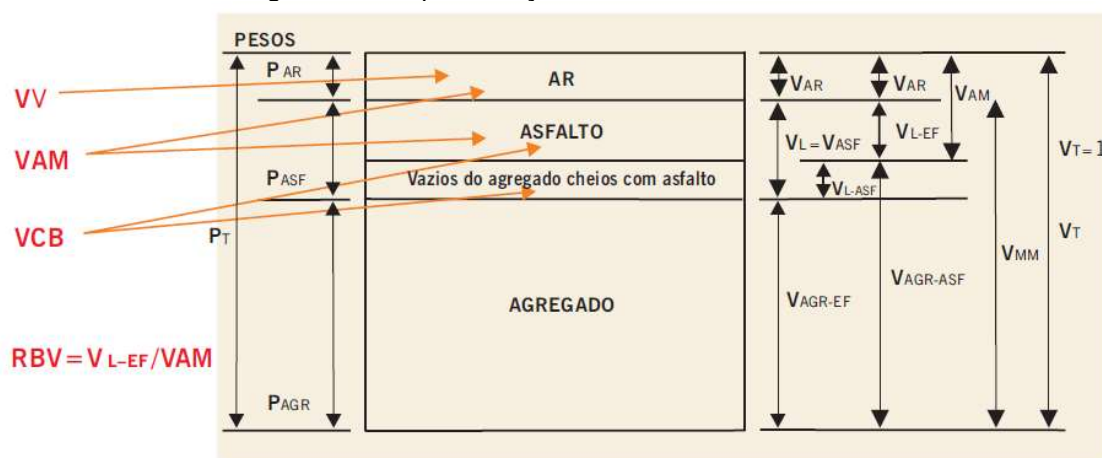
Tabela 7 – Propriedades volumétricas das misturas asfálticas recicladas

Mistura Asfáltica	Teor de REOB (%)	Teor de CAP virgem (%)	Teor de CAP Total (%)	Gmb (g/cm³)	Gmm (g/cm³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
M1	0,0	0,0	4,9	2,32	2,49	6,7	11,1	17,8	62,5
M2	0,0	0,5	5,4	2,36	2,48	4,9	12,4	17,3	71,9
M3	0,0	1,0	5,9	2,37	2,49	5,1	13,6	18,7	72,9
M4	0,25	0,0	4,9	2,31	2,47	6,5	11,0	17,5	63,0
M5	0,25	0,5	5,4	2,36	2,48	4,8	12,4	17,3	72,0
M6	0,25	1,0	5,9	2,38	2,49	4,7	13,7	18,3	74,6
M7	0,5	0,0	4,9	2,34	2,46	4,9	11,2	16,1	69,5
M8	0,5	0,5	5,4	2,37	2,48	4,5	12,5	17,0	73,6
M9	0,5	1,0	5,9	2,39	2,49	4,3	13,7	18,1	76,0
M10	1,0	0,0	4,9	2,38	2,50	4,6	11,4	16,0	71,4
M11	1,0	0,5	5,4	2,38	2,50	4,5	12,6	17,1	73,4
M12	1,0	1,0	5,9	2,41	2,49	3,0	13,9	16,9	82,3
M13	2,0	0,0	4,9	2,39	2,51	4,9	11,4	16,3	70,1
M14	2,0	0,5	5,4	2,40	2,52	4,5	12,7	17,1	74,0
M15	2,0	1,0	5,9	2,41	2,51	3,9	13,9	17,7	78,2
M16	3,0	0,0	4,9	2,37	2,48	4,4	11,3	15,7	72,0
M17	3,0	0,5	5,4	2,38	2,49	4,4	12,5	16,9	74,0
M18	3,0	1,0	5,9	2,40	2,48	3,2	13,8	17,0	81,3

Gmm: Densidade máxima da mistura não compactada; Gmb: Densidade específica aparente da mistura; Vv (%): Percentagem de volume de vazios da mistura; VCB (%): Vazios cheios de Betume; VAM (%): Vazios do agregado mineral; RBV (%): Relação Betume/Vazios.

Fonte: Próprio autor.

Figura 14 – Representação da Volumetria na amostra



Fonte: Bernucci *et al.* (2009).

O Volume de Vazios (V_v) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico; sempre são necessários vazios de ar dentro da mistura compactada para permitir a expansão térmica dos ligantes e suportar a leve compactação causada pelo tráfego. Volumes de vazios muito baixos (menores que 3%) comprometem o desempenho das misturas quanto ao ATR (Afundamento em Trilha de Rodas). Volumes de vazios muito altos (maiores que 8%) comprometem a durabilidade (SPECHT, 2004b). A norma DNIT 031/2006 - ES estabelece valores de V_v de 3% a 5% para camadas de rolamento (Faixa C) e de 4% a 6% para camadas de ligação (Binder, Faixa B).

Foram avaliadas MARQ (enquadradas na faixa C para CA do DNIT), todas com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5 mm. A mistura foi aquecida até se obter uma homogeneidade e em torno de 160°C e despejadas em moldes previamente aquecidos. A temperatura de compactação das misturas asfálticas foi de 155°C. Na sequência, o molde foi fixado ao compactador Marshall sendo iniciado o processo de compactação com 75 golpes por face, conforme estabelece a norma 43/1995 - Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall - Método de Ensaio (DNER, 1995b).

Estas temperaturas foram obtidas através da curva de viscosidade versus temperatura do CAP puro. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (Segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Para cada dosagem foram produzidos 10 corpos de prova, totalizando 180 CP's ao todo para os ensaios da Etapa 3:

- 3 CP's para ensaio de estabilidade e fluência Marshall; e
- 3 CP's para ensaio de desgaste cântabro; e
- 4 CP's para ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

3.2.2 Caracterização Mecânica das MARQ

A etapa 3 consistiu na avaliação do desempenho das misturas asfálticas por meio de ensaios mecânicos em laboratório. Os ensaios, realizados com o intuito de avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas dosadas em laboratório, para a presente pesquisa, foram de Estabilidade e Fluência Marshall, Desgaste Cântabro e Resistência à Tração por Compressão Diametral, descritas a seguir.

3.2.2.1 Estabilidade e fluência Marshall

O primeiro ensaio para avaliação foi o de estabilidade e fluência Marshall realizado no Laboratório de Tecnologia dos Pavimentos e Ferrovias localizado no DET do CEFET-MG – Campus I. Foram confeccionados 3 CP's para cada dosagem e submetidos a este ensaio, conforme procedimentos das normas DNIT PRO 178/2018 e DNER 043/2005 que estabelecem os procedimentos para este ensaio.

A Estabilidade Marshall é definida como a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo CP, quando moldado e ensaiado de acordo com o processo estabelecido neste método, sendo expressa em N (ou em kgf).

Fluência Marshall é definida como a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação de carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em milímetros (ou em equivalentes em centésimos de polegada).

É um ensaio utilizado para análise da MARQ para uso em pavimentação realizado em uma Prensa Marshall, conforme regulamentação da norma DNER-ME 043/95. Com este experimento é possível ser interpretada a flexibilidade da amostra, por essa razão um baixo valor indica uma mistura seca e quebradiça e valor alto como um material macio e plástico. Com relação à estabilidade estrutural de uma mistura asfáltica, essa pode ser estudada a partir desse ensaio

utilizando um método capaz de avaliar como ela se deforma ou flui ao longo do tempo em que dado carregamento é aplicado (COELHO, 1996).

Com o ensaio o valor da fluência é obtido simultaneamente ao da estabilidade. Durante a aplicação da carga, a luva-guia do medidor de fluência será firmada, com a mão, contra o topo do segmento superior do molde de compressão, diretamente sobre um dos pinos-guia. A pressão da mão sobre a luva do medidor de fluência deve ser relaxada, no momento em que se der o rompimento do CP, ocasião em que será lido e anotado o valor da fluência.

3.2.2.2 Desgaste Cântabro

O segundo ensaio realizado foi o de avaliação de desgaste cântabro, utilizado para análise da perda de massa. O ensaio de Desgaste à Abrasão – Los Angeles é um ensaio que simula o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito do pneu, ao qual Bernucci *et al.* (2010) explicam que justamente por ser a desagregação dos revestimentos asfálticos um dos principais precursores das formações dos buracos e panelas devido à esse arrancamento progressivo dos agregados.

Este experimento consiste em determinar a resistência à desagregação do pavimento baseado na análise das massas submetidas ao aparelho de Abrasão Los Angeles. Para o procedimento a norma brasileira DNER - ME 383/99 - Desgaste de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cântabro especifica a metodologia de ensaio ao qual foi utilizada nesta pesquisa.

Este ensaio consistiu na análise de 3 CP's de cada mistura submetidas ao aparelho de abrasão Los Angeles, sem esferas metálicas, à 300 revoluções. Apesar de sua concepção estar relacionada para pavimentos drenantes, o ensaio pode ser estendido para outros tipos de misturas asfálticas, normatizados através da norma DNER-ME 383/99-Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cântabro e a ABNT NBR 15140/2004 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas - Ensaio Cântabro. O desgaste máximo admitido é de 20% para misturas asfálticas.

O desgaste cântabro é obtido conforme formulação da Equação 2:

$$D = \frac{P-P'}{P} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

D= valor do desgaste em %;

P= massa do CP antes do ensaio;

P'= massa do CP depois do ensaio.

Em misturas asfálticas, a perda de adesão entre agregado e ligante está comumente relacionada a três fatores: a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso, a ocorrência de umidade e a presença de sujeira e finos na superfície do agregado. Essa perda de adesão do ligante asfáltico com a superfície do agregado (fratura adesiva) bem como a fratura do próprio filme de ligante (fratura coesiva), quer seja na presença de água ou não, é a origem de muitos tipos de defeitos em pavimentos, incluindo trincamento por fadiga, deformação permanente e dano por umidade (LYTTON, 2004).

3.2.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

O último ensaio realizado na 3ª etapa foi o de resistência à tração (RT) por compressão diametral no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais pertencente ao eixo de Geotecnia de vias de transporte do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) do CEFET-MG – Campus I.

O ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da RT foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro, inicialmente para ser usado em amostras de concreto de cimento Portland, porém, desde a década de 1970, o mesmo vem sendo usado em misturas asfálticas. Este ensaio tem como objetivo avaliar a qualidade da mistura através da resistência à tração (RT) indireta de corpo de prova cilíndrico de mistura asfáltica a quente moldados a partir da metodologia Marshall. Na literatura internacional, este ensaio é denominado *Indirect Tensile* (IDT). Ocorre por meio do ensaio de compressão

diametral com carregamento estático crescente até a ruptura, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma DNIT 136/2018 – ME “Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio” (DNIT, 2018b).

