

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO**

Fábio César Maximiano Otaviano

**Avaliação do desempenho de concreto asfáltico reciclado a quente com uso de
asfaltos convencional e modificado por polímero.**

Juiz de Fora
2024

Fábio César Maximiano Otaviano

**Avaliação do desempenho de concreto asfáltico reciclado a quente com uso de
asfaltos convencional e modificado por polímero.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Ambiente Construído.

Orientador: Dra. Maria Teresa Gomes Barbosa

Coorientador: PhD. Luís Alberto Herrmann do Nascimento

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Otaviano, Fábio César Maximiano.

Avaliação do desempenho de concreto asfáltico reciclado a quente com uso de asfaltos convencional e modificado por polímero. / Fábio César Maximiano Otaviano. -- 2024.
128 p.

Orientadora: Maria Teresa Gomes Barbosa

Coorientador: Luís Alberto Herrmann do Nascimento

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2024.

1. Pavimentação. 2. Material Fresado. 3. Dosagem Asfáltica. 4. Desempenho. 5. Reciclagem. I. Barbosa, Maria Teresa Gomes, orient. II. Nascimento, Luís Alberto Herrmann do, coorient. III. Título.

Fábio César Maximiano Otaviano

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO A QUENTE COM USO DE
ASFALTOS CONVENCIONAL E MODIFICADO POR POLÍMERO

Dissertação apresentada ao PPG Ambiente
Construído, Programa da Universidade Federal de
Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Ambiente Construído. Área de
concentração: Ambiente Construído

Aprovada em 14 de outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof(a) Dr(a) Maria Teresa Gomes Barbosa –
Orientador(a) Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr Luis Alberto Herrmann do Nascimento
- Coorientador Petrobrás

Prof Dr Geraldo Luciano de Oliveira Marques - Membro interno
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr Gustavo Menegusso Pires - Membro Externo
Sacyr Construcción Sa

Juiz de Fora, 03/10/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Teresa Gomes Barbosa, Coordenador(a)**, em 13/10/2024, às 20:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Menegusso Pires, Usuário Externo**, em 14/10/2024, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Alberto Herrmann do Nascimento, Usuário Externo**, em 16/10/2024, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Luciano de Oliveira Marques, Professor(a)**, em 17/10/2024, às 09:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uf (www2.uf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2021057** e o código CRC **DCB418F5**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Cristina, cuja paciência, amor e apoio incondicional foram fundamentais durante todo esse processo. Sua crença em mim e suas palavras de encorajamento me incentivaram a superar desafios e alcançar meus objetivos. Sou eternamente grato por tê-la ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, sou grato a Deus, que me proporcionou a coragem necessária para não desistir.

A minha esposa Cristina, por acreditar em meus sonhos e por ser meu porto seguro em momentos de dificuldade. Este trabalho é também um reflexo do seu sacrifício e da sua dedicação. Sou eternamente grato por ter você na minha vida.

Aos meus pais e minha irmã, pelo apoio incondicional, a força e os ensinamentos que vocês me proporcionaram ao longo da minha vida foram fundamentais para a realização deste trabalho e para a conquista deste importante passo em minha trajetória acadêmica.

A minha orientadora professora Maria Teresa Gomes Barbosa por sua paciência, encorajamento e por acreditar em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sua paixão pela pesquisa e comprometimento com os alunos são inspirações que levarei para toda a minha vida acadêmica e profissional.

Agradeço ao meu coorientador Luis Alberto Herrmann do Nascimento, cujo conhecimento enriqueceu significativamente este trabalho. Sua disponibilidade em apoiar e incentivar minha pesquisa foi essencial para a realização deste projeto, juntamente com a paciência e o entusiasmo que foram uma fonte constante de motivação. Muito obrigado por tudo!

Aos professores Geraldo Luciano de Oliveira Marques e Tatiana Tavares Rodriguez agradeço pelos ensinamentos transmitidos ao longo da pós-graduação.

Ao PhD. Gustavo Menegusso Pires por aceitar o convite de compor a banca examinadora e pelas valiosas contribuições durante a avaliação do meu trabalho.

A minha profunda gratidão aos meus amigos engenheiros Ricardo Schroder e Carlos Henriques, a amizade incondicional e o apoio constante foram fundamentais durante toda esta trajetória acadêmica e profissional.

Ao Eng. Vinicius Isaac, suas palavras de motivação transformaram um grande sonho em algo concreto.

Sou grato à distribuidora Stratura Asfaltos, que me acolheu por muito tempo e não fez esforços em viabilizar todos os dados laboratoriais necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Um agradecimento especial ao Gerente Emerson Maciel e a toda a equipe do laboratório de pavimentos composta por José Romildo, Eduardo Almeida, Zaqueu Silva, Claudio Silva, Larissa Barros, Marcos Moreira, que foram fundamentais para a conclusão desta pesquisa.

A empresa Dynatest Latam, durante o período em que cursei meu mestrado, enfrentei desafios e conquistas que só foram possíveis graças ao apoio e à colaboração de todos os integrantes da equipe.

Agradeço aos amigos e colegas do CENPES/PETROBRAS pelo suporte e colaboração ao longo de todos esses anos, em especial ao meu grande amigo Eng. Ulisses Figueiredo.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos professores Luciano Specht (UFES) e Kamilla Vasconcelos (USP), suas orientações e materiais foram fundamentais para o aprimoramento desse trabalho.

Agradeço ao colega Eng. Renan Social pela sua contribuição com materiais, ideias e insights, que foram essenciais para a realização deste estudo.

Ao técnico Vitor Cardoso do laboratório de pavimentação do PEC/UFJF pela colaboração e suporte.

A CAPES pelo suporte financeiro e por impulsionar a pesquisa científica.

Por último, quero expressar minha gratidão a todos que, de alguma maneira, ajudaram na realização deste trabalho, especialmente aos professores e técnicos do PROAC/UFJF, seja através de orientação técnica ou por amizade.

RESUMO

A reciclagem de revestimentos asfálticos é uma prática ainda em desenvolvimento no Brasil, que tem sido adotada como uma alternativa para a construção ou restauração de pavimentos asfálticos. Essa abordagem visa tornar o processo mais sustentável e econômico, como é o caso da utilização de material de fresagem, chamado de RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado). Para tanto, será estudado o uso do RAP em substituição aos materiais componentes (ligante e agregados minerais) usados na confecção de misturas asfálticas com os asfaltos CAP 30/45 e CAP 65/90-E (modificado por polímero). Foram elaboradas duas misturas asfálticas de referência com materiais 100% virgens, uma para cada tipo de ligante e outras duas misturas asfálticas com substituição de 20% de RAP na mistura, também uma para cada tipo de ligante. Isso resultou em quatro misturas asfálticas analisadas. As amostras foram avaliadas para determinar suas características de rigidezes (Módulos de Resiliência e Dinâmico), danificação (Flow Number, Ruptura à tração e Fadiga) e adesividade (Dano por umidade induzida). A partir dos resultados apresentados, pode-se dizer que as misturas com ligante modificado, em comparação a que utilizou ligante convencional, demonstraram as menores rigidezes, tanto no ensaio de Módulo de Resiliência quanto no Módulo Dinâmico. No que tange aos ensaios de Ruptura por tração, as misturas com CAP 30/45 destacaram-se por apresentarem resultados elevados, principalmente na presença de RAP. Quanto aos resultados de adesividade todas as amostras atenderam aos limites prescritos pela regulamentação. Os resultados de Flow Number revelaram que as misturas contendo CAP 65/90-E registraram valores mais altos, evidenciando a influência do tipo de CAP nas misturas. A aplicação do modelo para examinar os dados do ensaio de fadiga por compressão diametral revelou que as misturas com CAP 65/90-E apresentaram um desempenho superior em comparação com as misturas com CAP 30/45. Assim, com base nas análises realizadas neste estudo utilizando 20% de RAP, é possível evidenciar que as misturas com o ligante modificado mostraram uma melhoria significativa no desempenho em relação às misturas com o ligante convencional.

Palavra-Chave: Pavimentação. Material Fresado. Dosagem Asfáltica. Desempenho. Reciclagem.

ABSTRACT

Recycling asphalt pavements is a practice still under development in Brazil, which has been adopted as an alternative for the construction or restoration of asphalt pavements. This approach aims to make the process more sustainable and economical, as is the case with the use of milling material, called RAP (Recycled Asphalt Pavement). To this end, the use of RAP will be studied as a replacement for the component materials (binder and mineral aggregates) used in the design of asphalt mixtures with CAP 30/45 and CAP 65/90-E asphalts (polymer modified). Two reference asphalt mixtures were prepared with 100% virgin materials, one for each type of binder, and two other asphalt mixtures with a 20% replacement of RAP in the mixture, also one for each type of binder. This resulted in four asphalt mixtures being analyzed. The samples were evaluated to determine their stiffness characteristics (Resilience and Dynamic Modulus), damage (Flow Number, Tensile Rupture and Fatigue) and adhesion (Induced Moisture Damage). Based on the results presented, it can be said that the mixtures with modified binder, compared to those using conventional binder, demonstrated the lowest stiffness, both in the Resilience Modulus and Dynamic Modulus tests. Regarding the Tensile Rupture tests, the mixtures with CAP 30/45 stood out for presenting high results, mainly in the presence of RAP. Regarding the adhesion results, all samples met the limits prescribed by the regulation. The Flow Number results revealed that the mixtures containing CAP 65/90-E registered higher values, evidencing the influence of the type of CAP in the mixtures. The application of the model to examine the data from the diametrical compression fatigue test revealed that the mixtures with CAP 65/90-E presented superior performance compared to the mixtures with CAP 30/45. Thus, based on the analyses carried out in this study using 20% RAP, it is possible to demonstrate that the mixtures with the modified binder showed a significant improvement in performance compared to the mixtures with the conventional binder.

Keyword: Paving. Milled Material. Asphalt Dosage. Performance. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	-Dados da malha rodoviária brasileira.....	19
Figura 2	-Média da porcentagem de RAP empregada cada setor no EUA.....	22
Figura 3	-Estocagem de material fresado “ <i>in situ</i> ”.....	26
Figura 4	-Representação ilustrativa de fresagem a quente “ <i>in situ</i> ”.....	29
Figura 5	-Representação ilustrativa de fresagem a frio “ <i>in situ</i> ”.....	29
Figura 6	-Sequência executiva da reciclagem profunda.....	30
Figura 7	-Etapas do envelhecimento do ligante asfálticos.....	37
Figura 8	-Ensaio de envelhecimento de curto prazo no RTFOT.....	38
Figura 9	-Método de envelhecimento de longo prazo – PAV.....	39
Figura 10	-Representação da extratora automatizada de ligante.....	41
Figura 11	-Equipamento de recuperação para ligante Abson.....	42
Figura 12	-Estrutura do Rotavapor.....	43
Figura 13	-Equipamentos utilizadas para caracterização.....	44
Figura 14	-Equipamentos utilizados na especificação Superpave.....	46
Figura 15	-Exemplo especificação Superpave baseada no clima e tráfego.....	48
Figura 16	-Amostra de ligante fraturada ao término do ensaio LAS.....	48
Figura 17	-Curva de fadiga de ligantes.....	49
Figura 18	-Equipamento Brookfield com amostra	50
Figura 19	-Compactador por impacto Marshall.....	52
Figura 20	-Grau de interação dos constituintes da mistura reciclada.....	53
Figura 21	-Fluxograma das misturas pesquisadas.....	57
Figura 22	-Localização da Pedreira Basalto 6.....	59
Figura 23	-Curva granulométrica dos agregados minerais.....	60
Figura 24	-Galpão de agregados minerais e RAP - Pedreira Basalto 6.....	62
Figura 25	-Material fresado (RAP) classificado.....	63
Figura 26	-Curva granulométrica do RAP.....	64
Figura 27	-Curva Granulométrica de Referência e Reciclada	69
Figura 28	-Misturado BBMAX 25 com mistura asfáltica.....	71

Figura 29	-Teor de CAP virgem adicionado as misturas recicladas.....	73
Figura 30	-Prensa Cooper 25 KN e ajuste dos LVDT's na amostra.....	76
Figura 31	-Representação da aplicação da carga cíclica e da resposta de deformação durante o ensaio, destacando o ângulo de fase.....	77
Figura 32	-Equipamento MTS e amostra com os aparatos de medição.....	78
Figura 33	- Zonas da curva de deformação plástica e obtenção do FN.....	80
Figura 34	-Corpos de prova integro e em ruptura total.....	81
Figura 35	-Prensa automática com amostra.....	81
Figura 36	-Ilustração das tensões no centro do CP.....	83
Figura 37	-Etapas de condicionamento severo das amostras à água até a sua ruptura.....	86
Figura 38	-Variação no número de ciclos até a ruptura em relação à amplitude de deformação para os ligantes asfálticos estudados.....	90
Figura 39	-Resultados obtidos pelo módulo de resiliência.....	92
Figura 40	-Característica da curva mestra das misturas na temperatura de 20°C, escala semi-log.....	95
Figura 41	-Característica da curva mestra das misturas na temperatura de 20°C, escala log-log.....	96
Figura 42	-Comportamento do ângulo de fase de cada mistura, com a frequência ajustada para a temperatura de referência de 20°C.....	96
Figura 43	- Resultados médios do FN das misturas estudadas.....	99
Figura 44	-Correlação entre Flow Number e MSCR.....	101
Figura 45	-Resultados médios de RT.....	103
Figura 46	-Relação entre o MR e RT das quatro misturas.....	104
Figura 47	-Vida de fadiga por diferença de tensão (ϵ_r) das misturas asfálticas...	106
Figura 48	-Vida de fadiga por deformação resiliente (ϵ_r) das misturas asfálticas.	106
Figura 49	-Modelo considerando trincamento de baixo para cima.....	109
Figura 50	-Modelo considerando trincamento de cima para baixo.....	110
Figura 51	-Correlação entre a Fadiga da mistura e o FFL do ligante.....	112
Figura 52	-Vida de fadiga das misturas recicladas.....	113
Figura 53	-Dados da Relação da Ruptura por Tração.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-Parâmetros de seleção de métodos de reciclagem.....	31
Tabela 2	-Estimativa de RAP oriundo das rodovias do grupo CCR.....	32
Tabela 3	-Classificação por desempenho do PG.....	47
Tabela 4	-Classificação do ligante de acordo com o Jnr.....	47
Tabela 5	-Parâmetro sugerido de classificação do Fator de Fadiga do Ligante...	49
Tabela 6	-Diretrizes de seleção de ligantes para misturas asfálticas recicladas.....	51
Tabela 7	-Nomenclatura e classificação das amostras pesquisadas.....	58
Tabela 8	-Designação das amostras para ensaios mecânicos.....	58
Tabela 9	-Análise granulométrica das amostras de agregados.....	60
Tabela 10	-Caracterização dos agregados minerais.....	61
Tabela 11	-Resultado da extração e granulometria das 2 amostras de RAP.....	63
Tabela 12	-Resultado da caracterização do CAP recuperado.....	64
Tabela 13	-Resultado da caracterização do CAP 30/45.....	65
Tabela 14	-Resultado da caracterização do CAP 65/90-E.....	66
Tabela 15	-Composição dos materiais.....	68
Tabela 16	-Curva granulométrica das misturas.....	68
Tabela 17	-Temperaturas utilizadas na elaboração das dosagens.....	70
Tabela 18	-Determinação do teor ideal de ligante para as misturas estudadas.....	72
Tabela 19	-Resumo dos dados das misturas.....	73
Tabela 20	-Resultado dos ligantes asfálticos utilizando a metodologia Superpave.....	89
Tabela 21	-Valores médios de MR com aplicação de carga de 1Hz.....	92
Tabela 22	-Resultados médios das quatro misturas pesquisadas.....	94
Tabela 23	-Resultados médios das quatro misturas analisadas.....	99
Tabela 24	-Parâmetros de FN estabelecidos para diversos níveis de tráfego.....	100
Tabela 25	-Resultados médios da RT das amostras.....	102
Tabela 26	-Resultados da razão de MR/RT.....	104
Tabela 27	-Determinação volumétrica da mistura considerando ativação do RAP em 60%.....	108
Tabela 28	-Análise ao trincamento de baixo para cima da camada asfáltica.....	109