O ensaio se baseia na norma do DNIT 136/2018 – ME, que estabelece a aplicação de uma carga através de frisos metálicos de 12,7 mm progressivamente, em prensa com velocidade do êmbolo de $(0,8 \pm 0,1)$ mm/s até a ruptura do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical, havendo a separação em duas metades do corpo de prova. Os corpos de prova foram mantidos e ensaiados à temperatura de 25°C.

Como já mencionado, foram confeccionados 4 CP's para cada dosagem e submetidos a este ensaio. Após serem desmoldados, foram efetuadas quatro medições no corpo de prova com auxílio do paquímetro em posições equidistantes para a determinação do seu diâmetro e altura média. Com o valor obtido da carga de ruptura no microcomputador foi possível calcular a resistência a tração pela Equação 3:

$$\delta R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (3)$$

Onde:

δR = resistência a tração, em MPa;

F = carga de ruptura, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = altura do corpo de prova, em cm.

Ainda segundo a norma, a resistência à tração por compressão diametral da amostra da mistura asfáltica de corpos de prova moldados em laboratório nas mesmas condições é a média aritmética dos valores obtidos dos corpos de prova, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de $\pm 10\%$. A norma DNIT 031/2006 - ES estabelece o valor mínimo de RT em 0,65 MPa à 25°C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova moldados pela Metodologia Marshall para avaliação do comportamento das misturas asfálticas recicladas a quente. Cada vez mais esta metodologia vem sendo substituída ou complementada com outros ensaios, entretanto devido à grande experiência acumulada e a não disponibilidade de equipamentos para a dosagem, seguindo técnicas mais modernas, no Brasil, ainda é prática sua utilização.

4.1 Estabilidade e Fluência

Os resultados dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall para cada mistura asfáltica estudada são apresentados nas tabelas 8 a 13. Os valores indicam a média obtida entre os CP's ensaiados e cada tabela se difere na variação do percentual de REOB (0,00%; 0,25%; 0,50%; 1,00%; 2,00% e 3,00%), sendo as misturas de cada tabela agrupadas pela variação do CAP (0,00%; 0,50% e 1,00%). A norma estabelece uma estabilidade mínima de 500 kgf e fluência no intervalo de 2,0 a 4,5 milímetros.

A Tabela 8 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M1, M2 e M3 contendo 0,00% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 8 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 1 a 3 (0,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
1	0,00% CAP	4,9	3.207,40	144,99	5,33	0,47
2	0,50% CAP	5,4	2.964,86	118,79	6,67	0,47
3	1,00% CAP	5,9	2.966,14	36,06	7,00	0,82

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 9 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M4, M5 e M6 contendo 0,25% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 9 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 4 a 6 (0,25% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
4	0,00% CAP	4,9	2.477,67	292,60	5,67	0,47
5	0,50% CAP	5,4	2.034,16	50,81	6,33	0,47
6	1,00% CAP	5,9	1.851,92	107,76	7,33	0,47

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 10 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M7, M8 e M9 contendo 0,50% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 10 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 7 a 9 (0,50% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
7	0,00% CAP	4,9	2.445,16	100,78	5,00	-
8	0,50% CAP	5,4	2.367,10	25,70	5,33	0,47
9	1,00% CAP	5,9	1.784,23	23,60	7,33	0,47

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 11 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M10, M11 e M12 contendo 1,00% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 11 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 10 a 12 (1,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
10	0,00% CAP	4,9	1.919,37	278,67	5,33	1,25
11	0,50% CAP	5,4	1.776,62	118,63	6,67	0,94
12	1,00% CAP	5,9	1.871,09	192,31	8,00	1,41

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 12 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M13, M14 e M15 contendo 2,00% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 12 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 13 a 15 (2,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
13	0,00% CAP	4,9	1.659,14	241,99	6,00	-
14	0,50% CAP	5,4	1.152,57	90,55	6,67	0,47
15	1,00% CAP	5,9	880,90	200,01	9,00	1,41

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 13 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M16, M17 e M18 contendo 3,00% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

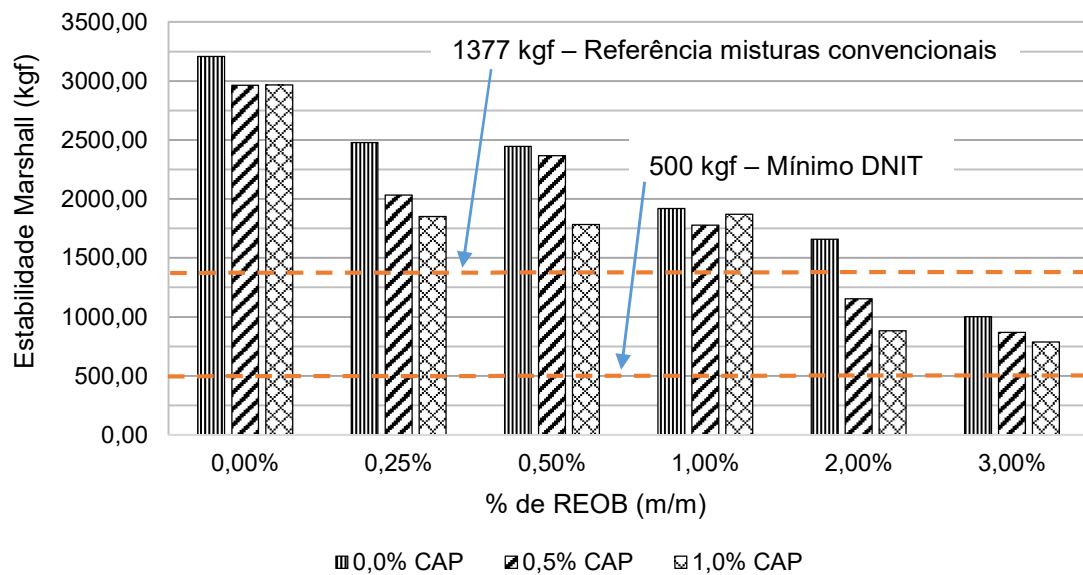
Tabela 13 – Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas 16 a 18 (3,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
16	0,00% CAP	4,9	1.002,71	110,15	9,33	1,25
17	0,50% CAP	5,4	868,48	75,22	9,33	0,47
18	1,00% CAP	5,9	788,13	131,14	10,67	0,94

Fonte: Próprio autor.

A Figura 15 apresenta os resultados para o ensaio de estabilidade Marshall com todas as misturas agrupadas. Observa-se que todas as misturas atenderam satisfatoriamente ao mínimo preconizado na normativa vigente, superior ao limite de 500 kgf estipulados pela norma DNIT 031/2006 - ES. Quanto à adição do REOB, de modo geral, observa-se que misturas contendo maiores quantidades desse AR acarreta em uma redução na Estabilidade. Quanto ao CAP 50/70, os resultados também apontaram redução na Estabilidade a medida em que se aumentou a dosagem desse componente. Domingues e Balbo (2006) também observaram a diminuição dos parâmetros mecânicos das misturas estudadas com a adição de AR.

Figura 15 – Estabilidade Marshall das Misturas Asfálticas Recicladas a Quente versus REOB – M1 a M18.

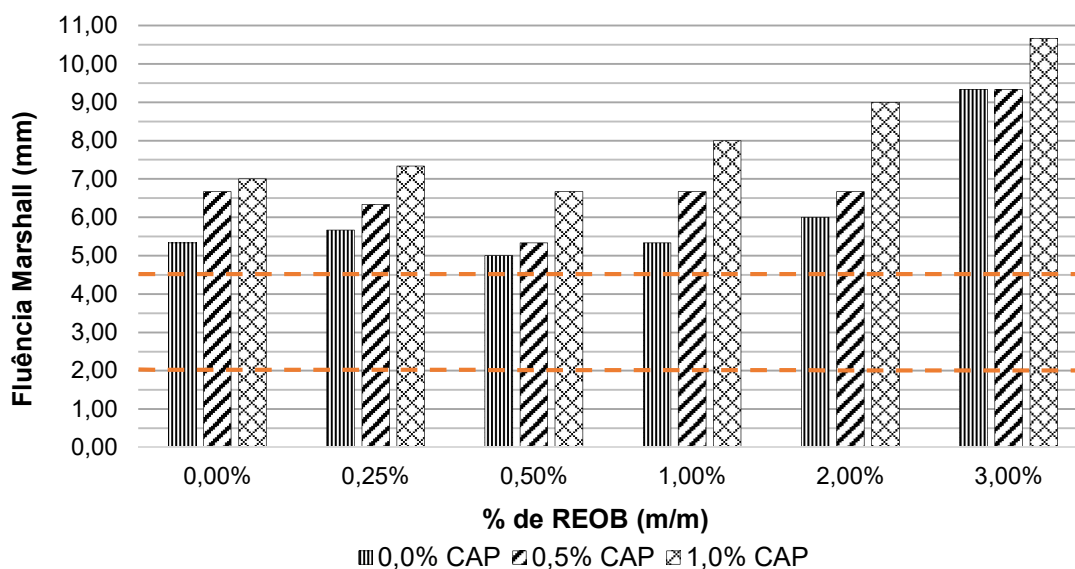


Cerdeira (2018) também realizou ensaios com misturas contendo 100% RAP e teor de 0,50% de REOB, também variando o percentual de CAP 50/70 em 0,00%, 0,50% e 1,00%. A autora encontrou resultados bem semelhantes aos obtidos nesta pesquisa: 2.229,71 kgf; 2207,00 kgf e 1391,94 kgf, respectivamente. Também evidenciando a redução da Estabilidade com o incremento do CAP 50/70.

Fonseca (2018) com dosagens 5% de REOB e 10% de REOB, encontrou 1943 e 1722 kgf, com um teor de ligante total equivalente a 7,5%. Logo, observa-se que o CAP presente na mistura teve alto impacto na estabilidade

A Figura 16 apresenta os resultados para o ensaio de fluência Marshall com todas as misturas agrupadas.

Figura 16 – Fluência das Misturas Asfálticas Recicladas versus REOB – M1 a M18.



Nenhuma das misturas atendeu ao intervalo para Fluência Marshall estabelecido pela NORMA DNER-ES 313/97, é de 2,0 a 4,5 mm, ficando todos superiores ao limite máximo. O ensaio de fluência Marshall é interpretada como a medida da flexibilidade da mistura, por essa razão um baixo valor indica uma mistura seca e quebradiça e valor alto como um material macio e plástico.