Tabela 29	-Análise ao trincamento de baixo para cima da camada asfáltica.....	110
Tabela 30	-Resultados da Relação de Ruptura por Tração.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	- Agência Nacional de Petróleo
AMP	- Asfalto Modificado por Polímero
ARRA	- <i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
AASHTO	- <i>American Association of Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	- <i>Bending Beam Rheometer</i>
CAP	- Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	- Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CCR	- Companhia de Concessões Rodoviárias
CP	- Corpo de prova
cP	- Centipoise
CNT	- Confederação Nacional de Transporte
CV	- Coeficiente de variação
DERSA	- Desenvolvimento Rodoviário S.a
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	- Desvio Padrão
DSR	- <i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DUI	- Dano por Umidade Induzida
EAPA	- <i>European Asphalt Pavement Association</i>
Estab	- Estabilidade da mistura asfáltica
FN	- Flow Number
FFL	- Fator de Fadiga do Ligante
Gsa	- Massa específica real do agregado
Gsb	- Massa específica aparente do agregado
Gmb	- Massa aparente da mistura asfáltica compactada
Gmm	- Massa específica máxima medida ou densidade específica Rice da mistura

LAS	- <i>Linear Amplitude Sweep</i>
LVDT	- <i>Linear Variable Differential transducer</i>
NAPA	- National Asphalt Pavement Association
NB	- Norma Brasileira
NCHRP	- National Cooperative Highway Research Program
MeDiNa	- Método de Dimensionamento Nacional
MD	- Módulo Dinâmico
MR	- Módulo de Resiliência
MSCR	- <i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
RAP	- <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RBV	- Relação Betume-Vazios
RTFOT	- <i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
RT	- Resistencia à Tração
RRT	- Razão de Resistência à Tração
SHRP	- <i>Strategic Highway Research Program</i>
SUPERPAVE	- <i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
S-VECD	- <i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i>
UTM	- <i>Universal Testing Machine</i>
VAM	- Volume de Agregado Mineral (Vazios)
VECD	- <i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
VDO	- <i>Vacuum Degassing Oven</i>
Vv	- Volume de vazios
PAV	- <i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	- <i>Performance Grade</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	- Ângulo de Fase
cm	- Centímetro
ϵ_r	-Deformação resiliente
E^*	- Módulo Complexo
$ E^* $	- Módulo Dinâmico
Hz	- Hertz
KPa	- Quilopascal
mm	- Milímetro
MPa	- Megapascal
N_f	-Número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga
Psi	-Libra-força por polegada ao quadrado
$ G^* $	- Modulo Complexo no Cisalhamento
μs	- Microstrain
$\Delta\sigma$	- Tensão
t-TS	- Superposição tempo-temperatura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Justificativa.....	23
1.2	Objetivo.....	24
1.3	Proposta Metodológica.....	24
1.4	Organização do Trabalho.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1	Considerações iniciais.....	26
2.2	Conceito de reciclagem de pavimentos.....	27
2.3	Panorama de reciclagem de pavimentos no Brasil.....	31
2.4	Envelhecimento dos materiais asfálticos.....	36
2.5	Extração e recuperação de materiais asfálticos.....	40
2.6	Propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticos.....	43
2.6.1	Propriedade física dos ligantes convencionas.....	43
2.6.2	Propriedade reológica dos ligantes asfálticos.....	45
2.7	Dosagem das misturas asfálticas recicladas.....	50
2.7.1	Grau de interação entre o ligante envelhecido e o novo.....	53
2.8	Avaliação de desempenho das misturas asfálticas.....	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	Materiais.....	59
3.1.1	Agregados minerais.....	59
3.1.2	RAP (<i>Reclaimed asphalt pavement</i>).....	61
3.1.3	Ligantes Asfálticos.....	65
3.2	Método de elaboração das misturas asfálticas.....	67
3.3	Estudo das propriedades das misturas asfálticas.....	74
3.3.1	Ensaio de rigidez.....	74
3.3.2	Ensaio de danificação.....	79
3.3.3	Ensaio de dano por umidade.....	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	88
4.1	Avaliação dos ligantes asfálticos.....	88
4.2	Dados de rigidez.....	91

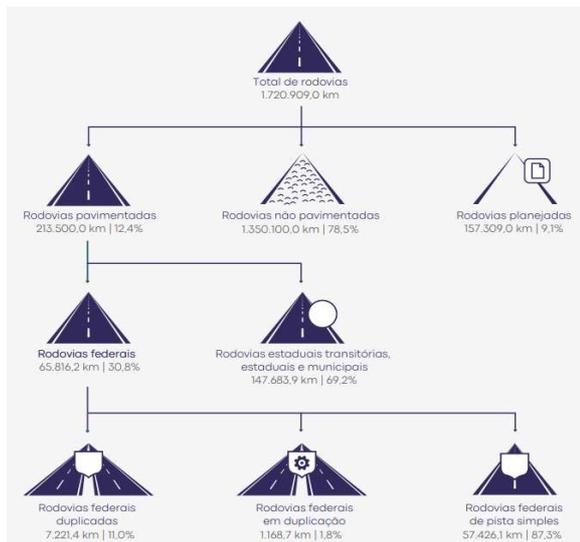
4.3	Propriedades de danificação nas misturas asfálticas.....	98
4.4	Efeito do dano por umidade.....	114
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
5.1	Conclusões.....	117
5.2	Sugestões para pesquisas futuras.....	120
	REFÊRENCIAS.....	121

1. INTRODUÇÃO

As estradas e vias de transportes urbano desempenham um papel crucial no avanço da qualidade de vida em escala global. No cenário atual, o Brasil destaca-se como detentor da maior malha rodoviária para o transporte de pessoas e mercadorias quando comparado às maiores economias globais, superando nações como China, Rússia e Canadá (G1, 2018). Dada a natureza específica dessas rodovias, é importante a realização de investimentos significativos, tornando essencial a aplicação eficaz de recursos de engenharia para garantir a segurança e a durabilidade dos pavimentos (Otaviano, 2017).

Segundo o relatório anual da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2023), a malha viária em sua totalidade no Brasil é de 1.720.909,0 km. Desse montante, apenas 12,4% (213.500,0 km) correspondem a rodovias pavimentadas, enquanto as não pavimentadas e as planejadas representam 87,6% (1.507.409,0 km), como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Dados da malha rodoviária brasileira.



Fonte: Relatório CNT (2023).

Cabe mencionar que, cerca de 99% das rodovias pavimentadas são construídas em pavimento flexível, ou seja, um dos materiais principais é o revestimento asfáltico. Esse tipo de pavimento possui uma vida de serviço, com correta manutenção periódica, estimada em 12 anos. Assim, compreende-se que a manutenção é crucial para garantir a longevidade das estradas.

Contudo, os dados da pesquisa da CNT (CNT, 2023) indicam que a condição geral da rede viária brasileira se degradou no ano de 2023. Dos 110.502 quilômetros analisados nas rodovias federais e nas principais vias estaduais do Brasil, 56,8% apresentaram algum tipo de anomalia. As razões são variadas e podem incluir problemas no planejamento da infraestrutura, falhas durante a construção, ausência de manutenção preventiva e inspeção inadequada (tanto no momento da construção quanto em relação à carga excessiva dos veículos).

Assim, torna-se fundamental buscar alternativas mais eficientes e ecológicas para a construção e a manutenção de rodovias, utilizando materiais inovadores que contribuam para o desenvolvimento sustentável. Portanto, uma alternativa para restauração pavimentos seria incorporar RAP, o que resultaria em uma diminuição do impacto ambiental causado pela deposição, tornando o processo economicamente sustentável e reduzindo o consumo de novos materiais, assim contribuindo para a preservação ambiental. Além disso, é importante destacar que misturas asfálticas recicladas, devidamente dosadas com RAP, demonstram que essa técnica é viável e promissora (Luzzi, 2019).

No continente europeu, segundo pesquisa da EAPA (European Asphalt Pavement Association) em 2018, apresentou que a Bélgica atingiu 100% de seu material reciclado na produção de misturas asfálticas a quente, totalizando aproximadamente 1.687.000 toneladas. A Finlândia também se destaca pela reutilização de 100 % do RAP. Já em países com volumes mais significativos de material disponível, como a Alemanha, 82% de seus 13 milhões de toneladas de RAP foram reaproveitados (Correa, 2020).

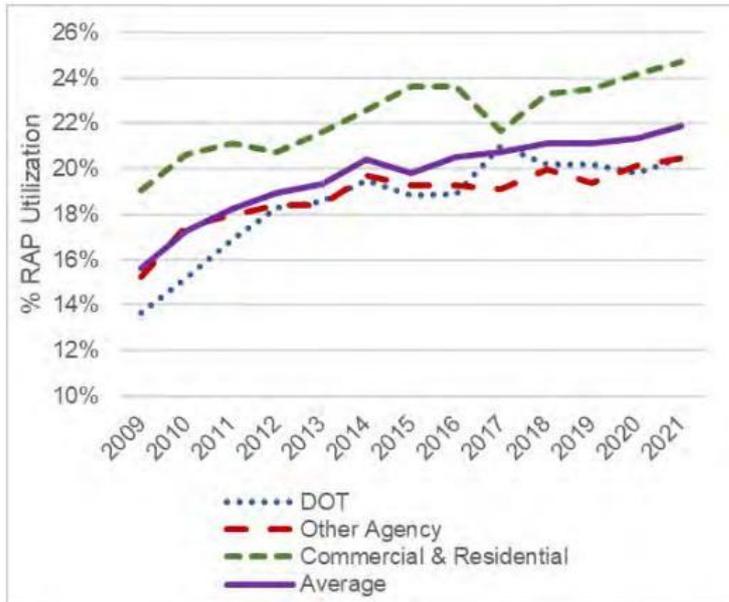
Desde 2009, a Federal Highway Administration (FHWA), em colaboração com a National Asphalt Pavement Association (NAPA), vem realizando pesquisas com empresas do ramo rodoviário com o propósito de promover práticas sustentáveis, como a incorporação de materiais reciclados e o uso de misturas mornas nos Estados

Unidos. O objetivo dessas pesquisas é quantificar a utilização de materiais reciclados e misturas mornas na indústria de pavimentos asfálticos, documentar a adoção dessas tecnologias e identificar áreas onde elas estão sendo empregadas de forma eficaz, assim como áreas onde ainda há subutilização desses recursos.

Com base nos resultados da pesquisa da NAPA (NAPA, 2021), foi possível identificar que a quantidade de pavimento asfáltico reciclado (RAP) em novas misturas totalizou 94,6 milhões de toneladas, indicando um acréscimo de 68,9% em relação ao total estimado de toneladas de RAP usadas em 2009, além disso, calcula-se que o emprego do RAP durante o período de construção em 2021 tenha diminuído a demanda por 4,7 milhões de toneladas (equivalente a 26 milhões de barris) de ligante asfáltico, implicando em uma diminuição da utilização de agregado em mais de 89 milhões de toneladas, promovendo uma economia total em mais de US\$ 3,4 bilhões, em comparação com o ano anterior.

Neste cenário, na Figura 2, é possível verificar a média percentual de RAP utilizada por cada setor, assim como a média geral em todas as misturas de pavimentos asfálticos. Em 2021, a média percentual de RAP utilizada por todos os setores aumentou para um novo máximo de 21,9%. Anteriormente, essa média teve um crescimento constante de 2009 a 2014, antes de se estabilizar em torno de 20% até 2017. O percentual de RAP utilizado em cada setor durante 2021 teve um leve aumento, mantendo-se estável em comparação com os percentuais de utilização de 2020 e 2019 (NAPA, 2021).

Figura 2 - Média da porcentagem de RAP empregada em cada setor no EUA.



Fonte: NAPA, 2021.

Enquanto em países mais desenvolvidos a reciclagem a quente já é uma realidade consolidada, no Brasil essa técnica ainda está em fase de desenvolvimento. Em vista disso, a alta dependência do modal rodoviário para o transporte no Brasil impõe a necessidade de grandes investimentos na infraestrutura viária, tanto na construção quanto na manutenção. Sendo assim, a reciclagem asfáltica, uma vez determinada como solução alternativa de restauração de pavimentos, pode gerar vantagem ambiental, econômica e social (Suzuki, 2019).

Com o propósito de aumentar cada vez mais o desempenho e qualidade das misturas asfálticas, a adoção de ligantes modificados por polímeros nas misturas asfálticas recicladas, tem o potencial de proporcionar uma melhora nas propriedades reológicas desses materiais, principalmente em temperaturas extremas que possam influenciar a viscosidade do material (Bohn, 2017).

Tendo em vista os aspectos apresentados, abre-se caminho para o avanço da pesquisa em reciclagem de misturas asfálticas a quente no Brasil, destacando a relevância dos processos e técnicas aplicadas.

1.1. Justificativa

Observando o crescimento da infraestrutura viária, a técnica de RAP em revestimentos asfálticos se destaca por sua rápida ascensão, fruto da conscientização de reutilizar materiais que trariam danos ao meio ambiente e de enorme valor econômico que esse material ainda possui. Essa técnica é amplamente empregada e envolve a manutenção de pavimentos asfálticos. No entanto, é imprescindível ter um local apropriado para o armazenamento do material fresado, já que a falta de destinação correta pode resultar em acúmulo e descarte inadequado, prejudicando o meio ambiente (Oliveira, 2013).

Nesse contexto, a adoção de técnicas para o reaproveitamento de RAP é apresentada como uma solução viável para minimizar os impactos negativos descritos, possibilitando compreender as propriedades das dosagens asfálticas recicladas com adoção de ligantes convencionais e modificados, além de maximizar os benefícios na construção de pavimentos mais sustentáveis e duráveis.

Neste estudo, procurou-se empregar 20% de RAP, visto que essa proporção tem demonstrado bons resultados tanto em testes de laboratório quanto em usinas de asfalto. Ademais, essa quantidade permitiu a condução do estudo sem a necessidade de um agente rejuvenescedor, conforme as diretrizes da AASHTO (2022) M323. Assim, essa abordagem representaria uma alternativa na restauração de pavimentos para a cidade de Juiz de Fora/MG, contribuindo para a melhoria das condições econômicas, sociais e ambientais do município.

1.2. Objetivo

O objetivo deste estudo é analisar o desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas com incorporação de 20% de RAP, utilizando tanto ligante convencional quanto ligante modificado por polímero.

Para alcance do objetivo geral do presente estudo, foram estabelecidos os pontos específicos:

- Caracterizar a amostra de RAP, assim como o tipo de ligante recuperado;
- Avaliar como o RAP afeta o desempenho mecânico das misturas asfálticas em relação ao tipo de ligante, abrangendo características que inclua aspectos como rigidez, deformações permanentes, adesão e trinca por fadiga.

1.3 Proposta Metodológica

Estruturada em 5 capítulos, esta dissertação consiste em uma pesquisa de caráter aplicado, utilizando procedimento bibliográfico e experimental. Sua metodologia será explicada, detalhadamente, no capítulo 3.

1.4. Organização do Trabalho

Esse trabalho é composto por 5 capítulos, estruturados da seguinte maneira:

O capítulo 1 compreende à introdução sobre o cenário dos pavimentos brasileiros e no mundo, a conscientização do emprego de reciclagem em pavimentos em escala mundial e os benefícios que a técnica proporciona. Nesse capítulo também estão contidos os objetivos da pesquisa e a justificativa para sua realização.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica para o embasamento conceitual da pesquisa. Nele estão contidos argumentos sobre reciclagem dos pavimentos, apresentando informações históricas e conceitos importantes relevantes

ao tema, além de mencionar pesquisas atuais sobre o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas.

O capítulo 3 detalha a metodologia empregada para coletar os dados necessários à avaliação do RAP e das misturas asfálticas. Todos os ensaios realizados, bem como as normas utilizadas, são descritos minuciosamente.

O capítulo 4 apresenta todos os resultados e discussões das análises realizadas a partir dos ensaios laboratoriais.

O capítulo 5, são apresentadas as considerações finais, nas quais se ressaltam as principais conclusões deste estudo, além de sugestões de temas para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações iniciais

A indústria da construção, embora fundamental para o desenvolvimento da sociedade, exerce um impacto significativo sobre o meio ambiente. Essa influência se manifesta de diversas maneiras, desde a extração de recursos naturais até a geração de resíduos. Dentro de uma obra da construção civil há muito desperdício, oriundo de serviços corretivos ou preventivos e, que poderiam ter um melhor reaproveitamento dos materiais com a adoção de novas tecnologias, como a reciclagem (Pinto, 1999).

É crucial repensar os métodos utilizados na construção civil e na pavimentação, buscando alternativas mais sustentáveis que minimizem os impactos negativos ao ecossistema. A adoção de práticas como a reutilização de materiais, a implementação de técnicas de construção verde e a destinação correta dos resíduos são medidas essenciais para garantir um futuro mais equilibrado e sustentável. Assim, nos últimos anos, estas duas áreas têm investido no reaproveitamento de resíduos variados (Oliveira, 2013). Na Figura 3, apresenta-se um estoque de material fresado oriundo de um pavimento antigo.

Figura 3 – Estocagem de material fresado “*in situ*”.



Fonte: Autor (2022).

A reciclagem de pavimentos se destaca como uma alternativa inovadora e sustentável para a construção e manutenção de rodovias, oferecendo diversas vantagens em relação às técnicas tradicionais. Entre os principais benefícios, é possível destacar economia de energia, manutenção do greide antigo, evitando a sobreposição de revestimentos asfálticos, o nivelamento adequado do sistema de drenagens superficiais durante o processo construtivo do pavimento, os ajustes na irregularidade longitudinal e/ou transversal, a correção das condições superficiais do revestimento, o não alteamento em túneis e viadutos devido aos recapeamentos decorrentes (Lima, 2003).

No entanto, ao incorporar RAP em uma mistura asfáltica, ocorre um incremento na rigidez da mistura, pois o ligante envelhecido presente no RAP intensifica essa característica. Isso faz com que as misturas contenham um comportamento mais rígido e, conseqüentemente, mais frágil do que as misturas sem RAP, ocasionando, em alguns casos, fissuras indesejadas devido às cargas impostas pelos veículos e às forças atuantes nos pavimentos (Norouzi *et al.*, 2014).

Dessa forma, o setor da pavimentação vem investindo em técnicas para melhorar a performance dos materiais e para redução de impactos ambientais. Entre as técnicas promissoras que ganham destaque estão a reciclagem de pavimentos, a utilização de misturas mornas e, ainda, a substituição de materiais retirados da natureza por resíduos de revestimentos asfálticos degradados ou de outras estruturas do pavimento, como alternativas que busquem reduzir a emissão de gases nocivos, assim como evitar o consumo desenfreado de origens não renováveis (Correa, 2020).

2.2. Conceito de reciclagem de pavimentos

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), a reciclagem dos pavimentos é considerada uma solução viável por oferecer diversas vantagens, entre elas se destacam: o emprego de materiais virgens tradicionais, como a redução de agregados e ligantes asfálticos e, preservação da natureza e de energia, bem como a restauração das condições geométricas da pista existentes.

Neste contexto, a reciclagem tem se mostrado como uma boa solução para recuperação, manutenção e restauração de novas camadas de pavimentos. Assim, diferentes soluções de reciclagem foram elaboradas especificamente para o estado de conservação do pavimento remanescente, sendo empregado a frio ou a quente (Lima, 2003).

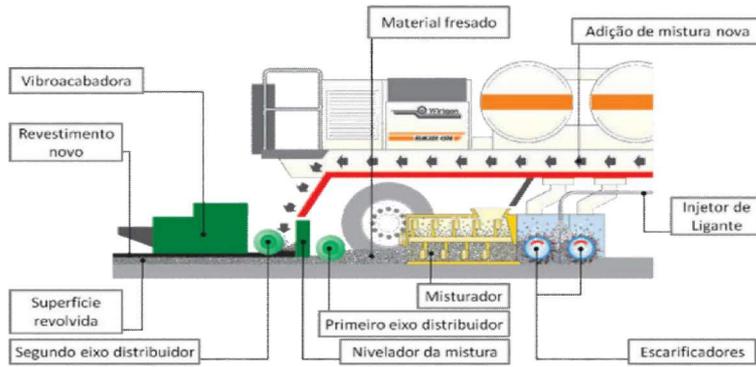
Em relação a reciclagem de pavimentos, podem ser classificar os 5 métodos distintos, de acordo com Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA, 1992) em: reciclagem a frio “in situ” (*Cold planning*); reciclagem a quente, em usina estacionária (*Hot recycling*); reciclagem a quente, “in situ” (*Hot in-place recycling*); reciclagem a frio, “in situ” (*Cold in-place recycling*) e reciclagem de camadas do pavimento (*Full depth reclamation*):

A reciclagem a frio “in situ” (*Cold planning*) resulta na remoção do revestimento asfáltico a uma profundidade almejada e depois restaurada através da execução de um novo revestimento superficial, eximindo quaisquer imperfeições. Além disso, pode ser empregada para corrigir defeitos na pista como inclinações, depressões e afundamentos, bem como melhoria nas condições de aderência entre pneu/pavimento. Essa técnica é realizada por meio de equipamento munido de um cilindro giratório que corta a camada do pavimento e transporta o material fresado (RAP) para os caminhões bota fora. Dessa forma, o pavimento remanescente poderá ser restaurado ou liberado ao tráfego como uma superfície de texturização.

A reciclagem a quente, em usina estacionária (*Hot recycling*) consiste na remoção do revestimento asfáltico deteriorado por uma fresadora, sendo material gerado (RAP) reaproveitado através da reciclagem. Em uma usina estacionária de asfalto, o RAP é misturado a quente aos novos constituintes (agregados virgens, ligantes asfálticos e/ou agentes de rejuvenescedores) e construído como uma nova camada do pavimento.

A reciclagem a quente, “in situ” (*Hot in-place recycling*) envolve o pré-aquecimento da superfície asfáltica e em seguida, sua remoção a uma profundidade entre 2 a 4 centímetros. Dessa forma, a camada asfáltica removida é transportada para uma usina de reciclagem “in situ”, sendo misturada com novos materiais (agregados e ligantes asfálticos e/ou agentes de rejuvenescedor) e aplicada como uma nova camada de pavimento. Demonstra-se o esquema executivo na Figura 4.

Figura 4 - Representação ilustrativa de fresagem a quente "in situ".

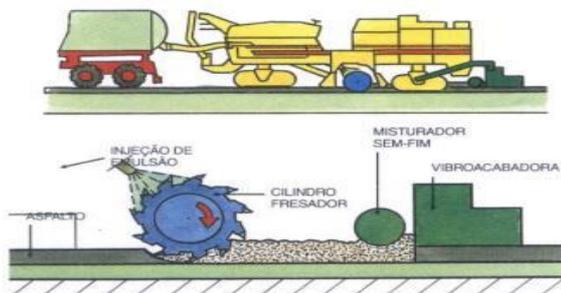


Fonte: Silva (2011).

A reciclagem a frio, "*in loco*" (*Cold in-place recycling*) consiste na fresagem e reciclagem do pavimento antigo a uma determinada espessura, sendo comum adicionar emulsão asfáltica e aditivos. Em alguns casos é adicionado agregado virgem ao material reciclado com o objetivo de aprimorar as propriedades da camada, conforme indica a Figura 5.

Tradicionalmente, esse método vem sendo aplicado como solução para vias de baixo e alto volumes de tráfego, além de proporcionar uma economia quando comparado a outros tipos de reciclagem.

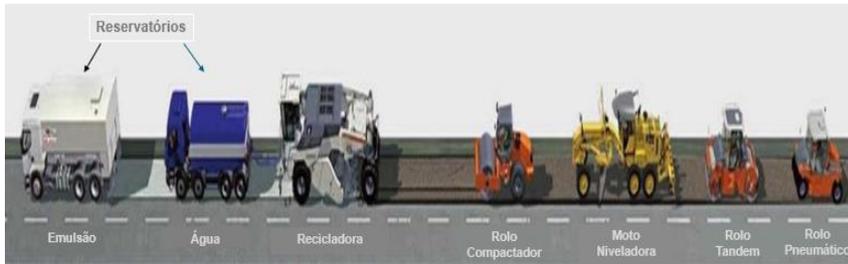
Figura 5 - Representação ilustrativa de fresagem a frio *in situ*.



Fonte: Lima (2003).

A reciclagem de camadas do pavimento (*Full depth reclamation*) ou reciclagem profunda tem como objetivo a reciclagem de todas as camadas do pavimento, incluindo a camada de revestimento, sendo possível adicionar novos materiais (ligantes, emulsões, cimento, solo, agregado etc.) capazes de gerar uma nova camada de base estabilizada. A Figura 6 demonstra esta sequência construtiva.

Figura 6 – Sequência executiva da reciclagem profunda.



Fonte: Adaptada, Fonseca (2024).

A seleção do método de reciclagem para uma reabilitação de pavimento, está relacionada a diversos fatores presentes na via como: estado geral do pavimento existente e seus defeitos; diagnóstico das causas dos defeitos presentes por meio de monitoramento de campo e testes laboratoriais, avaliação do plano de manutenção e conservação do pavimento associado aos seus custos; consideração das variáveis de tráfego, clima e geometria da via.

Desse modo, os gestores de pavimentos podem ter subsídio para determinar qual a melhor método de reciclagem deve ser utilizada a melhor relação custo e/ou benefício (Suzuki, 2019). The Asphalt Recycling and Reclaiming Association (Arra,1992) considera a Tabela 1 como parâmetro de seleção para tipos de reciclagem.

Tabela 1- Parâmetros de seleção de métodos de reciclagem.

Tipos de defeitos		Método				
		Fresagem e recomposição	Reciclagem a quente (usina)	Reciclagem a quente (local)	Reciclagem a frio	Recuperação profunda
Superficial	Desagregação					
	Exsudação					
	Escorregamento					
Deformação	Corrugação/ ondulação					
	Afundamento de trilha raso					
	Afundamento de trilha profundo					
Trincamento (associado a carregamento)	Jacaré					
	Longitudinal					
	Bordo					
	Derrapagem					
Trincamento (não associado a carregamento)	Bloco					
	Longitudinal					
	Transversal (térmico)					
Reflexão de Trincas						
Reparos de Manutenção	Spray					
	Recapeamento					
	Buraco/Panela					
	Reparo profundo					
Problemas de base/subbase						
Irregularidade	Generalizada					
	Depressões Locais					
	Pontos Altos					

Fonte: Adaptada Suzuki (2019).

2.3. Panorama de reciclagem de pavimentos no Brasil

No Brasil, apesar da reciclagem de pavimentos asfálticos estar em fase de crescimento, ainda são encontradas barreiras a serem superadas em termos de qualidade, regulamentação e conscientização dos impactos ambientais.

Diversas instituições e indústria de asfaltos vêm contribuindo com pesquisas que corroboram com a eficiência e qualidade na utilização do RAP como fonte alternativa para a construção de novos pavimentos.

A Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos (EMTU) de São Paulo foi a pioneira na utilização de reciclagens de material fresado no Brasil. Este fato ocorreu no final da década de 80, no recapeamento da Rodovia Anhanguera com adição de 50% de RAP contido na massa asfáltica. Conforme Castro Neto (2000), o pavimento aplicado na rodovia encontrava-se em excelente estado de preservação após 14 anos de vida útil.