Observou-se que misturas contendo 0,00% de CAP foram as que apresentaram menores valores de fluência, enquanto as misturas com 1,00% de CAP tiveram fluência bem superiores.

A mistura 7, contendo 0,50% de REOB e 0,00% de CAP foi a que apresentou o menor valor de fluência (5,00 mm). Cerdeira (2018) com esta mesma dosagem, encontrou 4,67 mm de fluência, também superior ao limite máximo preconizado.

Bernucci *et al.* (2002) compararam o comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes asfálticos convencionais e modificados por borracha e polímeros, e chegaram às conclusões que misturas produzidas com asfalto-borracha apresentaram grande estabilidade estrutural, alta flexibilidade e menor rigidez nas condições de serviço; e misturas com ligante asfáltico modificado com SBS e SBR apresentaram maior flexibilidade e um maior retorno elástico,

culminando num aumento da vida de fadiga e numa redução importante na deformação permanente.

Moura (2010) avaliando misturas com asfaltos convencionais e modificados concluiu que o uso de asfalto convencional mais consistente ou a modificação com polímero ou borracha, contribuiu significativamente para a redução da deformação permanente causada pela fluência do material. Cerdeira (2018) avaliando a adição de pó de borracha, observou que o seu incremento reduz a fluência, sendo assim um possível aditivo para redução desse valor.

ZAUMANIS *et al.* (2013) avaliaram a eficácia de rejuvenescedores para produção de misturas 100% RAP. Nove diferentes AR's foram testados, incluindo REOB, com um teor de 18%. As misturas usando REOB também mostraram aumento na fluência, quando comparado à mistura RAP de referência.

A Figura 17 mostra os CP's das misturas M1 com 0,00% REOB e 0,00% CAP; M11 contendo 1,00% REOB e 0,50% CAP e M18 com 3,00% REOB e 1,00% CAP após serem ensaiados.

Figura 17 – CP's após ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall - Misturas M1, M11 e M18.



Fonte: Próprio autor.

Pela figura 17, observa-se as deformações laterais dos corpos de prova após serem ensaiados.

4.2 Desgaste Cântabro

A avaliação de desgaste, propriedades de adesão e coesão das misturas asfálticas recicladas são parâmetros para avaliar a desagregação dos revestimentos asfálticos, sendo um dos principais precursores das formações dos buracos e placas pelo arrancamento progressivo dos agregados.

Os resultados das médias obtidas no ensaio de desgaste cântabro para cada mistura asfáltica estudada são apresentados nas tabelas 14 a 19, agrupadas conforme ensaio anterior.

A Tabela 14 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M1, M2 e M3 contendo 0,00% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 14 – Desgaste Cântabro - Misturas 1 a 3 (0,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Desgaste Cântabro (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
1	0,00% CAP	4,9	34,94	4,88	0,14	20
2	0,50% CAP	5,4	27,12	3,05	0,11	
3	1,00% CAP	5,9	30,04	0,91	0,03	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 15 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M4, M5 e M6 contendo 0,25% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 15 – Desgaste Cântabro - Misturas 4 a 6 (0,25% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Desgaste Cântabro (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
4	0,00% CAP	4,9	29,40	6,51	0,22	20
5	0,50% CAP	5,4	21,71	2,12	0,10	
6	1,00% CAP	5,9	14,57	3,53	0,24	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 16 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M7, M8 e M9 contendo 0,50% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 16 – Desgaste Cântabro - Misturas 7 a 9 (0,50% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Desgaste Cântabro (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
7	0,00% CAP	4,9	18,42	5,04	0,27	20
8	0,50% CAP	5,4	15,83	2,38	0,15	
9	1,00% CAP	5,9	10,77	2,65	0,25	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 17 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M10, M11 e M12 contendo 1,00% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 17 – Desgaste Cântabro - Misturas 10 a 12 (1,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Desgaste Cântabro (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
10	0,00% CAP	4,9	15,94	0,42	0,03	20
11	0,50% CAP	5,4	13,68	0,24	0,02	
12	1,00% CAP	5,9	10,73	0,54	0,05	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 18 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M13, M14 e M15 contendo 2,00% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 18 – Desgaste Cântabro - Misturas 13 a 15 (2,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Desgaste Cântabro (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
13	0,00% CAP	4,9	11,68	1,05	0,09	20
14	0,50% CAP	5,4	8,60	0,73	0,09	
15	1,00% CAP	5,9	4,89	0,48	0,10	

Fonte: Próprio autor.

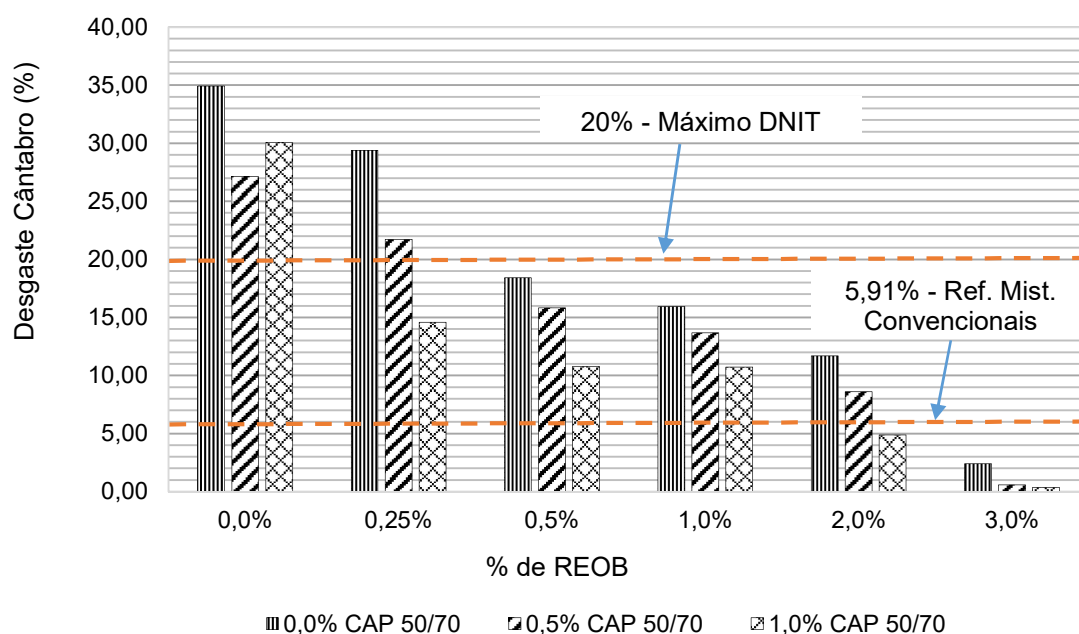
A Tabela 19 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M16, M17 e M18 contendo 3,00% de REOB, variando em 0,00%; 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 19 – Desgaste Cântabro - Misturas 16 a 18 (3,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Desgaste Cântabro (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
16	0,00% CAP	4,9	2,41	0,14	0,06	20
17	0,50% CAP	5,4	0,59	0,14	0,23	
18	1,00% CAP	5,9	0,37	0,10	0,28	

Fonte: Próprio autor.

Figura 18 – Gráfico comparativo de Desgaste Cântabro versus REOB – M1 a M18.



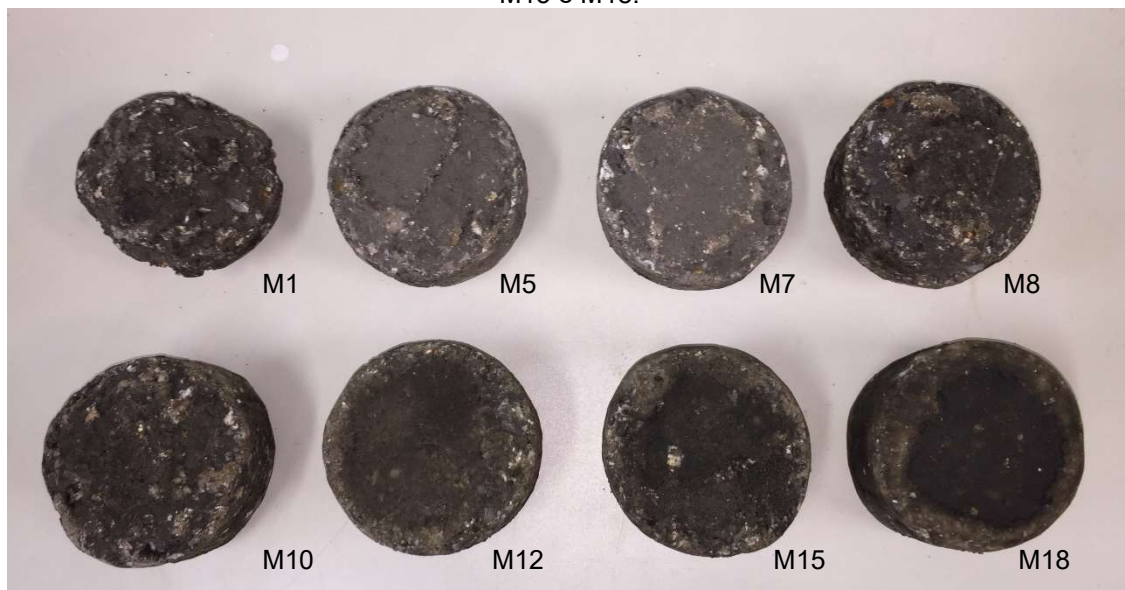
Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 18, observa-se que as Misturas de 1 a 5 apresentaram desgaste superior ao limite que é de 20%. Observa-se uma relação direta no desgaste comparando ao percentual de REOB e também ao percentual de CAP 50/70. À medida que em que se aumenta o percentual de REOB e CAP 50/70, o desgaste diminui. Isto está diretamente relacionado à variação de ligantes e ao ganho de coesão da mistura. De um lado misturas com baixo percentual de REOB e CAP apresentam alta estabilidade, porém, também alto poder de desagregação.

Cerdeira (2018) com dosagens de 0,50% REOB, variando o CAP 50/70 em 0,00%; 0,50% e 1,00%, encontrou menores valores de desgaste comparados a esta pesquisa, 8,81%; 4,72% e 2,52%. Mas também, observa-se a relação direta do CAP 50/70, que as misturas com maior adição de CAP apresentaram respectiva redução de perda de massa. Rocha Segundo *et al.* (2015) avaliou 3 misturas (I, II e III) contendo 100% RAP, 75% RAP e 25% RAP, utilizando somente adição de CAP virgem, sem agente rejuvenescedor. Os autores encontraram valores para desgaste cântabro de 11, 10 e 10%, respectivamente. A mistura I contendo 100% Fresado com 5,20% de ligante total se aproxima das misturas M9 e M12 com 0,50% e 1,00% de REOB, com 5,9% de ligante total.