As concessionárias de rodovias no Brasil vêm buscando alternativas para mitigar os impactos ambientais e o reaproveitamento de resíduos com alto valor agregado no que tange a qualidade, sustentabilidade e economia de pavimentos. Nesse contexto, em meados de 2022 na Rodovia Washington Luís, a concessionária Eixo SP fez a primeira aplicação no Brasil de mistura asfáltica com plástico pós-consumo em sua composição. Isso mostra a relevância na pluralidade de novas tecnologias brasileiras em diminuir os danos ambientais na construção de rodovias sustentáveis (Pimentel *et al.*, 2022).

É apresentada na Tabela 2 a quantidade estimada de material fresado, em toneladas, de diversas concessionárias rodoviárias nas regiões do sudeste e Sul, até o ano de 2021 (Suzuki, 2019).

Tabela 2 – Estimativa de RAP oriundo das rodovias do grupo CCR.

Concessionária	RAP (toneladas)					Total
	2017	2018	2019	2020	2021	
Nova Dutra	69.000	72.000	81.000	79.000	36.000	337.000
Rodonorte	157.000	101.000	60.000	4.000	14.000	336.000
SP Vias	3.000	56.000	80.000	3.000	20.000	162.000
Via Oeste	44.000	3.000	9.000	14.000	15.000	85.000
Rodoanel Oeste	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	20.000
Via Lagos	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	15.000
AutoBAn	8.000	29.000	30.000	32.000	33.000	132.000
Total	288.000	268.000	267.000	139.000	125.000	1.087.000

Fonte: Adaptada Suzuki (2019).

Com o intuito de corroborar a aplicabilidade das misturas recicladas a quente através de estudos e pesquisas no Brasil, serão apresentadas discussões relevantes ao tema, a saber:

- I. Rowe *et al.* (2015) conduziram um estudo em um projeto em Fort Wayne, Indiana, que utilizava altas proporções de material reciclado (próximas a 100%). O objetivo foi determinar as variações de desempenho de um segmento um ano após sua construção, em comparação com um pavimento de referência. A análise das misturas com altas proporções de RAP demonstrou que o desempenho desses pavimentos é similar ao desempenho observado em misturas convencionais. Este estudo também destaca algumas tendências de reciclagem em curso nos Estados Unidos, além de abordar alguns dos avanços recentes na reciclagem a quente com o uso de altas quantidades de RAP. Tal análise proporciona uma compreensão sobre o surgimento de tecnologias destinadas à elaboração de misturas recicladas com quantidades significativas de RAP, impulsionando a produção de misturas com fração superior a 70%. As proporções para utilizar o RAP podem variar de estado para estado e de localidade para localidade, dependendo das especificações locais e das políticas individuais dos Departamento de Transportes (DOT - Department Of Transport), que estabelecem suas próprias diretrizes quanto às porcentagens de RAP permitidas.
- II. Bohn (2017) em sua pesquisa com misturas mornas recicladas utilizou dois tipos de asfalto, um CAP 50/70 e outro AMP 60/85, com a inserção de dois teores de RAP (25% e 50%) e adoção de aditivo redutor de temperatura (Evotherm). Dessa forma, a autora evidenciou que as massas asfálticas com concentrações maiores de RAP revelaram um aumento significativo na rigidez. Em relação a resistência das amostras, foi constatado, que ao aumentar a incorporação de RAP os valores de RT e FN tiveram seu melhor desempenho com o AMP 60/85.
- III. Centofante *et al.* (2018) em seu trabalho com misturas recicladas a quente, buscaram analisar as propriedades mecânicas e de adesão dos constituintes das misturas. Em relação ao tipo de asfalto foi utilizado o CAP 50/70. Neste contexto, foram utilizadas misturas recicladas com teores de fresados que variaram entre 10% e 30%. Os resultados das misturas com fresados foram comparados com os resultados de uma mistura de referência que não continha material fresado, em

termos de durabilidade. Portanto, ao analisar a resistência a deformação permanente (FN) e a rigidez (MR), as misturas apresentaram no geral, um aumento significativo à medida que se adicionava o material fresado, dessa forma, foi possível afirmar que a rigidez da mistura aumenta conforme aumenta a quantidade de ligante envelhecido do fresado presente nela.

- IV. Suzuki (2019) revela em sua pesquisa, uma análise dos efeitos de diferentes concentrações de RAP na dosagem e o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente, tanto com quanto sem a utilização de agente rejuvenecedor. Dessa forma, foi possível constatar que o emprego de elevadas quantidades de RAP para camada de superfície apresentaram resultados satisfatórios. Entretanto, as usinas de asfaltos necessitam de adaptação para a inserção do RAP no processo de usinagem. Ainda, a autora mostrou em seu estudo que, não apenas o teor, mas as características do RAP influenciam intrinsecamente no comportamento das misturas recicladas. Em relação aos trechos experimentais, as misturas aplicadas não apresentaram defeitos na superfície do pavimento até o término do estudo.
- V. Correa (2020) conduziu uma pesquisa com o objetivo de avaliar o desempenho de misturas recicladas utilizando RAP de diferentes procedências, variados teores de incorporação, e com o uso de CAP 50/70 e CAP 60/85, além das misturas de controle. Para os ensaios de resistência nas misturas de FN e RT, os dados apresentaram valores elevados para ambos os ligantes, tendo o CAP 60/85 indicado a melhor performance. Já os resultados de MR e MD, demonstraram que o aumento do teor de ligante nas misturas contendo ligante 50/70 resultou em uma redução da rigidez. Em contraste, para as misturas com ligante 60/85, a adição de RAP teve um efeito discreto na rigidez, além disso, os resultados de MD corroboraram os resultados de MR, sendo os valores maiores de rigidez alcançados para as misturas com ligante 50/70, e a incorporação de 30% RAP nas misturas com ligante 60/85 aumentou a rigidez. Em relação aos resultados da fadiga, as misturas com ligante 60/85 indicaram um melhor desempenho, e adição de RAP reduziu levemente os valores encontrados. Dessa forma, a autora conclui mostrando que o teor de asfalto das misturas e o tipo de ligante virgem utilizado estão intrinsecamente ligados ao desempenho das misturas recicladas.

- VI. Luzzi *et al.* (2021) analisaram misturas asfálticas recicladas que incluíam a adição de RAP nas proporções de 0%, 10%, 20% e 30%. Em relação ao ligante modificado foi utilizado o CAP 60/85 e posteriormente avaliado o desempenho mecânico das misturas. Os resultados encontrados demonstraram um acréscimo conforme se aumentava o percentual de RAP, sendo em torno de 50% para o MR e aproximadamente 40% para o RT, quando comparado à mistura de referência. Além disso, ocorreu uma diminuição do ligante novo inserido, demonstrando ativação do CAP presente no RAP e conseqüentemente uma economia do CAP virgem adicionado de aproximadamente 17%.
- VII. Siqueira (2021) buscou em sua pesquisa incrementar uma taxa de 50% RAP sem agente rejuvenescedor e avaliou o comportamento mecânico das amostras. A fim de fundamentar seu estudo, o autor realizou uma simulação no software de dimensionamento de pavimentos MeDiNa com os dados de entrada obtidos da rodovia PE-017. Vale ressaltar, que os resultados gerados da mistura reciclada foram inseridos no software como camada de base asfáltica, mitigando assim critérios de degradação em função do clima e tráfego local. Dessa forma, evidenciou-se que a estrutura do pavimento com a camada de mistura reciclada atendeu todos os requisitos recomendados pelo método de dimensionamento MeDiNa, destaca-se para a área trincada de projeto de 30% em 10 anos.
- VIII. Torres *et al.* (2022) demonstraram que a inclusão de diferentes teores de RAP e de ligantes modificado com adição de óleo vegetal residual resultou em um desempenho mecânico satisfatório das misturas recicladas, o que comprova sua viabilidade técnica e ambiental. Além disso, a adição do óleo vegetal residual melhorou substancialmente a trabalhabilidade das misturas.
- IX. Monteiro *et al.* (2023) investigaram o comportamento mecânico de amostras asfálticas recicladas contendo altas proporções de RAP e comparou com as misturas convencionais com adoção de CAP 50/70 e ainda, agente rejuvenescedor. Dessa forma, as curvas granulométricas foram refinadas pelo método Bailey, sendo o método Superpave empregado para as dosagens. Os resultados demonstram que as misturas recicladas apresentaram comportamento mecânico similar ou superior às misturas convencionais. A rigidez da mistura com RAP, afetada pela seleção da curva granulométrica e pelos resultados do Módulo

de Resiliência, foi um ponto crucial para os autores. No geral, os resultados indicam que o RAP é uma alternativa viável em termos de durabilidade e sustentabilidade.

Em síntese, os pesquisadores concordaram de forma unânime em seus estudos que o acréscimo do teor de RAP nas amostras asfálticas contribui para o incremento da rigidez em critérios como MR, RT e MD. Eles indicaram que esse aumento decorre da presença do ligante envelhecido contido no RAP.

Embora pesquisas como as de Luzzi (2019) e Correa (2020) revelem que o aumento do teor de RAP nas misturas recicladas pode comprometer a resistência à fadiga, outros procedimentos possibilitam alcançar performance similar à de misturas convencionais. Portanto, faz-se necessário seguir algumas recomendações como caracterizar o tipo de RAP, adicionar agentes rejuvenescedores quando necessário, controlar os constituintes presentes na mistura, definir o tipo de ligante virgem para a mistura reciclada e da estrutura das camadas do pavimento.

Esses aspectos mostraram-se fundamentais para a determinação da resistência à fadiga (Correa, 2020). Entre os obstáculos a serem superados no que diz respeito à reciclagem de pavimentos no Brasil, faz-se necessário expandir estudos sobre o acréscimo de RAP nas misturas, estabelecer a infraestrutura das usinas de asfalto para a incorporação de RAP, validar novos aditivos rejuvenescedores e avaliar a interface entre o ligante virgem e o envelhecido.

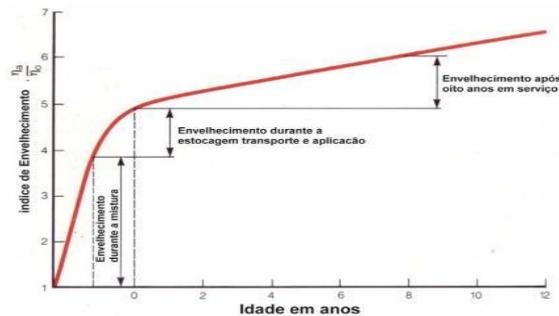
2.4. Envelhecimento dos materiais asfálticos

O desempenho de uma mistura asfáltica ao longo de sua vida útil, está ligada a capacidade de resistir às cargas dos veículos, ao envelhecimento do ligante e às condições do clima da região. Entre os principais fatores que afetam o desempenho de um revestimento asfáltico, cita-se o processo de oxidação do ligante asfáltico. Esse fenômeno, causa aumento na consistência da ligante e elevada rigidez no revestimento, diminuindo drasticamente a vida útil do pavimento (Morilha, 2004).

Diversos fatores influenciam envelhecimento do ligante asfálticos tais como exposição ao raio ultravioleta, altitude, variações de temperaturas e o principal, a presença de oxigênio (Silva, 2011).

Durante o processo de oxidação dos ligantes, a primeira etapa ocorre durante a usinagem, quando são expostos a altas temperaturas, fazendo com que parte da superfície fique em contato com o ar e envelheça até 60%. Os outros 40% do processo de oxidação acontecem durante o transporte, armazenamento, aplicação em pista e ao longo da vida útil do material (Silva, 2011). Na Figura 7 demonstra-se as etapas do envelhecimento para os ligantes.

Figura 7 - Etapas do envelhecimento do ligante asfálticos.



Fonte: Adaptada WHITEOAK (1990 *apud* Morilha Jr. 2004).

Com objetivo de realizar pesquisas que apresentem desempenho próximo do que acontece nas misturas asfálticas em serviço, é de suma importância emular o envelhecimento do ligante asfáltico e posteriormente analisar as características do material. Segundo Zegarra (2007) um ligante durante seu uso passa por três processos de análise de acordo com a especificação Superpave:

- i) Virgem, define-se as propriedades do ligante ao sair do parque industrial de uma refinaria ou de um distribuidor;
- ii) Envelhecimento a curto prazo, define-se pela exposição do ligante logo após a usinagem, transporte e aplicação da mistura asfáltica na pista;
- iii) Envelhecimento a longo prazo, define-se pela influência da radiação ultravioleta simulando o ligante por um período de até 10 anos em pista.

Para simular o envelhecimento no curto prazo, é o RTFOT, ou *Rolling Thin Film Oven Test*, ou teste da película delgada rotativa, já conhecido e que faz parte das especificações da ANP, a norma nacional que regulamenta este ensaio é a NBR 15235 (ABNT, 2009).

Inicia-se o teste com a introdução de 35 gramas de asfáltico em um recipiente de vidro, girando em um forno a 163°C por 75 minutos. Uma corrente de ar de 4 litros por minuto é introduzida no recipiente por um orifício, que atinge a amostra de asfalto a cada volta da placa com os recipientes. O endurecimento da película de asfalto é detectado por alterações no ensaio de penetração e no ponto de amolecimento, ou seja, há uma redução na penetração à medida que ponto de amolecimento aumenta. Fato este comprovado em diversas literaturas que correlacionaram a rigidez do ligante com os processos durante a usinagem da massa asfálticas (Bernucci *et al.*, 2006). Na Figura 8, ilustra-se uma estufa de RTFOT e por seguinte a moldagem das amostras empregadas na simulação do envelhecimento acelerado.

Figura 8 – Ensaio de envelhecimento de curto prazo no RTFOT.



Fonte: BR Distribuidora (2015).

Atualmente, é comum utilizar a simulação do envelhecimento de longo prazo com o vaso de envelhecimento pressurizado (Figura 9), visando simular o efeito da radiação solar nos ligantes asfálticos por um longo tempo. As amostras de asfaltos envelhecidas no forno do RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) são inseridas no PAV em recipientes rasos de aço inoxidável no vaso de pressão, por 20 horas aquecida e sob pressão de 2,10 MPa. Já a temperatura de envelhecimento que será utilizada durante o ensaio, é selecionada de acordo com o tipo de ligante asfáltico.

Após o envelhecimento no PAV, a amostra é submetida em uma estufa a vácuo para desaerar(VDO – Vacuum Degassing Oven), e em seguida destinada para ensaios reológicos (Bernucci *et al.*, 2006).

Figura 9 – Método de envelhecimento de longo prazo – PAV.



Fonte: Stratura Asfaltos (2022).

Até o momento, o equipamento PAV não faz parte das especificações do Brasil, assim, utiliza-se a norma R28 da AASHTO (2012).

Dada a importância das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos e dos efeitos do envelhecimento na vida útil das rodovias, a comunidade científica tem se dedicado ao estudo aprofundado desse fenômeno nas últimas décadas, com o intuito de estabelecer critérios de controle nas especificações desses materiais (Nascimento *et al.*, 2017).