A Figura 19 mostra os CP's das misturas 1, 5, 7, 8, 10, 12, 15 e 18 após serem ensaiados. Observa-se o alto grau de desgaste da Mistura 1 e a redução no desgaste com a adição dos materiais asfálticos.

Figura 19 – CP's após ensaio de Desgaste Cântabro - Misturas M1, M5, M7, M8, M10, M12, M15 e M18.



Fonte: Próprio autor.

Pela imagem observa-se como a M1 sem a adição de REOB e CAP sofreu bastante desgaste com o desprendimento dos agregados no CP. Esse processo de desagregação foi sendo superado com adição dos materiais asfálticos nas misturas sucessivas, até a M18. Esta última, sofreu mais deformação, do que a própria desagregação dos agregados.

4.3 Resistência a Tração por Compressão Diametral

Os resultados da Resistência à Tração (RT) por compressão diametral para cada mistura asfáltica reciclada estudada são apresentados nas tabelas 20 a 24, também agrupadas conforme os ensaios anteriores. Foi retirado nesta seção de ensaios a porcentagem de 3,00% de REOB, por apresentar uma fluência muito elevada, o que implicaria em uma baixa resistência à tração por compressão diametral.

A Tabela 20 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M1, M2 e M3 com 0,00%, 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 20 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - M1 a M3 (0,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
1	0,00% CAP	4,9	2,27	0,36	0,65
2	0,50% CAP	5,4	2,70	0,36	
3	1,00% CAP	5,9	2,73	0,16	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 21 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M4, M5 e M6 contendo 0,25% de REOB, variando em 0,00%, 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 21 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - M4 a M6 (0,25% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
4	0,00% CAP	4,9	2,04	0,21	0,65
5	0,50% CAP	5,4	2,20	0,20	
6	1,00% CAP	5,9	2,38	0,07	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 22 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M7, M8 e M9 contendo 0,50% de REOB, variando em 0,00%, 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 22 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - M7 a M9 (0,50% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
7	0,00% CAP	4,9	1,98	0,08	0,65
8	0,50% CAP	5,4	1,95	0,31	
9	1,00% CAP	5,9	1,58	0,21	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 23 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M10, M11 e M12 contendo 1,00% de REOB, variando em 0,00%, 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 23 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - M10 a M12 (1,00% REOB).

	Mistura	Teor de ligante (%)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
10	0,00% CAP	4,9	1,54	0,01	0,65
11	0,50% CAP	5,4	1,51	0,03	
12	1,00% CAP	5,9	1,11	0,06	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 23 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M13, M14 e M15 contendo 2,00% de REOB, variando em 0,00%, 0,50% e 1,00% de CAP respectivamente.

Tabela 24 – Resistência à Tração por Compressão Diametral - Misturas 13 a 15 (2,00% REOB).

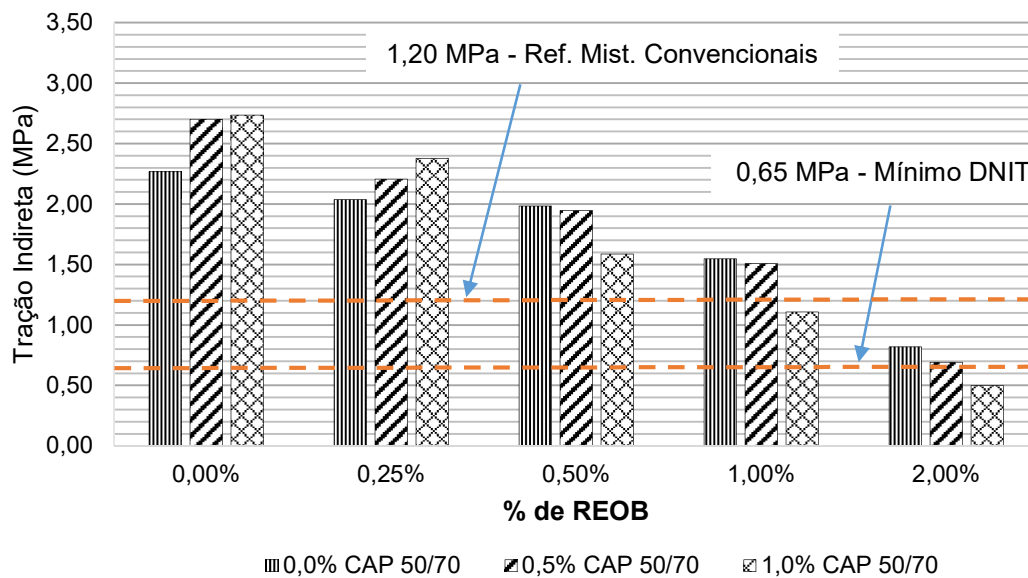
	Mistura	Teor de ligante (%)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
13	0,00% CAP	4,9	0,82	0,07	0,65
14	0,50% CAP	5,4	0,69	0,05	
15	1,00% CAP	5,9	0,50	0,03	

Fonte: Próprio autor.

A Figura 20, mostra todos os resultados obtidos para resistência à tração com a apresentação das cinco sequências de ensaios com suas respectivas adições de produtos, tendo como referência o percentual de REOB. A linha tracejada

indica a resistência mínima preconizada na normativa vigente do DNIT 031/2006 - ES para esse parâmetro, que é de 0,65 MPa à 25°C.

Figura 20 – Resistência a Tração por Compressão Diametral versus REOB – M1 a M15.



Fonte: Próprio autor.

Analisando as misturas sem acréscimo do REOB (M1, M2 e M3), o CAP tem o potencial de elevar a RT com sua adição. M4, M5 e M6, com 0,25% de REOB, ainda se percebe o potencial em aumentar a RT ao se adicionar o CAP virgem. Os resultados mostram que houve uma redução da resistência à medida em que há uma equivalência dos teores de REOB e CAP, apontando um efeito direto do REOB sobre a mistura a partir da 0,50% de REOB.

Desse modo, misturas sem adição de REOB apresentaram maior resistência à tração por compressão diametral e somente a Mistura 15, contendo 2,00% de REOB e 1,00% de CAP 50/70 não atendeu à regulamentação do DNIT, ficando abaixo de 0,65 MPa.

O valor de RT para misturas convencionais é de 1,20 MPa. Logo, das 15 misturas analisadas, 11 tiveram valores superiores à esse resultado de referência.

Lehnem (2015) em ensaio de caracterização mecânica de misturas asfálticas convencionais, utilizando o mesmo ligante CAP 50/70 e dentro da mesma faixa granulométrica “C” do DNIT, com metodologia Marshall para moldagem dos

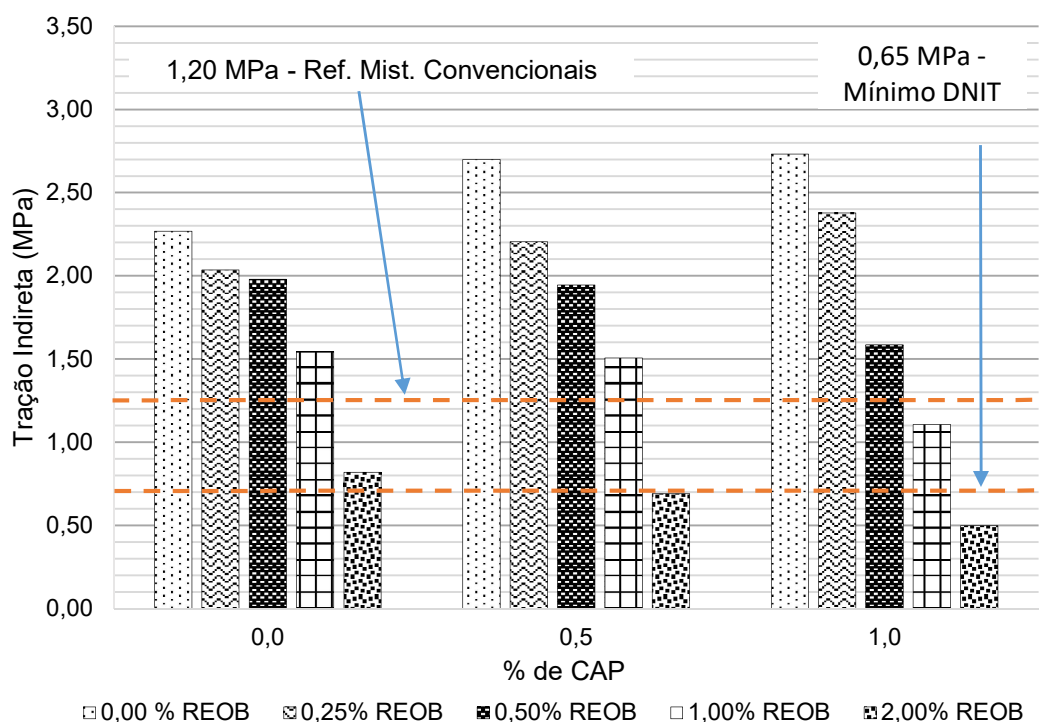
corpos de prova, temperatura de compactação e usinagem de 130°C e Vv de 4,13%, chegou a um resultado de resistência a tração de 1,50 MPa.

Zaumanis *et al.* (2013) avaliaram a eficácia de nove diferentes agentes rejuvenescedores para produção de misturas 100% RAP, incluindo REOB, com um teor de 18,00%. A resistência à tração por compressão diametral encontrada nesta dosagem foi de 1,97 MPa, equivalente à M6, contendo 0,50% de REOB. Os autores observaram que a mistura com adição de WEO/REOB apresentou resultado de resistência inferior comparado à referência (2,47 MPa).

Cerdeira (2018) utilizando 0,50% de REOB com as mesmas adições de CAP 50/70 (0,00%; 0,50% e 1,00%) encontrou resultado de 1,56MPa, 1,47MPa e 1,21MPa, respectivamente. Os valores são inferiores à atual pesquisa, 1,98MPa, 1,95MPa e 1,58MPa.

A Figura 21, mostra todos os resultados obtidos para resistência à tração versus CAP. Observa-se a interferência direta do CAP 50/70 na resistência das misturas, e também uma outra perspectiva da ação do REOB.