Em síntese, o endurecimento do ligante asfáltico compatibilizado com a ação do tráfego, facilita o surgimento de trincas e a deterioração do pavimento (Roberts *et al.*, 1996). Portanto, faz-se necessário analisar o RAP para uma melhor compreensão das suas características no que diz respeito a um novo ciclo de vida da mistura asfáltica reciclada.

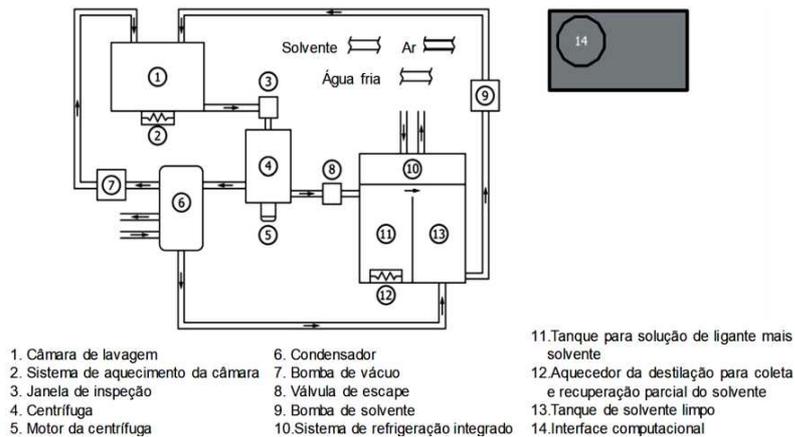
2.5. Extração e recuperação de materiais asfálticos

A fim de obter as características do ligante presente em uma mistura asfáltica, ou apontar o seu teor, utilizam-se métodos para a extração do ligante, separando-o dos agregados com o emprego de solventes e em seguida recuperando-o dessa mistura. Os solventes aplicados na extração devem ser removidos evitando que haja alterações nas características físicas que se espera analisar (Lima, 2003). O procedimento de extração de ligante é preconizado pela norma da NBR 16208 da ABNT (2013), possibilitando realizar a extração do ligante pelo Soxhlet, pelo Rotarex ou pelo refluxo duplo.

Ainda que empregado usualmente, os métodos de extração de betume podem gerar alterações nas propriedades do ligante recuperado. Mediante o exposto, obrigou os pesquisadores a buscarem alternativas que mitigassem a influência do operador e a variabilidade na definição do teor de asfalto. Assim, na década de 1990, foi criado um equipamento automatizado de sistema cíclico para a extração de ligantes. Esse método, chamado de extração automatizada, é preconizado pela norma D8159 da ASTM (2019), demonstrando maior consistência quando comparados a outros métodos, entretanto devido ao seu alto custo ainda é pouco utilizado (Pinheiro, 2021).

Na Figura 10 é ilustrada uma representação do sistema automatizado para extração de ligante.

Figura 10 – Representação da extratora automatizada de ligante.

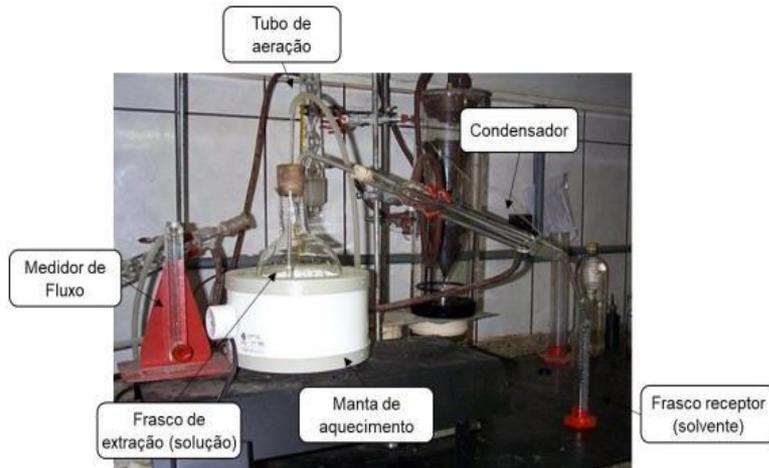


Fonte: adaptada D8159 (ASTM, 2019) – Pinheiro (2021).

Em relação a recuperação do ligante diluído com solvente existem 2 métodos, preponderantes são eles: Método de Abson e Método do Rotavapor.

O método de Abson, D1856 da ASTM (2021) é amplamente conhecido como o método mais utilizado para recuperar o ligante da mistura asfáltica (Figura 11). Esse procedimento define-se pela recuperação do ligante com o solvente, dentro de um frasco de extração que aquecido e simultaneamente é injetado dióxido de carbono (CO₂) na amostra com o material a ser extraído, o ligante. O método proporciona a eliminação do solvente a temperaturas menores, variando entre 149°C e 163°C, restando somente no final do procedimento o ligante asfáltico que deverá ser analisado. A dificuldade em recuperar o ligante por meio deste método está na sua remoção total do solvente e na prevenção da oxidação do ligante.

Figura 11 – Equipamento de recuperação para ligante Abson.

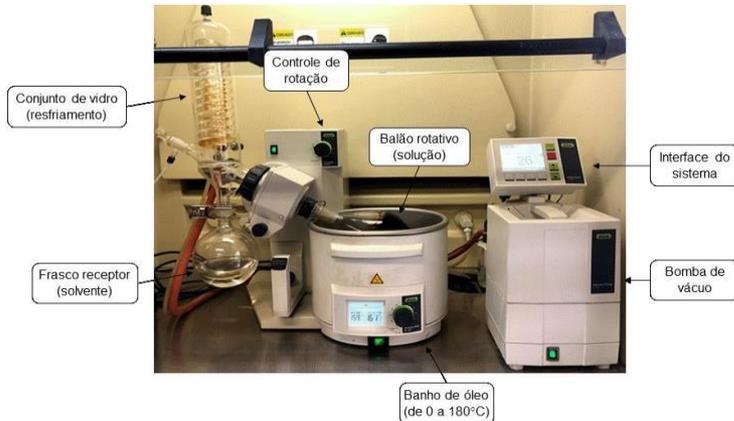


Fonte: Pinheiro (2021).

A recuperação de asfalto usando o aparelho denominado Rotavapor, D5404 da ASTM (2012) consiste em colocar no frasco de destilação, a solução de solvente e ligante que será aquecida por um banho de óleo quente. Em um sistema levemente com vácuo (Figura 12), injeta-se, simultaneamente um fluxo de nitrogênio (N₂) ou dióxido de carbono (CO₂), a fim de retirar o solvente da amostra e mitigar o envelhecimento durante o procedimento (Pinheiro *et al.*, 2022).

Em suma, o método do Rotavapor assegura uma melhor remoção do solvente e preserva ao máximo as características físicas do ligante recuperado. Importante frisar, que os métodos Abson e Rotavapor, possuem dependência intrínseca do operador, isto é, aumenta-se o risco de sazonalidade na caracterização da amostra recuperada (Pinheiro *et al.*, 2022).

Figura 12 – Estrutura do Rotavapor



Fonte: Pinheiro (2021).

2.6. Propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticos

É essencial entender as características do ligante extraído de amostras de RAP para analisar o impacto do ligante envelhecido em uma mistura reciclada e como isso afeta o desempenho do pavimento. Dessa forma, serão abordados dois métodos utilizados para classificar os ligantes asfálticos.

2.6.1 Propriedade física dos ligantes convencionais

Um dos parâmetros mais utilizados de classificação dos ligantes é a determinação da sua suscetibilidade térmica, por algum ensaio que meça de maneira direta ou indireta sua rigidez ou viscosidade em temperaturas variadas. Isso acontece, pois o ligante asfáltico em temperaturas elevadas se comporta como

fluido viscoso e em baixas temperaturas como sólidas quase elástica. Assim, todos os ensaios realizados para medir as propriedades físicas dos ligantes asfálticos possuem temperatura especificada e alguns também determinam sua velocidade de carregamento e tempo, visto que o ligante é um produto termo viscoelástico (Bernucci *et al.*, 2022). Dessa forma, conhecer os efeitos do ligante novo e envelhecido em uma mistura asfáltica possibilita ao projetista melhorar a performance dos parâmetros técnicos, bem como aumentar o ciclo de vida do pavimento.

No Brasil, as especificações preconizadas pela ANP para ligantes asfálticos convencionais e modificados por polímero, são baseadas em requisitos empíricos de acordo com a resolução N° 897 (ANP, 2022), o que pode não ser suficiente para garantir que o ligante asfáltico escolhido tenha um bom desempenho na mistura asfáltica. Alguns parâmetros da especificação como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e recuperação elástica, são considerados adequados para controle de recebimento do produto em obras, pois permitem diferenciar um ligante convencional de um modificado, e até diferenciar os tipos de CAP entre si com segurança. Entretanto, tais parâmetros não possuem nenhuma relação com o desempenho do ligante em serviço (Otaviano, 2017). Os equipamentos utilizados para os ensaios estão ilustrados na Figura 13.

Figura 13 – Equipamentos utilizados para caracterização.



(a) Penetração



(b) Ponto de amolecimento



(c) Recuperação elástica

Fonte: Stratura Asfaltos (2022).

2.6.2 Propriedade reológica dos ligantes asfálticos

O ligante asfáltico apresenta característica viscoelástica, o que implica que sua reação à aplicação de carga é uma combinação de comportamento elástico e viscoso. A forma como o ligante se deforma quando submetido à carga varia de acordo com o tempo de carregamento com temperatura, e ao remover a carga, o ligante recupera parcialmente essa deformação. Em temperaturas baixas, as propriedades elásticas predominam, enquanto em temperaturas elevadas, o ligante adota características líquidas. Em condições de temperatura típica para pavimentação, o ligante possui propriedade viscoelástica, demonstrando um comportamento tanto elástico quanto viscoso (Pires, 2018). Portanto, é imprescindível realizar estudos reológicos para aprofundar a compreensão sobre ligantes asfálticos.

O estudo das propriedades mecânicas e de fluxo de materiais é conhecido como reologia. Esse estudo inclui a análise do comportamento do asfalto perante tensões, deformações e variações de temperatura. No campo da pavimentação, a reologia do asfalto é essencial, pois possibilita a previsão do desempenho do material em diversas condições de tráfego e clima, facilitando a elaboração de misturas asfálticas mais resistentes e duráveis (Correa, 2021).

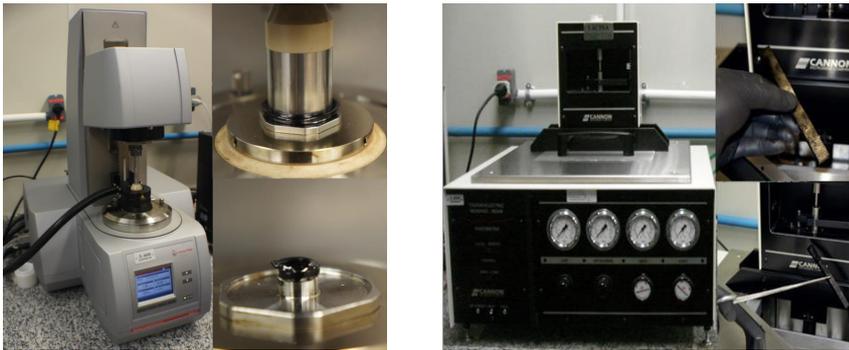
Buscando aperfeiçoar os métodos de desempenho dos materiais asfálticos, foi desenvolvido o programa de pesquisa rodoviária nos EUA no final da década de 80 denominado de SHRP (Strategic Highway Research Program, em inglês). Esse programa teve como objetivo avaliar as características fundamentais dos ligantes e das misturas asfálticas evitando defeitos precoces no pavimento relacionados a deformação plástica, fissuras a temperaturas baixas, oxidação, fadiga e danos por suscetibilidade térmica. Os dados obtidos com o programa resultaram na elaboração de uma nova especificação baseada em desempenho para ligantes, misturas e pavimentos asfálticos denominada Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) (Gouveia, 2002).

A especificação Superpave recomenda as temperaturas máxima e mínima que o ligante asfáltico deve resistir a 20 mm de profundidade na camada de revestimento ao longo da vida útil do pavimento. Assim, o nível de desempenho (PG – *Performance Grade*) de um ligante asfáltico é representado por dois números, por exemplo PG 64

-16, o primeiro número 64 é o grau a alta temperatura, ou seja, é a temperatura mais alta em que o ligante possui características físicas satisfatória a resistir a deformação permanente, por meio do ensaio de cisalhamento dinâmico realizado no DSR normatizado pela D7175 da ASTM (2015) e o segundo número -16 é referente ao grau a baixa temperatura, onde se analisam as trincas por contração de origem térmica, por meio do ensaio de flexão em viga a baixa temperatura realizado no reômetro de fluência de viga (BBR) preconizado pela norma D6648 da ASTM (2008) (Martins, 2014).

Os equipamentos DSR e BBR estão ilustrados respectivamente, na Figura 14 (a) e (b).

Figura 14 – Equipamentos utilizados na especificação Superpave.



(a) DSR com amostra de asfalto.

(b) BBR com amostra de asfalto

Fonte: Adaptada BR Distribuidora (2015).

Os ligantes são especificados pela norma M320 da AASHTO (2017), de acordo com os intervalos de temperatura em que demonstram atributos específicos definidos pelo seu PG apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação por desempenho do PG.

GRAU DE DESEMPENHO – PG	
TEMPERATURA ALTA (°C)	TEMPERATURA BAIXA (°C)
46	-34. -40. -46
52	-10. -16. -22. -28. -34. -40. -46
58	-16. -22. -28. -34. -40
64	-10. -16. -22. -28. -34. -40
70	-10. -16. -22. -28. -34. -40
76	-10. -16. -22. -28. -34
82	-10. -16. -22. -28. -34

Fonte: Especificação da M320 (AASHTO, 2017).

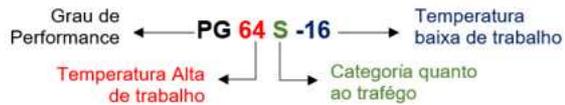
Visando aprimorar a classificação do PG, foi implementado a classificação de acordo como o tráfego e velocidade. Dessa forma, a especificação americana M332 da AASHTO (2014) indica a classificação de desempenho em função do tráfego (volume e/ou velocidade) por meio do ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR - *Multiple Stress Creep and Recovery*) preconizada pela D7405 da ASTM (2015), realizada no DSR e já normatizada pelo ME423 do DNIT (2020). Assim, é possível correlacionar os efeitos da deformação permanente apresentada pelo ligante com os resultados mecânicos de desempenho da mistura asfáltica. A classificação é definida conforme Tabela 4. A Figura 15 ilustra o exemplo de PG de um ligante com base no clima e no tráfego.