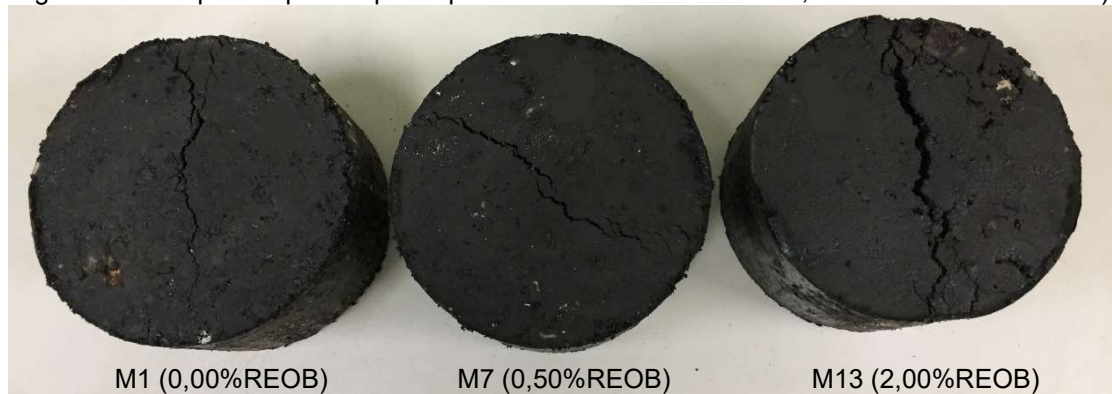
Figura 21 – Resistência a Tração por Compressão Diametral versus CAP 50/70 virgem – M1 a M15.



Fonte: Próprio autor.

As figuras 22, 23 e 24 a seguir, mostram os CP's após serem ensaiados.

Figura 22 – Corpos de prova após ruptura no ensaio - Misturas M1, M7 e M13 com 0% CAP).



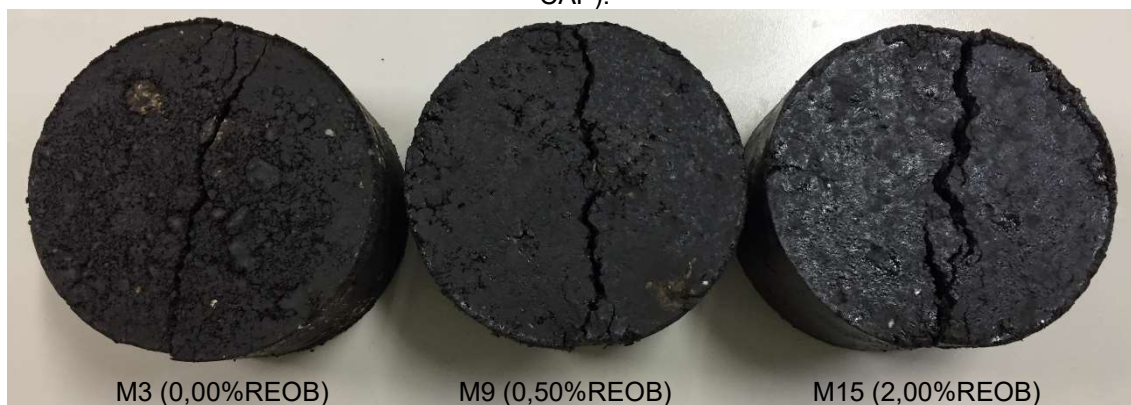
Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Corpos de prova após ruptura no ensaio (Misturas M2, M8 e M14 com 0,50% CAP).



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 – Corpos de prova após ruptura no ensaio (Misturas M3, M9 e M15 com 1,00% CAP).



Fonte: Próprio autor.

Através da análise da superfície de ruptura, constata-se o aumento das larguras/espessuras das fendas geradas com adição dos materiais asfálticos adicionados (REOB e CAP virgem) após a aplicação da carga.

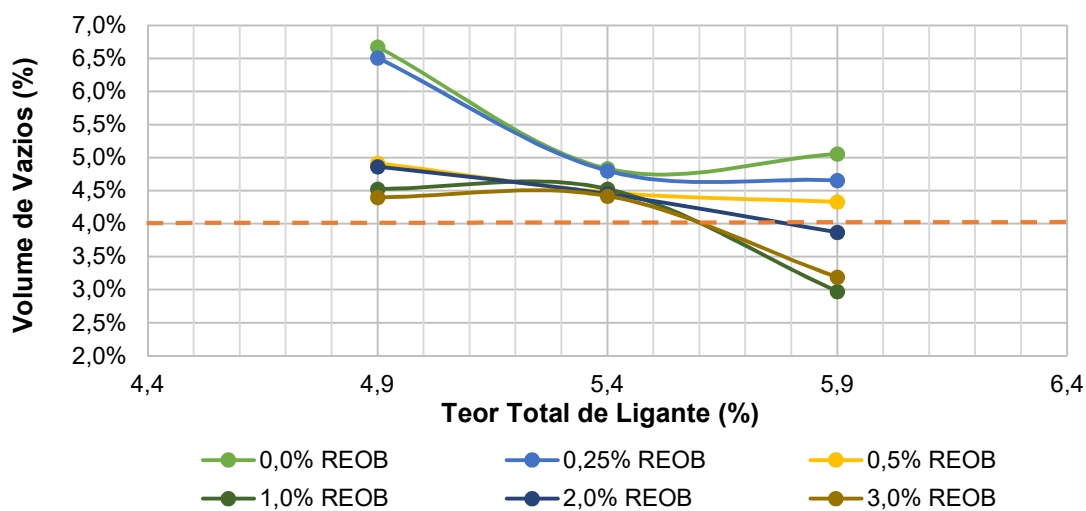
4.4 Critério de Escolha de Dosagem Ótima

Os resultados mecânicos dos ensaios realizados foram agrupados nos gráficos a seguir em função do Teor de Ligante Total da mistura (ligante envelhecido + ligante virgem). O percentual de Agente rejuvenescedor não é somado ao do Teor de Ligante Total da mistura.

Para início da definição do critério de dosagem, analisou-se o Volume de vazios (Vv) e Relação Betume-Vazios (RBV) são comumente os dois parâmetros determinantes na seleção do teor ótimo de ligante.

A Figura 25 apresenta o gráfico com os resultados dos volumes de vazios das 18 misturas em função do Teor Total de Ligante e a Figura 26 o da RBV.

Figura 25 – Resultados agrupados do Volume de Vazios (%) versus Teor Total de Ligante



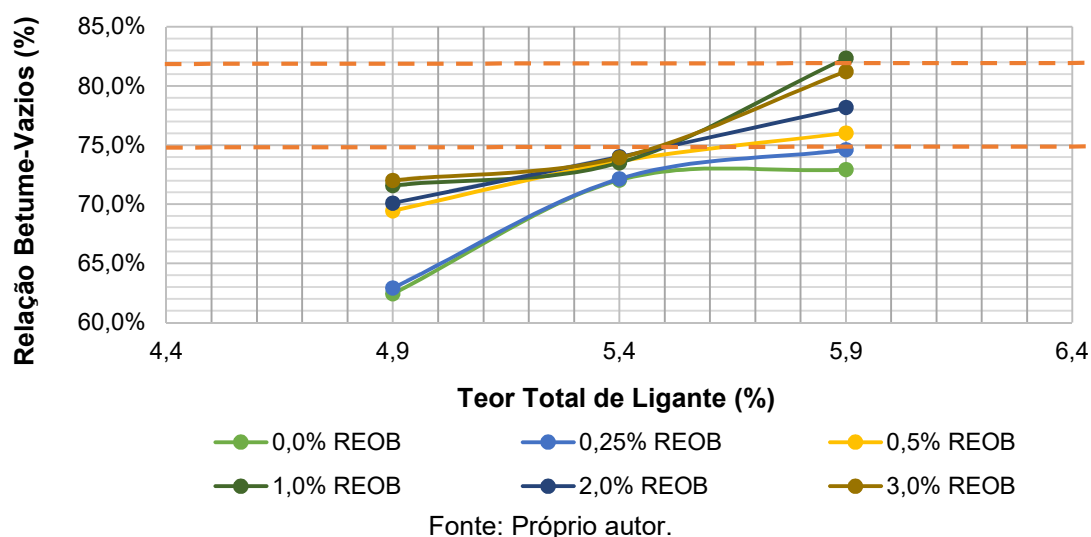
Fonte: Próprio autor.

Para determinar o teor ótimo de CAP baseou-se no volume de vazios de 4%, valor médio especificado pela norma do DNIT 031/2006 - ES Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço (DNIT, 2006) para Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), método recomendado por Napa (1982) e Roberts *et al.* (1996). Desse modo, a partir da Figura 25, as porcentagens de 1,00%, 2,00% e 3,00% de REOB são as misturas que

interceptam a linha de 4,0% de Volume de Vazios, com os respectivos teores de ligante total:

- 1,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: (acrécimo de 0,70% CAP 50/70).
- 2,00% de REOB e 5,80% do Total de Ligante: (acrécimo de 0,90% CAP 50/70).
- 3,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: (acrécimo de 0,70% CAP 50/70).

Figura 26 – Resultados agrupados da Relação Betume-Vazios versus Teor Total de Ligante

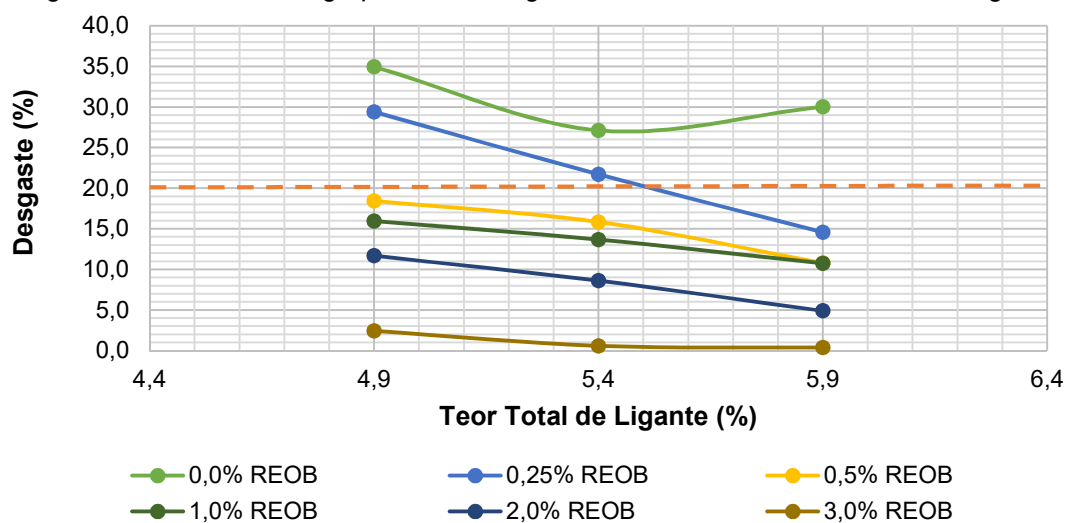


Para a RBV recomenda-se que as misturas atendam ao intervalo de 75% a 82% também para CBUQ. A Figura 26 apresenta os valores para RBV. As 3 dosagens que atenderam ao Vv, também atendem ao intervalo estabelecido para este ensaio:

- 1,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: RBV = 78%.
- 2,00% de REOB e 5,80% do Total de Ligante: RBV = 77%.
- 3,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: RBV = 77%.

Foram realizados ensaios de desgaste cântabro (Figura 27), estabilidade Marshall (Figura 28), fluência Marshall (Figura 29), e resistência à tração por compressão diametral (Figura 30).

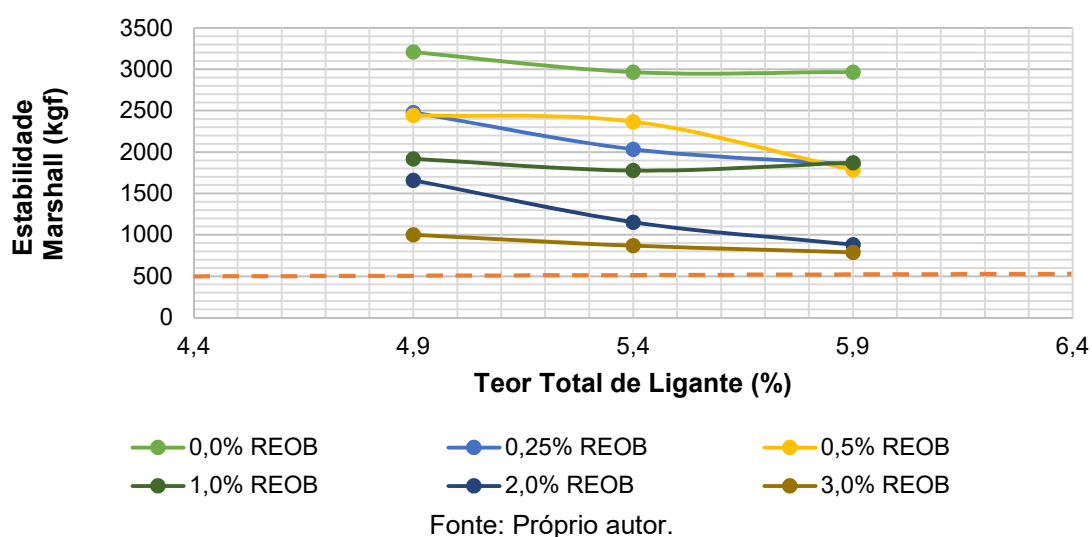
Figura 27 – Resultados agrupados do Desgaste Cântabro versus Teor Total de Ligante



Analisando-se o Desgaste Cântabro, as 3 dosagens também apresentam resultados inferiores ao desgaste máximo de 20,00%.

- 1,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: Desgaste = 12,50%.
- 2,00% de REOB e 5,80% do Total de Ligante: Desgaste = 5,50%.
- 3,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: Desgaste = 0,50%.

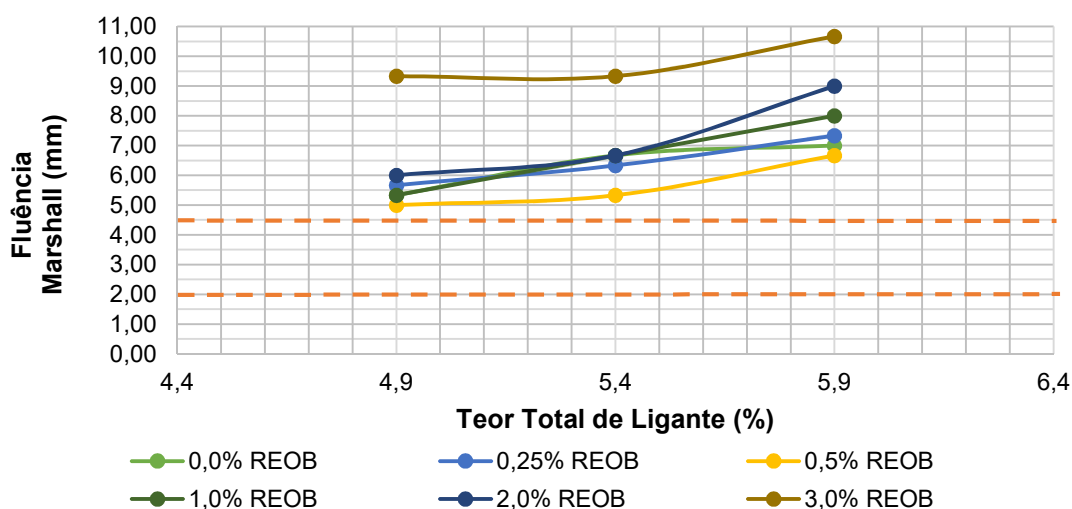
Figura 28 – Resultados agrupados da Estabilidade Marshall versus Teor Total de Ligante



Analisando-se a Estabilidade Marshall, todas as 3 dosagens, atenderam ao mínimo exigido pela norma de 500 kgf.

- 1,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: Estabilidade = 1800 kgf.
- 2,00% de REOB e 5,80% do Total de Ligante: Estabilidade = 920 kgf.
- 3,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: Estabilidade = 830 kgf.

Figura 29 – Resultados agrupados da Fluência Marshall versus Teor Total de Ligante

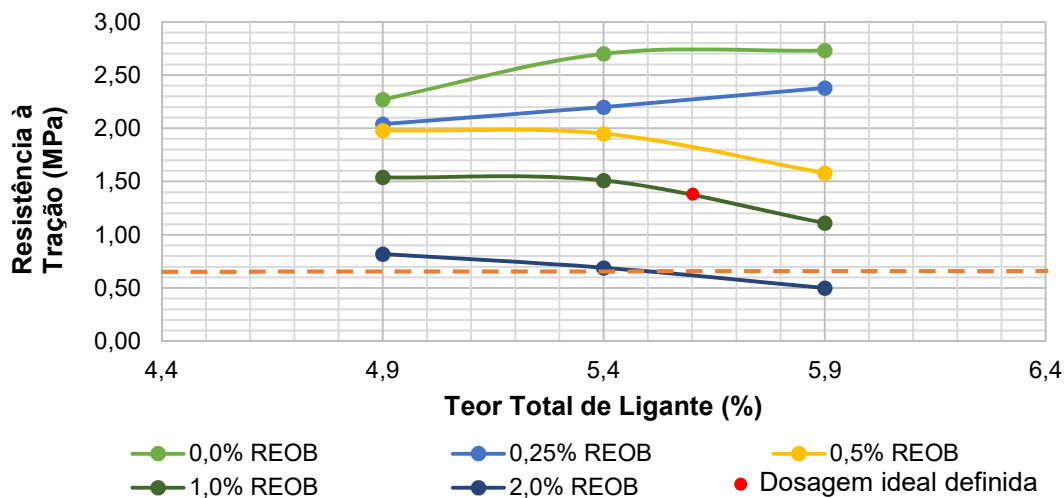


Analisando-se a Fluência Marshall, nenhuma das 3 dosagens, atenderam ao intervalo preconizado de 2,0 a 4,5 mm.

- 1,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: Fluência = 7,2 mm.
- 2,00% de REOB e 5,80% do Total de Ligante: Fluência = 8,5 mm.
- 3,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: Fluência = 9,8 mm.

Por apresentar uma fluência muito superior, foi retirado a dosagem com teor de 3,00% de REOB do próximo ensaio – Resistência à Tração por compressão diametral.

Figura 30 – Resultados agrupados da Resistência à tração por compressão diametral versus Teor Total de Ligante



Por fim, a última análise para definição do teor ideal foi da resistência à tração por compressão diametral para as misturas ensaiadas, com os resultados mostrados na Figura 30. Dentre aquelas que até atenderam aos parâmetros de dosagem anteriores, somente a dosagem com teor de 1,00% de REOB atendeu ao limite mínimo de 0,65 MPa.

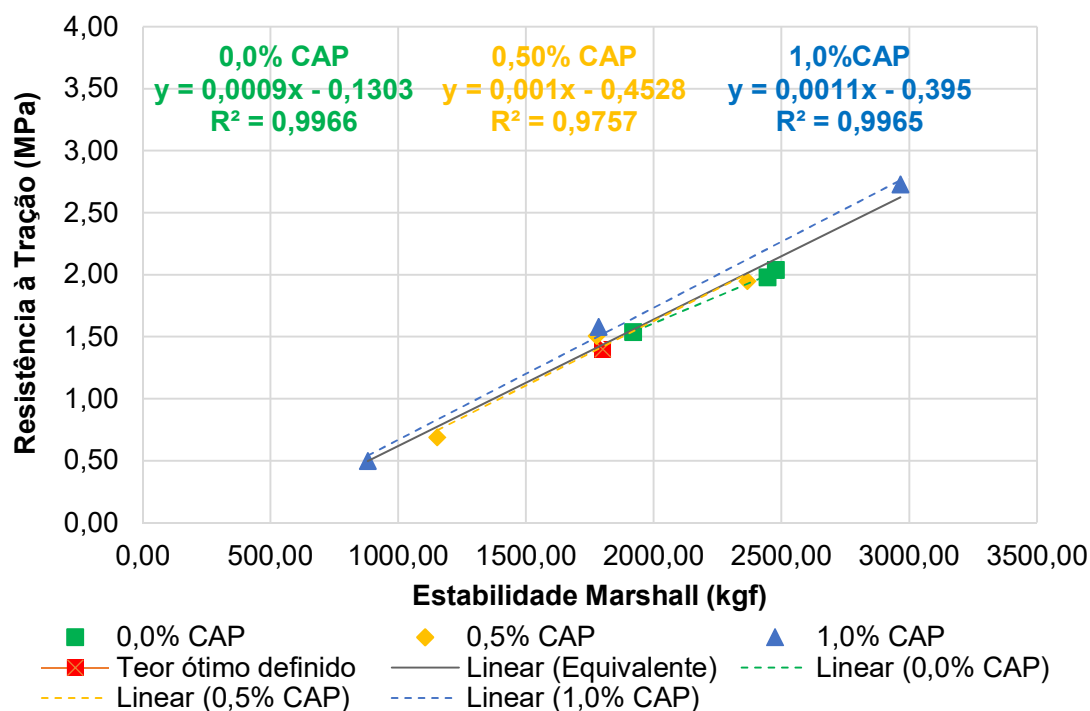
- 1,00% de REOB e 5,60% do Total de Ligante: Resistência à Tração por Compressão Diametral = 1,39 MPa.
- 2,00% de REOB e 5,80% do Total de Ligante: Resistência à Tração por Compressão Diametral = 0,53 MPa.