Tabela 4 – Classificação do ligante de acordo com o J_{nr} .

Limites $J_{nr\ 3.2}$ (KPa) $J_{nr\ diff}$ (%) < 75	Tráfego	
	Classificação	Eixo padrão (ESALs) e Velocidade Típica (km/h)
$2,0 < J_{nr} < 4,0$	S (Standard) - Padrão	< 10 milhões e velocidade superior (> 70km/h)
$1,0 < J_{nr} < 2,0$	H (High) - Pesado	> 10 a 30 milhões ou tráfego lento (20 a 70 km/h)
$0,5 < J_{nr} < 1,0$	V (Very High) - Muito pesado	> 30 milhões ou tráfego parado (< 20 km/h)
$0,0 < J_{nr} < 0,5$	E (Extremely High) - Extremamente pesado	> 30 milhões ou tráfego parado (< 20 km/h)

Fonte: Especificação M332 (AASHTO, 2014).

Figura 15 – Exemplo pela especificação Superpave baseada no clima e tráfego.



Fonte: Adaptada da M320 (AASHTO, 2017) e da M332 (AASHTO, 2014).

Uma técnica recente para estimar a resistência ao surgimento de trincas devido à fadiga no ligante asfáltico é o ensaio de LAS (Linear Amplitude Sweep) preconizado pela norma do ME439 (DNIT, 2022) este ensaio é realizado no DSR atingindo a fratura da amostra (Figura 16).

Figura 16 – Amostra de ligante fraturada ao término do ensaio LAS.



Fonte: Martins (2014).

Basicamente, o ensaio de LAS consiste em avaliar a resistência ao dano de ligantes asfálticos através da aplicação de carregamentos cíclicos com amplitudes de carga que aumentam de forma linear. Além disso, a resistência ao dano dos ligantes asfálticos é medida executando torções cíclicas entre as placas do DSR com o aumento da carga aplicada (Luz, 2019). Os resultados gerados desse ensaio são modelados segundo a mecânica do dano contínuo, modelo VECD (Viscoelastic Continuum Damage) e S-VECD (Simplified Viscoelastic Continuum Damage). Vale

ressaltar que não se tem uma especificação definida para este ensaio. Entretanto, Pimentel (*et al.*, 2019) propôs classificar o dano em diferentes níveis de severidade com base em dados laboratoriais, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetro sugerido de classificação do Fator de Fadiga do Ligante.

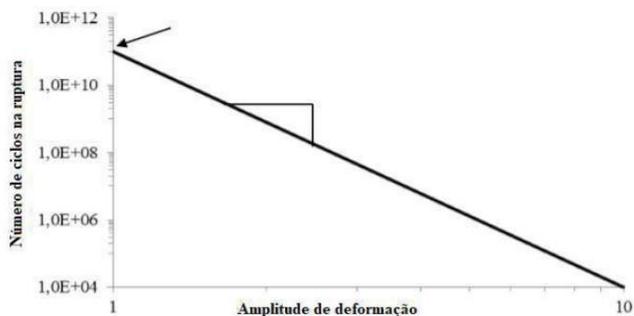
Classe	Nível	FFL (19°C)
1	Insatisfatório	$FFL < 1,22$
2	Razoável	$1,22 < FFL \leq 1,31$
3	Médio	$1,31 < FFL \leq 1,48$
4	Muito bom	$1,48 < FFL \leq 1,57$
5	Excelente	$FFL > 1,57$

Fonte: Adaptada Pimentel *et al.* (2022).

Martins (2014) em seu estudo demonstrou boas correlações entre os dados de resistência ao dano de ligantes e misturas, especialmente em relação aos fatores de fadiga correspondentes. Isso confirma que o modelo VECD (e S-VECD) é eficaz para determinar como os materiais suportam danos e a estimativa de sua vida útil em termos de fadiga.

Com base na teoria do VECD, foi construída uma curva de fadiga (Figura 17) que fornece informações detalhadas sobre o comportamento do ligante sob diferentes níveis de deformação e ciclos de carga. Por meio dessa curva, é possível a determinação do Número de Ciclos até sua Falha (Nf), indicando o limite de tráfego que o material pode suportar em relação à deformação aplicada, a qual depende das camadas do pavimento (Duarte, 2018).

Figura 17 – Curva de fadiga de ligantes.



Fonte: Duarte, (2018).

O ensaio de viscosidade rotacional preconizado pela NBR 15184 (ABNT, 2021) é utilizado para determinar as características de consistência dos ligantes asfálticos quando submetidos a altas temperaturas. Essas medições são essenciais para definir as etapas de preparação e compactação das misturas asfálticas. Além disso, a viscosidade controla as fases de bombear, estocar e misturar do asfalto, possibilitando a definição das temperaturas adequadas que garantem a trabalhabilidade do produto sem comprometer suas propriedades. Analisando o gráfico gerado por este ensaio, que correlaciona temperatura e viscosidade, é possível estabelecer as faixas de trabalho adequadas (Luzzi, 2019). A Figura 18 mostra um equipamento empregado na determinação da viscosidade rotacional com amostra.

Figura 18 – Equipamento Brookfield com amostra.



Fonte: Stratura Asfaltos (2022).

2.7 Dosagem das misturas asfálticas recicladas

Ao projetar uma dosagem asfáltica, busca-se o equilíbrio entre o teor de projeto de ligante e a melhor curva granulométrica, garantindo o desempenho adequado à mistura em termos durabilidade e desempenho (Otaviano, 2017).

Desse modo, as primeiras etapas para determinar a dosagem de uma mistura asfáltica recicladas são semelhantes, não importando o método utilizado. Essas etapas incluem a elaboração de um plano de amostragem do material, análise da granulometria do RAP com e sem ligante, definição do teor e a viscosidade do ligante envelhecido, bem como a definição das características dos ligantes e dos agregados (Lima, 2003).

De acordo com (Bernucci *et al.*, 2006) existem vários métodos de dosagem de mistura reciclada, sendo três apresentados de forma minuciosa:

- Dosagem do *Asphalt Institute* (1986): esse método recomenda a determinação da quantidade de asfalto tanto pelo método Marshall quanto o método Hveem para dosar misturas asfálticas tradicionais. Além disso, são adicionados procedimentos para a análise dos agregados e do RAP, a fim de garantir que a granulometria da mistura esteja dentro das faixas estabelecidas nas especificações do projeto. Também é avaliado o ligante envelhecido para determinar a necessidade de adicionar novo ligante ou rejuvenescedor, caso necessário (Lima, 2003). Por ser um método prático, o uso de solvente pode ter impacto nas características finais do ligante obtido a partir do RAP.

- Dosagem Castro Neto (2000): A determinação da dosagem baseia-se na metodologia Marshall sendo acrescentado parâmetros de característica mecânica das misturas como Resistência à Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR). Este método elimina a necessidade de extrair e caracterizar o ligante que está presente no RAP. Além disso, é aconselhável incluir 15% de ligante asfáltico novo no início dos estudos de dosagem.

- Dosagem Superpave: o processo de dosagem é realizado a partir da porcentagem de RAP que será incorporado a mistura asfáltica em três categorias, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Diretrizes de seleção de ligantes para misturas asfálticas recicladas.

Item	Classe recomendada para Ligante Virgem	RAP (%)
1	Sem alteração na seleção do ligante.	< 15
2	Selecione ligante virgem com baixa viscosidade. (Por exemplo: PG 58-28)	15 a 25
3	Siga as recomendações de cálculo do PG (ligante) da mistura.	> 25

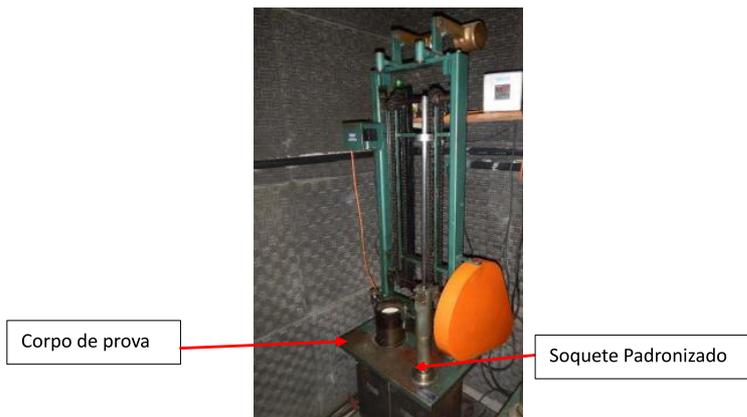
Fonte: Adaptada pela norma M323 (ASTHO, 2022).

Para cada uma dessas classes a dosagem realizada é distinta. Assim, a classe 1, a elaboração do projeto asfáltico seguirá as instruções específicas para misturas asfálticas novas. Já a classe 2, é considerado que o ligante virgem demonstre um desempenho (PG) menor quando comparado ao ligante extraído do RAP e a classe 3 terá suas variações avaliadas com base nos critérios do G^* (módulo de cisalhamento complexo) e δ (ângulo de fase), considerando as distintas quantidades entre os ligantes antigo e o virgem. A fração ideal será aquela que atender os requisitos para as condições de tráfego. Esses parâmetros estão preconizados pela norma M323 da AASHTO (2022). Entretanto, nesse estudo, procurou-se empregar o CAP 30/45, que possui uma consistência maior, uma vez que esse tipo de ligante é amplamente comercializado no Brasil.

Para projetos de misturas recicladas a quente no Brasil, o DNIT recomenda a utilização dos parâmetros estabelecido pela especificação ES031 do DNIT (2006). Essa norma, preconiza o ensaio Marshall ME043 do DNER(1995). Este método utiliza a transferência de energia para compactar os corpos-de-prova através de impacto, conforme soquete padrão ilustrado na Figura 19.

Desse modo, a mistura asfáltica analisada deverá atender os limites estabelecido pela especificação, com base nos requisitos de volumetria e estabilidade.

Figura 19 – Compactador por impacto Marshall.



Fonte: Adaptada Otaviano (2017).

2.7.1 Grau de interação entre o ligante envelhecido e o novo

• Definir o projeto de mistura reciclada é uma atividade desafiadora em virtude das condições do RAP, diante disso, é de suma importância compreender o nível de envolvimento entre o ligante envelhecido e o novo no que tange o processo de dosagem. Para esta situação foram estabelecidas três condições descritas por Doyle e Howard (2010):

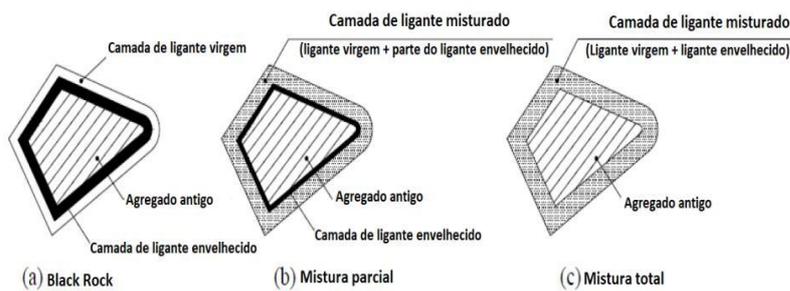
• mistura total: considera que os ligantes tanto o envelhecido e o novo se misturam de forma completa. Este processo também é conhecido por “full blending”;

• mistura parcial: Prevê que a mistura entre o ligante envelhecido e o ligante virgem seja parcial;

• Black rock: considera que não há miscibilidade entre o ligante envelhecido e o ligante novo, e o material fresado se comporta como um material inerte na mistura. Este processo também é chamado de agregado negro.

A Figura 20 ilustra as três condições de análise referente ao efeito entre o ligante envelhecido e o ligante virgem (novo).

Figura 20 – Grau de interação dos constituintes da mistura reciclada.



Fonte: Costa (2022).

A sinergia entre o ligante envelhecido e o novo crescem com o passar do tempo até que seja obtido um estado de mistura estável. Em decorrência das alterações no estado da mistura, pode haver variações no desempenho da mistura reciclada. Estudos revelam que a combinação de ligante envelhecido e novo, ou sua dispersão, pode ocorrer durante um período de 3 a 6 meses após a execução da pavimentação (Costa, 2022).

A concentração de ligante asfáltico presente no RAP continua sendo um tema de muitas pesquisas, e há preocupação com o impacto desse ligante recuperado em relação ao comportamento mecânico das misturas recicladas. É, portanto, primordial levar em conta a importância de realizar dosagens de misturas em laboratórios como ensaios de campo (Lo Presti *et al.*, 2019).

É importante ressaltar que ao analisar o nível de reativação do ligante envelhecido presente no RAP, busca-se considerar diretrizes específicas, especialmente aquelas associadas ao ligante asfáltico, a fim de assegurar que atendam às especificações requeridas. É relevante notar que tais diretrizes variam conforme o país.

Na Europa, utiliza-se a normativa EN 13108-1 que estabelece a metodologia para o projeto em modelos de misturas recicladas, baseada nas propriedades físicas de penetração e ponto de amolecimento entre o ligante do RAP e o ligante virgem (Almeida, 2022). Enquanto nos Estados Unidos, as agências de transporte estão fortemente envolvidas na implementação de suas próprias diretrizes. A parcela de ligante ativa contida no RAP varia entre 60% a 80% em alguns estados, enquanto outros aceitam atualmente 100% conforme estabelecido pela norma M323 da AASTHO (2022) (Grover, 2024).

2.8 Avaliação de desempenho das misturas asfálticas

Os testes de desempenho têm como objetivo investigar as propriedades das misturas asfálticas em laboratório, de modo a identificar parâmetros que possam ser relacionados com o desempenho real dessas misturas quando aplicadas em campo.

Esses testes envolvem o uso de ferramentas capazes de simular as tensões e deformações provenientes do tempo de carregamento do tráfego associada a níveis de temperaturas presentes nos pavimentos, bem como para identificar os mecanismos que influenciam a resistência, deformabilidade e a fadiga das misturas asfálticas (Medina *et al.*, 2015).

A combinação de ensaios destrutivos e não destrutivos fornece uma visão completa do desempenho do concreto asfáltico reciclado, como os ensaios de Resistência à Tração, Fadiga e Flow Number, que se baseiam nas propriedades elásticas e viscoelásticas dessas misturas, até ensaios empíricos que estabelecem correlações entre os resultados obtidos e o comportamento no campo (ensaio de estabilidade), além de ensaios não destrutivos, que se fundamentam nas teorias da mecânica dos materiais como os ensaios de módulos de Resiliência e Dinâmico (Lima, 2003).