Assim, baseado em uma inferência estatística, análises gráficas e a partir de todas esses parâmetros mínimos e máximos dos ensaios definidos por norma, tem-se como teor ótimo definido o valor de 1,00% de REOB com acréscimo de 0,70% $\pm$ 0,1% de CAP 50/70, totalizando 5,60% $\pm$ 0,1% de ligante total na mistura asfáltica reciclada a quente contendo 100% RAP. Esse teor apresenta resultados satisfatórios para todos os ensaios, com exceção da fluência Marshall, que não atendeu ao intervalo preconizado pela norma.

5 CORRELAÇÃO DOS ENSAIOS

A Figura 31 apresenta uma análise da correlação dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos entre a Estabilidade Marshall e a Resistência à tração por compressão diametral.

Figura 31 – Relação Estabilidade Marshall versus Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Próprio autor.

Os resultados apontam que a incorporação de novo CAP junto com o REOB tendem a uma linearidade de desempenho das misturas, apresentando ótimos valores para R^2 . As dosagens com menores percentuais de REOB foram as que apresentaram simultaneamente maiores valores de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração por Compressão Diametral. Foi incorporado na análise da Figura 31, o valor obtido para o teor ótimo definido no tópico anterior - *4.4 Critério de Dosagem*. O teor ótimo definido está próximo da linha de tendência equivalente de todos os valores obtidos, sugerindo uma análise satisfatória. Pelo teor definido, foi encontrado uma estabilidade Marshall equivalente a 1800,00 kgf e resistência à tração por compressão diametral igual a 1,4 MPa.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou o comportamento laboratorial de misturas recicladas a quente contendo 100% RAP e REOB como agente rejuvenescedor. Ainda, avaliou-se o efeito da adição de CAP 50/70 virgem em diferentes dosagens de forma a definir um teor que se espera atender melhor desempenho em campo.

Os ensaios em laboratório foram realizados conforme metodologias nacionais adotadas para o modal rodoviário e regulamentadas pelos órgãos responsáveis. De modo geral, foi possível concluir que a reciclagem a quente de misturas asfálticas com 100% RAP é uma técnica viável e promissora, mas que cabe mais estudos e análises para que essa prática seja uma realidade constante no país, tanto para análise laboratorial dos materiais, quanto para aplicação em campo. Isso se dá principalmente pela limitação de usinas e tecnologias utilizadas no processo de produção de misturas recicladas. Assim, o aumento no teor de RAP se limita à capacidade dos equipamentos e do conhecimento prévio do material coletado.

Com base nos resultados experimentais e discussões apresentadas, os principais destaques deste trabalho podem ser resumidos da seguinte forma:

A) A adição do REOB e do CAP virgem ao RAP reciclado a quente apresentaram influência direta nos resultados dos ensaios mecânicos, conforme esperado. Isso ocorre devido à tendência das misturas asfálticas recicladas em apresentar alto grau de rigidez. As adições de produtos melhoradores como o agente rejuvenescedor e o ligante virgem diminuíram a Resistência à Tração nas misturas.

B) Todas as misturas atenderam ao valor mínimo exigido para Estabilidade Marshall de 500 kgf pela norma. A M1 que não teve adição de REOB e de CAP virgem 50/70 foi a mistura que atingiu maior valor enquanto que a M18, o menor. Observou-se que o aumento do teor de REOB acarretou na redução da Estabilidade Marshall. A dosagem ideal definida apresentou uma Estabilidade de 1800kgf, superior à mistura asfáltica convencional tomada como valor médio de 1377kgf.

C) Nenhuma das misturas atendeu ao intervalo de fluência estabelecido pela norma DNIT 043/1995 que recomenda valores entre 2,0 e 4,5mm. A dosagem ideal apresentou fluência no valor de 7,2mm, superior ao limite máximo de 4,5mm. O fresado sem adição de REOB e CAP deveria ter apresentado uma fluência abaixo do limite definido em norma, considerando o processo de envelhecimento pelo qual tal material foi exposto. Porém, observou-se que a M1 apresentou um valor de 5,33mm, acima do limite permitido em norma (4,5 mm). Com uma análise sobre as possíveis causas, não se chegou a uma conclusão sobre esse efeito, necessitando-se de mais estudos. Como mencionado, a adição de pó de borracha pode ser uma solução para redução da fluência.

D) Misturas com baixo teor de REOB apresentaram alto desgaste cântabro, enquanto que com o aumento do seu teor, juntamente com o CAP reduziu-se significativamente a perda de massa no ensaio. Isso se justifica pelo fato do agente e do ligante virgem melhorarem a aglutinação dos agregados nas misturas recicladas. Logo, implica-se diretamente em um ganho nas propriedades de adesão e coesão. A dosagem ideal apresentou um desgaste de 12,5%, superior ao valor de misturas convencionais de 5,91%, mas abaixo do limite máximo de 20%.

E) O REOB e o CAP influenciaram diretamente na resistência à tração por compressão diametral fazendo com que todas as misturas atendessem aos requisitos estabelecidos, com exceção da M15 (0,50 MPa) com maiores teores de ambos materiais asfálticos que ficou ligeiramente abaixo do mínimo permitido (0,65 MPa). Nesse ensaio foi nitidamente perceptível a ação de cada produto melhorador. Misturas com baixas dosagens de REOB (0,00%; 0,25%) apresentaram ganho de resistência pela adição do CAP, ao passo que, misturas com teores mais altos de REOB apresentaram uma redução na resistência. A RT para a dosagem ideal ficou em 1,40 MPa, superior ao valor referência de misturas convencionais de 1,20 MPa.

F) Para definição do critério de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente, o volume de vazios e a resistência à tração por compressão diametral foram determinantes para escolha do teor, juntamente com os ensaios

mecânicos. Definiu-se um teor de REOB (1,00%) e ligante virgem total da mistura (5,60% $\pm$ 0,1%) que atendeu satisfatoriamente aos ensaios e que portanto, se espera apresentar o melhor desempenho em serviço, fazendo com que a reciclagem de misturas asfáltica seja uma prática favorável para manter esses materiais que possuem um valor nobre, reutilizados de forma eficiente e sustentável.

O objetivo principal desta pesquisa foi alcançado. Espera-se que a mesma sirva de suporte para a continuação de mais pesquisas do comportamento de misturas recicladas a quente com 100% RAP. As misturas asfálticas 100% recicladas podem ser uma excelente alternativa em serviços de reparos tipo tapa-buracos, frequentemente realizadas pelas prefeituras e órgãos públicos responsáveis por manutenção das vias e rodovias.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o efeito do pó de borracha como possível solução para redução da fluência resultante do ensaio mecânico realizado;
- Avaliar o efeito do REOB em misturas recicladas a quente com a adição de outras composições de CAP, como 30/45, 60/70, de forma a conhecer o comportamento com outros ligantes virgens;
- Aplicar as misturas asfálticas recicladas utilizando o teor ideal definido nesta pesquisa em trechos experimentais ou em operações de tapa-buracos, e monitorar o seu desempenho em serviço;
- Estudar as propriedades mecânicas das misturas recicladas nas mesmas dosagens com outros ensaios como Módulo de Resiliência, Fadiga, Deformação Permanente, Dano por Umidade Induzida, para validação dos resultados já obtidos; e,
- Realizar um estudo econômico e ambiental como complementação desta pesquisa, a fim de avaliar a viabilidade desta metodologia empregada.

BIBLIOGRAFIA

ABNT. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, 2003.

AIREY, G. D. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. **Fuel**, v. 82, n. 14, p. 1709–1719, 1 out. 2003.

AL-QADI, I. L. et al. Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures. **FHWA-ICT-12-002**, 2012.

AL-QADI, I. L.; ELSEIFI, M.; CARPENTER, S. H. Reclaimed asphalt pavement - a literature review. **FHWA-ICT-07-001**, 2007.

ASPHALT INSTITUTE. **State-of-the-Knowledge: The use of REOB/VTAE in Asphalt**. 1ª ed ed. USA: [s.n.]. v. IS-235

AURANGZEB, Q. et al. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 77–86, 1 fev. 2014.

BAI, T. et al. Rejuvenation of short-term aged asphalt-binder using waste engine oil. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 47, n. 7, p. 822–832, 29 ago. 2019.

BARBORAK, R. C.; COWARD, C. E.; LEE, R. E. Detection and Estimation of Re-Refined Engine Oil Bottoms in Asphalt Binders: Texas Department of Transportation's Approach with Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy. **Transportation Research Record**, v. 2574, n. 1, p. 48–56, 1 jan. 2016.

BEHNOOD, A. **Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review** Journal of Cleaner Production Elsevier Ltd, , 10 set. 2019.

BERNUCCI, L. B.; MOURA, E. DE; LEITE, L. M. Efeitos do uso de asfalto modificados nas propriedades mecânicas dos revestimentos asfálticos. **2º Simpósio sobre Obras Rodoviárias**, 2002.

BERNUCCI, L. L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2010.

BONFIN, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª ed ed. São Paulo: [s.n.].

BROSSEAUD, Y. Reciclagem de misturas asfálticas : Evolução após 20 anos e a situação atual na França. **3º Salão de Inovação ABCR - 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões**, n. oct., p. 18, 2011.

BÜCHLER, S. et al. Wearing course mixtures prepared with high reclaimed asphalt pavement content modified by rejuvenators. **Transportation Research Record**, v. 2672, n. 28, p. 96–106, 2018.

CERDEIRA, J. F. **Estudo de misturas asfálticas recicladas a quente contendo 100% de material fresado para execução de tapa-buracos**. [s.l.] Dissertação de Mestrado - CEFET-MG, 2018.

CHEN, M. et al. Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 286–298, 1 set. 2014.

CHEN, Y. et al. Research on the influence of RAP and aged asphalt on the performance of plant-mixed hot recycled asphalt mixture and blended asphalt. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00722, 1 dez. 2021.