Quando se realiza o dimensionamento de um pavimento, utiliza-se o chamado método mecanístico, que se fundamenta em princípios mecânicos. Nesse método, a análise estrutural do pavimento, que inclui avaliar as tensões, deformações e deslocamentos, é associada a parâmetros de dimensionamento previamente estabelecidos, a fim de prevenir os principais defeitos na pavimentação, como trincas por fadiga e deformações permanentes (Silva, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

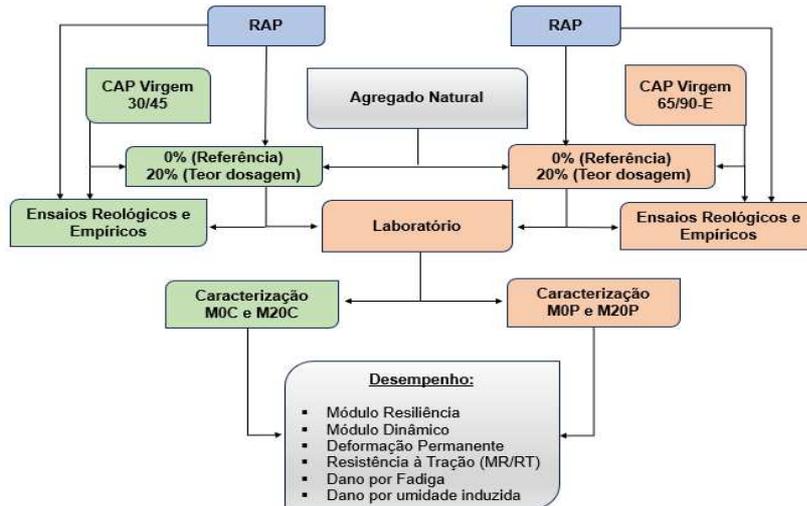
Este capítulo apresenta o planejamento da pesquisa, os materiais e os métodos laboratoriais. Detalha-se a quantidade de amostras testadas e as normas utilizadas para os testes realizados, além de apresentar os dados da dosagem Marshall, incluindo a volumetria e estabilidade. Cabe destacar que todos os ensaios foram conduzidos no laboratório da distribuidora Stratura Asfaltos conhecido como Centro de Soluções de Engenharia (CSE) situado na cidade de Paulínia/SP.

A elaboração da pesquisa em questão se desenvolve por meio das etapas a seguir:

- a) Propriedade dos materiais: seleção dos agregados, dos ligantes asfálticos e do material fresado (RAP);
- b) Definição das proporções nas misturas e dosagem;
- c) Moldagem dos corpos de prova;
- d) Realização de testes laboratoriais, abrangendo módulo de resiliência (MR), módulo dinâmico (MD), Flow Number (FN), Ruptura à tração (RT), dano por fadiga e perda por umidade induzida;
- e) Avaliação e debate acerca dos resultados.

Na Figura 21, ilustra-se um fluxograma da pesquisa.

Figura 21 - Fluxograma das misturas pesquisadas.



Fonte: Autor (2022).

No Brasil, a dosagem das misturas asfálticas é comumente realizada por meio de tentativas, utilizando como base uma faixa granulométrica de referência, especificamente a Faixa C ES031 do DNIT (2006), como adotado para este estudo. Dessa forma, buscou-se enquadrar a dosagem asfáltica com essa normativa nacional.

Segundo as diretrizes da especificação americana M323 da AASHTO (2022) para o concreto asfáltico reciclado, a seleção do ligante virgem passa por um processo criterioso considerando suas características de desempenho. Entretanto, neste estudo, em vez de empregar um ligante virgem com menor viscosidade, optou-se pelo ligante 30/45 e 65/90-E para analisar como o material fresado afeta o desempenho das misturas.

Deste modo quatro formulações de misturas asfálticas foram objeto de análise neste estudo, abrangendo tanto misturas de referência a quente com emprego de CAP 30/45 e CAP 65/90-E, quanto misturas com a incorporação de 20% RAP. Essas formulações foram denominadas de acordo com o material utilizado na mistura, como descrito na Tabela 7.

Tabela 7 – Nomenclatura e classificação das amostras pesquisadas.

Nomenclatura	Classificação das misturas	Tipos de ligantes
M0C	Referência	CAP 30/45
M20C	Reciclada	
M0P	Referência	CAP 65/90-E
M20P	Reciclada	

Fonte: Autor (2022).

Assim, o agregado virgem é parcialmente substituído por RAP em termos de peso (massa). A Tabela 8 apresenta os detalhes dos ensaios realizados e da quantidade de amostras moldadas para cada mistura.

Tabela 8 – Designação das amostras para ensaios mecânicos.

Ensaio	Dosagem por mistura	Total de amostras	Dimensão do CP (cm) (Diâmetro x Espessura)
MR/RT	4	12	10 x 6,3
MD	4	12	10 x 15
FN	4	12	10 x 15
Dano por Fadiga	4	60	10 x 6,3
Dano por umidade (DUI)	4	24	10 x 6,3
Total de amostras		132	

Fonte: Autor (2022).

Complementando as informações do ensaio de fadiga, foi investigada a relação entre o MR/RT como premissa para prevenir o aparecimento e a progressão de trincas por fadiga, conforme descrito na literatura (Bernucci *et al.*, 2006; Santos *et al.*, 2020).

3.1 Materiais

3.1.1 Agregados minerais

Empregou-se os agregados oriundos da Pedreira Basalto 6, localizada no município de Campinas/SP na rodovia SP 073, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Localização da Pedreira Basalto 6.



Fonte: Google Earth Pro, (2023).

A pedreira Basalto 6 é composta por rocha de classificação Gnaisses, de onde os materiais pétreos são obtidos de jazidas minerais por meio da britagem e comumente chamados de Brita "1", Pedrisco e Pó de pedra.

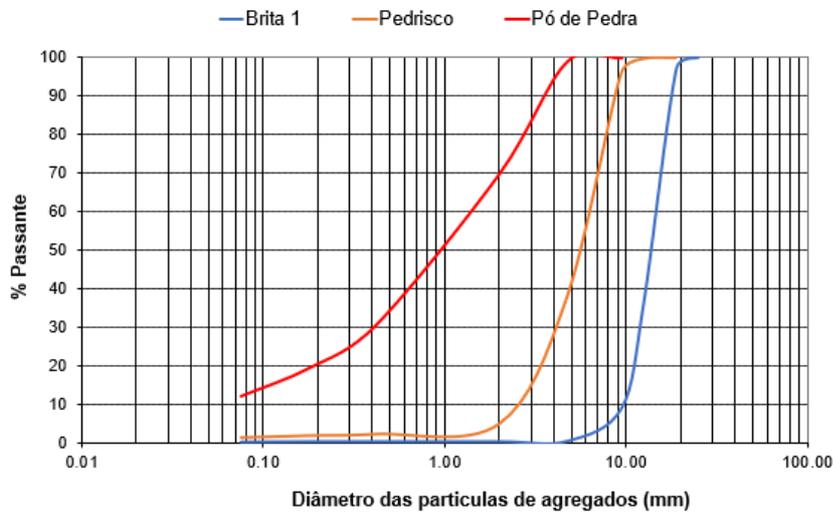
As frações dos agregados foram analisadas através de granulometria para a produção das misturas. Assim, a análise granulométrica foi conduzida conforme as diretrizes da norma ME83 DNER (1999), utilizando duas amostras de cada fração, e as médias encontradas estão apresentados na Tabela 9, juntamente com as curvas granulométricas obtidas na Figura 23.

Tabela 9 – Análise granulométrica das amostras de agregados.

Peneiras		Amostras (% Passante)		
#	mm	Brita 1	Pedrisco	Pó de Pedra
1"	25,00	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,00	97,3	100,0	100,0
1/2"	12,50	36,2	99,7	100,0
3/8"	9,50	9,3	96,1	100,0
4	4,75	0,6	37,9	99,1
10	2,00	0,5	5,1	69,9
40	0,42	0,5	2,5	30,8
80	0,18	0,5	2,1	19,6
200	0,075	0,4	1,6	12,2

Fonte: Autor (2022).

Figura 23 – Curva granulométrica dos agregados minerais.



Fonte: Autor (2022).

A fim de determinar algumas características físicas dos agregados, foram empregados ensaios adicionais, conforme detalhado na Tabela 10. Esses ensaios desempenharam um papel crucial na dosagem das misturas asfálticas.

Tabela 10 – Caracterização dos agregados minerais.

Ensaio	Método	Un.	Brita 1"	Pedrisco	Pó de Pedra
Abrasão Los Angeles	ME 035 (DNER/1998)	%	15,0	-	-
Equivalente de Areia	ME 054 (DNER/1994)	%	-	-	66,0
Adesividade do agregado graúdo	ME 078 (DNER/1994)	-	Satisfatório	-	-
Massa específica real (Gsa)	ME 081 (DNER/1998)	g/cm ³	2,764	2,740	-
Massa específica aparente (Gsb)		g/cm ³	2,738	2,705	-
Absorção		%	0,34	0,48	-
Massa específica real (Gsa)	AASHTO T 84/13	g/cm ³	-	-	2,754
Massa específica aparente (Gsb)		g/cm ³	-	-	2,642
Absorção		%	-	-	1,54

Fonte: Stratura Asfaltos (2022).

3.1.2. RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*):

De acordo com os dados fornecidos pela Pedreira Basalto 6, também responsável pelo envio do material fresado utilizado nesta pesquisa, este provém da remoção de revestimentos asfálticos já em estado deteriorado da camada. Este produto é constituído por uma mistura granular que inclui agregados grossos, finos, material de enchimento e ligante envelhecido, frequentemente chamado como RAP.

As amostras de RAP e agregados foram estocadas sobre uma superfície impermeável, resguardadas contra as condições climáticas e isentas de contaminações, conforme representado na Figura 24.

Figura 24 – Galpão de agregados minerais e RAP - Pedreira Basalto 6.



Fonte: Autor (2022).

Por meio de protocolo analisado internamente no laboratório da Straura Asfaltos, constatou-se que as amostras de RAP utilizadas nesta pesquisa apresentavam umidade inferior a 3%. Diante disso, essas amostras passaram por um processo de quarteamento e foram secas em estufa a 40°C por 18 horas, eliminando qualquer umidade remanescente.

Em razão da heterogeneidade do material fresado retirado da pista, a amostra de RAP foi sujeita a um procedimento de classificação na pedreira, utilizando a peneira de 19,1mm, com o objetivo de remover materiais de grandes dimensões e atender aos parâmetros especificados pela Faixa C do DNIT (2006). Assim, a porção que passou por essa peneira foi utilizada no desenvolvimento da pesquisa, de acordo com a Figura 25.

Figura 25 – Material fresado (RAP) classificado.



Fonte: Autor (2022)

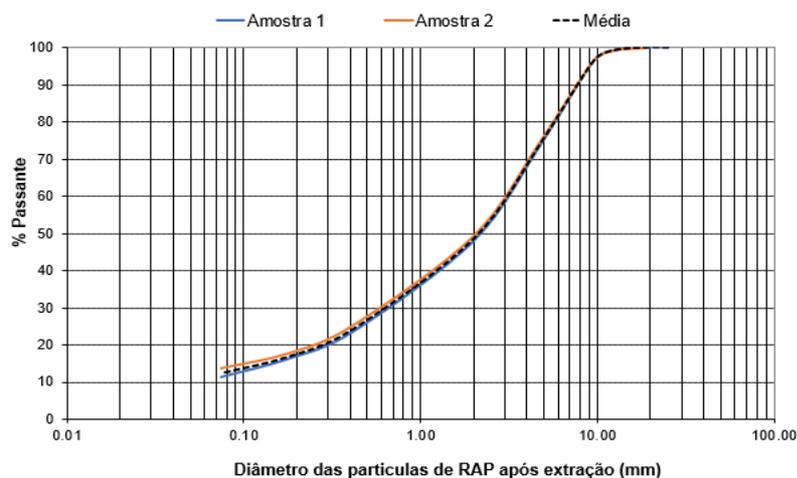
Foram conduzidos ensaios de extração de betume do material em duas amostras por meio do ensaio de Soxhlet, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 16208 da ABNT (2013), no qual os resultados indicaram uma média de 4,8%. Posteriormente, foi realizado o ensaio de granulometria Tabela 11 e determinada a curva granulométrica na Figura 26.

Tabela 11 – Resultado da extração e granulometria das 2 amostras de RAP.

Peneiras		% Passante		
#	mm	Amostra 1	Amostra 2	Média
1"	25,00	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,00	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,50	99,2	99,3	99,3
3/8"	9,50	96,3	96,4	96,4
4	4,75	73,7	74,6	74,2
10	2,00	48,0	49,3	48,7
40	0,42	23,7	25,3	24,5
80	0,18	16,3	17,7	17,0
200	0,075	11,4	13,7	12,6
Teor de Betume extraído (%)		4,7	4,8	4,8

Fonte: Straura Asfaltos (2022).

Figura 26 – Curva granulométrica do RAP.



Fonte: Stratura Asfaltos (2022).

A caracterização do CAP presente no RAP foi efetuada por meio do processo de recuperação do CAP pelo método Abson preconizado pela norma D1856 da ASTM (2021). Posteriormente, foram conduzidos testes no CAP recuperado, incluindo penetração a 25°C, ponto de amolecimento, recuperação elástica a 25°C, viscosidade Brookfield em três diferentes temperaturas e ponto de fulgor. A Tabela 12 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios.

Tabela 12 – Resultado da caracterização do CAP recuperado.

Ensaio	Método	Unidades	CAP recuperado
Penetração	NBR 6576 (ABNT, 2007)	0,1 mm	20
Ponto de amolecimento	NBR 6560 (ABNT, 2016)	°C	69
Recuperação Elástica	NBR 15086 (ABNT, 2022)	%	11,0
Viscosidade Brookfield 135°C			2500
Viscosidade Brookfield 150°C	NBR 15184 (ABNT, 2021)	cP	1030
Viscosidade Brookfield 177°C			308
Ponto de Fulgor, mín.	NBR 11341 (ABNT, 2014)	°C	>235

Fonte: Stratura Asfaltos (2022).

3.1.3 Ligantes asfálticos

Neste estudo, foi empregado dois tipos distintos de ligantes asfálticos seguindo a classificação da ANP (2022). O primeiro ligante é um CAP convencional 30/45 fornecido pela refinaria REPLAN, e é determinado pelo ensaio de penetração (PEN.), com valores que podem variar entre 30 e 45 dmm. O segundo ligante asfáltico utilizado é um CAP 65/90-E (modificado com um polímero elastomérico), que é classificado com base nos resultados do teste de ponto de amolecimento (P.A.) e do retorno elástico (R.E.). Para esse tipo de ligante, os resultados de P.A. e R.E. devem ser iguais ou superiores a 65°C e 90%, respectivamente. Este ligante foi produzido pela empresa Stratura Asfaltos. Ambos os ligantes foram coletados e analisados em laboratório.