CHIU, C. TE; HSU, T. H.; YANG, W. F. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 3, p. 545–556, 1 jan. 2008.

COELHO, V. **Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação**. [s.l.] Universidade de São Carlos, 1996.

COPELAND, A. **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice**. [s.l.] United States. Federal Highway Administration. Office of Research ..., 2011.

D'ANGELO, J. et al. **Evaluation of the Performance Properties of Asphalt Mixes Produced with Re-refined Heavy Vacuum Distillate Bottoms**. Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association. **Anais...**2013

DEDENE, C. D.; YOU, Z. The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 7, n. 2, p. 145–152, 2014.

DNER. **053/1994 - Misturas betuminosas percentagem de betume - Método de Ensaio**Rio de Janeiro, 1994.

DNER. **84/1995 - Agregado Miúdo - Determinação da Densidade Real - Método de Ensaio**Departamento Nacional De Estradas De RodagemRio de Janeiro, 1995a.

DNER. **43/1995 - Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall - Método de Ensaio**Rio de Janeiro, 1995b.

DNER. **195/1997 - Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**Rio de Janeiro, 1997.

DNER. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**Rio de Janeiro, 1998.

DNIT. 031/2006 - Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de ServiçoRio de Janeiro, 2006.

DNIT. 178/2018 - Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – ProcedimentoRio de Janeiro, 2018a.

DNIT. 136/2018 - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaioRio de Janeiro, 2018b.

DNIT. 33/2021 - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviçoBrasília, 2021.

DOMINGUES, M. P.; BALBO, J. T. **Estudo de características de misturas asfálticas recicladas a quente com o emprego de usinas transportáveis de pequeno porte**, 2006. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp/download/Reciclagem%2520Marcelo%2520e%2520Balbo%252%0A02006.pdf>>

EAPA. Asphalt in Figures 2018. **European Asphalt Pavement Association**, 2018.

ERDEM, S.; BLANKSON, M. A. Environmental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) and waste precast concrete as aggregate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 264, p. 403–410, 15 jan. 2014.

FERREIRA, W. L. G. et al. The impact of aging heterogeneities within RAP binder on recycled asphalt mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124260, 20 set. 2021.

FONSECA, S. A. **Estudo Da Viabilidade Técnica Da Reciclagem a Quente De Concreto Asfáltico Fresado Para Aplicação a Frio Como Material Para Confecção De Remendos**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.

GIBSON, N.; ARNOLD, T. Quantifying the Influence of REOB Asphalt Pavement Materials' Performance. **Petersen Asphalt Research Conference**, p. 13, 2015.

GRILLI, A.; GNISCI, M. I.; BOCCI, M. Effect of ageing process on bitumen and rejuvenated bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 474–481, 1 abr. 2017.

HAFEEZ, I.; OZER, H.; AL-QADI, I. L. Performance characterization of hot in-place recycled asphalt mixtures. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 8, p. 4014029, 1 ago. 2014.

HERRINGTON, P. R. et al. Waste oil distillation bottoms as bitumen extenders. **Road and Transport Research**, v. 2, n. 4, p. 56–68, 1993.

HERRINGTON, P. R.; HAMILTON, P. G. **Recycling of Waste Oil Distillation Bottoms in Asphalt**. [s.l: s.n.].

HU, W.; SHU, X.; HUANG, B. Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 369–377, 20 out. 2019.

JOHNSON, K.-A. N.; HESP, S. A. M. Effect of Waste Engine Oil Residue on Quality and Durability of SHRP Materials Reference Library Binders. **Transportation Research Record**, v. 2444, n. 1, p. 102–109, 1 jan. 2014.

JOLIET, Y.; MALLOT, M. Precautions when interpreting rutting results from {LCPC} traffic simulator. 2000.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement recycling guidelines for state and local governments: Participants reference book. Final report, September 1995--December 1997**. [s.l.] National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL (United States); Federal ..., 1997.

KASKOW, J.; VAN POPPELEN, S.; HESP, S. A. M. Methods for the Quantification of Recycled Engine Oil Bottoms in Performance-Graded Asphalt Cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 2, p. 04017269, 2018.

LEHNEM, T. G. **Estudo sobre a compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas**. Lajeado, Rio Grande do Sul, 2015.

LESUEUR, D. et al. A Structure Model to Describe Asphalt Linear Viscoelasticity. **Journal of Rheology**, v. 40, p. 813–836, 1 set. 1996.

LYTTON, R. L. Adhesive fracture in asphalt concrete mixtures. **Asphalt technology handbook**, p. 1–54, 2004.

MA, Y. et al. Quantifying the effective mobilized RAP content during hot in-place recycling techniques. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 127953, 10 set. 2021.

MAZZONI, G.; BOCCI, E.; CANESTRARI, F. Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 5, n. 3, p. 157–168, 1 jun. 2018.

MCDANIEL, R. et al. **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Guidelines** National Cooperative Highway Research Program Research Results Digest. [s.l.] National Research Council (US). Transportation Research Board, 2001.

MEDINA, J. DE; GORETTI DA MOTTA, L. M. Mecânica dos Pavimentos. p. 569, 2005.

MELO, J. V. S. DE. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

MOGAWER, W. et al. Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. sup1, p. 183–208, 1 jun. 2012.

MOURA, E. DE. **Estudo da deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. [s.l.] Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 2010.

NAPA. Mix Design Techniques – Part I. **National Asphalt Pavement Association**, 1982.

OMARI, I.; AGGARWAL, V.; HESP, S. Investigation of two Warm Mix Asphalt additives. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 83–88, 1 mar. 2016.

OREŠKOVIĆ, M. et al. Quantitative assessment of the parameters linked to the blending between reclaimed asphalt binder and recycling agent: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117323, 20 fev. 2020.

PALIUKAITE, M.; ASSURAS, M.; HESP, S. A. M. Effect of recycled engine oil bottoms on the ductile failure properties of straight and polymer-modified asphalt cements. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 190–196, 15 nov. 2016.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. Pavement Design and Materials. **Pavement Design and Materials**, 2012.

PASETTO, M. et al. Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, 13 jul. 2021.

ROBERTS, F. L. et al. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction (Book style). **NAPA Education Foundation**, n. 1, p. 1–8, 1996.

ROCHA SEGUNDO, I. G.; CASTELO BRASCO, V. T. F.; VASCONCELOS, K. Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente Com Incorporação de Elevado Percentual de Fresado. **9º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões (9º CBR&C)**, 2015.

RUBAB, S. et al. Effects of engine oil residues on asphalt cement quality. **Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association**, v. 56, p. 1–12, 1 jan. 2011.

SAYAGH, S. et al. Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 6, p. 348–358, 1 abr. 2010.

SILVA, H. M. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M.; JESUS, C. M. G. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 60, p. 38–48, 1 mar. 2012.

SINGHVI, P.; OZER, H.; AL-QADI, I. L. Environmental and functional benefits and trade-offs of hot in-place recycling treatment techniques : final project report. **Transportation Research Board**, 2016.

SREERAM, A.; LENG, Z. Variability of rap binder mobilisation in hot mix asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 502–509, 20 mar. 2019.

STROUP-GARDINER, M. Selection guidelines for in-place recycling projects. **Transportation Research Record**, n. 2306, p. 3–10, 2012.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. [s.l.] Universidade de São Paulo (USP), 2019.

VALDÉS, G. et al. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1289–1297, 1 mar. 2011.

VILLANUEVA, A.; HO, S.; ZANZOTTO, L. Asphalt modification with used lubricating oil. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 35, n. 2, p. 148–157, 1 fev. 2008.

WEST, R. et al. **A comparison of virgin and recycled asphalt pavements using long-term pavement performance SPS-5 data**. Proc., Transportation research board 90th annual meeting. Washington, DC: Transportation Research Board, Paper. **Anais...**2011

WEST, R.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. **Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content**, 2013.

WIDYATMOKO, I. Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 2, p. 77–87, 1 fev. 2008.

WILLIAMS, B. A.; WILLIS, J. R.; SHACAT, J. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019 Information Series 138 (9th edition)**. National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, MD, 2019. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.co-asphalt.com/assets/IS138-2019_RAP-RAS-WMA_Survey.pdf>.

WILLIS, J. R. et al. **Effects of Changing Virgin Binder Grade and Content on Rap Mixture Properties** NCAT Report 12-03. Auburn: [s.n.].

WU, S. et al. Investigation of temperature characteristics of recycled hot mix asphalt mixtures. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 51, n. 3, p. 610–620, 2007.

YAN, C. et al. Quantification of re-refined engine oil bottoms (REOB) in asphalt binder using ATR-FTIR spectroscopy associated with partial least squares (PLS) regression. **Road Materials and Pavement Design**, 2020.

YAO, L. et al. Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, v. 336, p. 130405, 15 fev. 2022.

YU, B. et al. Environmental burden evaluation of hot in-place recycling of asphalt pavement based on discrete event simulation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 65, p. 151–160, 1 dez. 2018.

ZAMHARI, K. A.; HERMADI, M.; FUN, C. W. Characteristics of Rejuvenated Bitumen with Used Lubricating Oil as Rejuvenating Agent. **International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment in Developing Countries**, n. November, p. 64–69, 2009.

ZAUMANIS, M. et al. Performance-based design of 100% recycled hot-mix asphalt and validation using traffic load simulator. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117679, 10 nov. 2019.

ZAUMANIS, M. et al. Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 307, p. 125114, 8 nov. 2021.

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**, v. 16, n. 1, p. 39–55, 2 jan. 2015.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 159–166, 30 out. 2014a.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 92, p. 230–245, 1 nov. 2014b.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits. **Transportation Research Procedia**, v. 14, p. 3493–3502, 1 jan. 2016.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R.; FRANK, R. Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed Asphalt pavement mixtures. **Transportation Research Record**, v. 2370, n. 2370, p. 17–25, 2013.

ZHANG, J. et al. Impact of recycled asphalt materials on asphalt binder properties and rutting and cracking performance of plant-produced mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 654–663, 30 nov. 2017a.

ZHANG, J. et al. Impact of recycled asphalt materials on asphalt binder properties and rutting and cracking performance of plant-produced mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 654–663, 30 nov. 2017b.

ZHANG, Y.; BAHIA, H. U. Effects of recycling agents (RAs) on rutting resistance and moisture susceptibility of mixtures with high RAP/RAS content. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121369, 8 fev. 2021.

ZHONG, H. et al. Investigating binder aging during hot in-place recycling (HIR) of asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 276, p. 122188, 22 mar. 2021.