A caracterização envolveu a análise da penetração e viscosidade, juntamente com a condução de outros testes normalmente recomendados para ligantes.

As Tabelas 13 e 14 contêm os resultados das amostras, juntamente com suas descrições detalhadas.

Tabela 13 – Resultado da caracterização do CAP 30/45.

Ensaio	Método	Unidades	Espec. ANP N°897	CAP 30/45
Penetração	NBR 6576 (ABNT, 2007)	0,1 mm	30 a 45	29
Ponto de amolecimento	NBR 6560 (ABNT, 2016)	°C	mín. 52	52,5
Recuperação Elástica	NBR 15086 (ABNT, 2022)	%	-	8,1
Viscosidade Brookfield 135°C			mín. 374	435
Viscosidade Brookfield 150°C	NBR 15184 (ABNT, 2021)	cP	mín. 203	219
Viscosidade Brookfield 177°C			76 a 285	78
Ponto de Fulgor, mín.	NBR 11341 (ABNT, 2014)	°C	mín. 235	>235
Densidade	ME 193 (DNER, 1996)	g/cm ³	-	1,004

Fonte: Stratura Asfaltos (2022).

Tabela 14 – Resultado da caracterização do CAP 65/90-E.

Ensaio	Método	Unidades	Espec. ANP N°897	CAP 65/90-E
Penetração	NBR 6576 (ABNT, 2007)	0,1 mm	40 a 70	69
Ponto de amolecimento	NBR 6560 (ABNT, 2016)	°C	mín. 65	67,5
Recuperação Elástica	NBR 15086 (ABNT, 2022)	%	mín. 90	92,0
Viscosidade Brookfield 135°C			máx. 3000	1347
Viscosidade Brookfield 150°C	NBR 15184 (ABNT, 2021)	cP	máx. 2000	643
Viscosidade Brookfield 177°C			máx. 1000	237,5
Ponto de Fulgor, mín.	NBR 11341 (ABNT, 2014)	°C	mín. 235	> 235
Densidade	ME 193 (DNER, 1996)	g/cm³	-	1,011

Fonte: Strutura Asfaltos (2022).

A seleção do ligante com polímero 65/90-E para este estudo, visa preservar a integridade das misturas asfálticas recicladas, especialmente quando sujeitas a deformações significativas. Isso contrasta com o comportamento mais dúctil observado no CAP 30/45, o qual, quando associado à rigidez elevada na mistura, é potencializado pela presença de ligante oxidado oriundo do RAP, resultando em um endurecimento adicional das misturas asfálticas recicladas. Portanto, em vez de empregar um ligante convencional com menor viscosidade, a escolha se deu pelo uso do ligante 30/45, visando examinar o impacto do RAP nas misturas em termos de dosagem e comportamento mecânico.

Em relação ao resultado encontrado no ensaio de penetração do CAP 30/45, observou-se uma leve discrepância na consistência do ligante. É importante destacar que esse ligante é produzido na REPLAN com uma penetração que se aproxima de seu limite mínimo, visando atender aos requisitos de viscosidade, especialmente a temperatura de 177°C. Além disso, esse comportamento não invalida automaticamente a amostra, já que o teste se fundamenta em um parâmetro empírico estabelecido pela ANP, embora não esteja diretamente relacionado ao desempenho do ligante. Assim, esse ensaio pode ser visto como apropriado para o controle de

recebimento do produto em obras, pois possibilita a distinção entre um ligante convencional e um modificado.

3.2. Método de elaboração das misturas asfálticas

Em um projeto de concreto asfáltico, a quantidade de ligante varia conforme o método de dosagem e é influenciada por características como a granulometria, o tipo de compactação (amassamento ou impacto), tipo de mistura e a temperatura de exposição do pavimento, entre outros fatores (Bernucci *et al.*, 2022).

No processo de preparação das dosagens asfálticas, a norma ME 043 do DNER (1995) foi empregada, e a dosagem foi conduzida seguindo a abordagem do método Marshall. A escolha dessa técnica decorre de sua ampla disseminação e do extenso conhecimento entre os profissionais de pavimentação no Brasil, simplificando a compreensão na elaboração de projetos e nos resultados obtidos. Com base nas granulometrias analisadas dos materiais granulares e do RAP, as curvas granulométricas das misturas asfálticas foram enquadradas dentro da faixa C, conforme estabelecido pela norma ES031 do DNIT (2006), e seus respectivos limites. Além disso, buscando manter a qualidade final das misturas produzidas em laboratório, elaborou-se as curvas granulométricas com características semelhante, de tal forma que evitasse influenciar no comportamento das misturas asfálticas, com e sem RAP. Além disso, a abordagem proposta para a incorporação de RAP, foi estabelecido um limite de 20% em massa para a quantidade de RAP a ser empregada nas misturas recicladas. Sendo assim, as composições escolhidas para cada mistura estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Composição dos materiais.

Materiais	CAUQ Referência	CAUQ Reciclado
RAP	0%	20%
Brita 1	21%	21%
Pedrisco	38%	26%
Pó de Pedra	41%	33%

Nomenclatura das Misturas estudadas M0C e M0P M20C e M20P

Fonte: Adaptada Stratura Asfaltos (2022).

Os resultados das frações granulométricas de cada composição são detalhados na Tabela 16 e visualizados nas curvas granulométricas apresentadas na Figura 27. Importante ressaltar que a especificado para a dosagem de CAUQ ES031 DNIT (2006), possui as mesmas diretrizes da norma ES033 DNIT (2005).

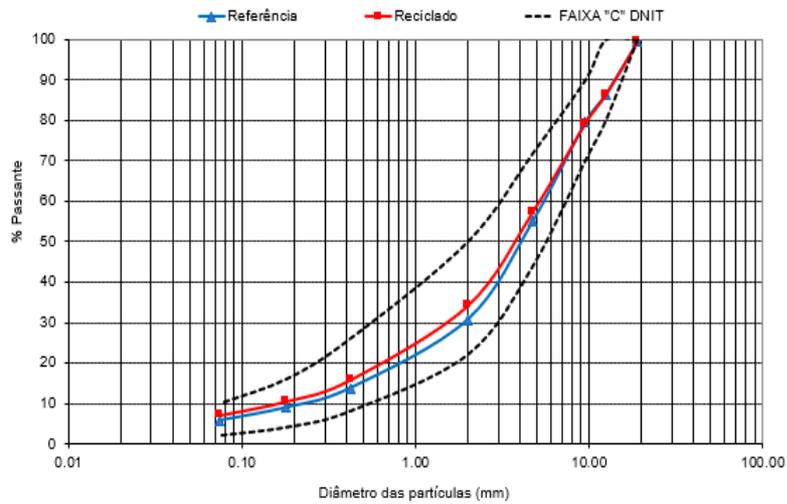
Tabela 16 – Distribuição granulométrica das misturas.

Peneiras		Distribuição Granulométrica (% Passante)			
		Dosagem		Faixa "C" DNIT	
#	mm	Referência	Reciclado	Mín.	Máx.
1"	25,00	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,00	99,4	99,4	100,0	100,0
1/2"	12,50	86,5	86,4	80,0	100,0
3/8"	9,50	79,5	79,2	70,0	90,0
4	4,75	55,2	57,5	44,0	72,0
10	2,00	30,7	34,2	22,0	50,0
40	0,42	13,7	15,8	8,0	26,0
80	0,18	8,9	10,5	4,0	16,0
200	0,075	5,7	7,1	2,0	10,0

Fonte: Adaptada Stratura Asfaltos (2022).

Ao examinar a curva granulométrica das duas misturas (Tabela 16), observou-se uma pequena fração que ficou retida na peneira de 3/4", fazendo com que as misturas ficassem limítrofes na especificação da faixa C do DNIT (2006). Portanto, visando preservar as características dos agregados da mesma Pedreira e considerando que a porcentagem retida era muito baixa, decidiu-se dar prosseguimento ao estudo.

Figura 27 – Curva Granulométrica de Referência e Reciclada.



Fonte: Adaptada Stratura Asfaltos (2022).

A metodologia Marshall consiste na confecção de corpos de prova com diâmetro de 10 cm e altura $6,35 \pm 1,3$ cm, mediante a aplicação de 75 golpes por face utilizando compactador Marshall.

Uma vez definidas as proporções dos agregados e os teores de ligante para a dosagem, é necessário estabelecer as temperaturas dos materiais durante o processo de mistura. Nesse contexto, as faixas de temperatura para a usinagem e compactação foram estabelecidas levando em consideração os dados de viscosidade dos ligantes. Na Tabela 17 apresenta-se as temperaturas dos materiais no decorrer da dosagem.

Tabela 17 – Temperaturas utilizadas na elaboração das dosagens.

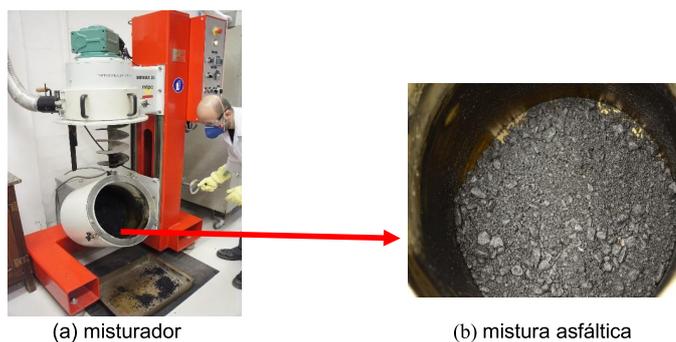
Ligante	Processos	Temperatura °C		
		Mín.	Máx.	Utilizado
CAP 30/45	Usinagem	154	159	158
	Compactação	143	147	145
CAP 65/90	Usinagem	162	170	168
	Compactação	146	153	152

Fonte: Adaptada da Stratura Asfalto (2022).

A mistura das amostras foi realizada em um misturador BBMAX 25 de fabricação francesa. Esse misturador foi programado para atingir a temperatura de mistura específica de cada ligante asfáltico pesquisado. Após o aquecimento prévio em estufa a temperaturas de 165°C e 176°C, respectivamente, para os materiais pétreos utilizados nas dosagens com CAP 30/45 e CAP 65/90-E, esses materiais foram misturados durante um minuto no BBMAX 25. Posteriormente, o ligante asfáltico foi adicionado, e a mistura foi rotacionada por mais 120 segundos. Nas composições que incluíam material de RAP, esse material era adicionado aos agregados virgens aquecidos que já estavam no misturador, a fim de atingir a temperatura necessária para a mistura. Isso ocorria porque o RAP havia sido previamente condicionado a 60°C após atingir equilíbrio térmico na estufa, simulando o aquecimento prévio em usinas com tambor secador específico para material reciclado, além de garantir a remoção da umidade.

A Figura 28 (a) mostra o misturador e a (b) a mistura asfáltica.

Figura 28 – Misturado BBMAX 25 com mistura asfáltica.



Fonte: Autor (2022).

Para simular o efeito do envelhecimento que a mistura asfáltica passa durante os processos de usinagem, transporte e aplicação, a mistura asfáltica de laboratório foi mantida em estufa por 2 horas na temperatura de compactação antes de ser compactada.

Por meio do método tentativa e erro, foram selecionados os teores para cada uma das misturas, sendo produzidos três corpos de prova para cada teor analisado. Amostras foram separadas e, utilizando o método Rice normatizado ME427 DNIT (2020), determinou-se a massa específica máxima (G_{mm}). Além disso, para cada teor, foram determinadas a massa específica aparente (G_{mb}) e determinado o volume de vazios, conforme Tabela 18.

Para este estudo, baseou-se o teor de projeto no volume de vazios (V_v), conforme as especificações do ES031 (DNIT, 2006) para ligantes convencionais e do ES385 (DNER, 1999) para ligantes modificados.

Tabela 18 – Determinação do teor ideal de ligante para as misturas estudadas.

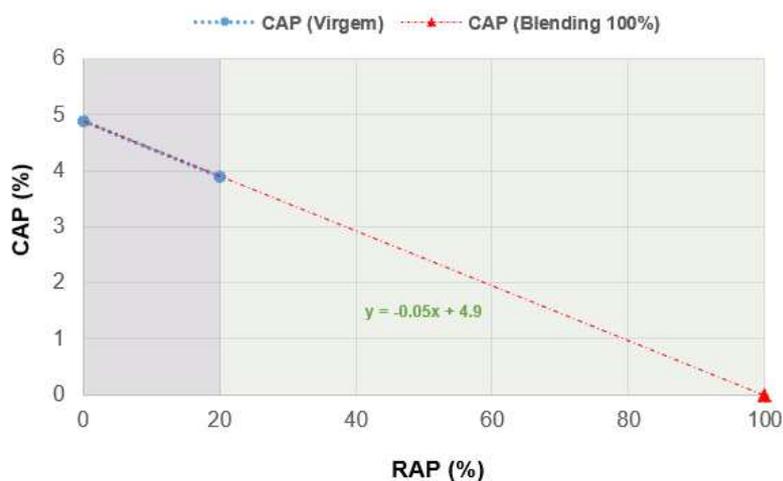
Ligante	Mistura	Teor de ligante	Gmm (g/cm ³)	Gmb (g/cm ³)	Vv (%)
CAP 30/45	Referência (MOC)	4,0	2,523	2,333	7,5
		4,5	2,504	2,347	6,3
		5,0	2,484	2,391	3,8
		5,5	2,465	2,381	3,4
CAP 65/90	Referência (MOP)	4,5	2,494	2,342	6,1
		5,0	2,475	2,378	3,9
		5,5	2,457	2,380	3,1

Fonte: Autor (2022).

Buscou-se neste estudo, encontrar o teor ideal de ligante asfáltico para cada mistura de referência, aproximando-o do centro das especificações mencionadas anteriormente, em 4% de volume de vazios. Esse processo envolveu a análise volumétrica das misturas com base na interpolação dos teores de ligante. Com base nos resultados, o teor de ligante de 4,9% foi aquele que melhor atendeu ao critério da especificação.

No preparo das composições asfálticas que utilizam material reciclado, o teor de CAP virgem foi calculado, levando em conta a completa ativação do ligante contido no RAP e a mistura dos materiais, tanto novos quanto envelhecidos (blending de 100%), conforme representado pela linha tracejada vermelha na Figura 29 para essa pesquisa. Portanto, todo o ligante proveniente do RAP (no caso, 4,8%) foi levado em consideração, resultando em uma redução na quantidade de ligante novo adicionado para alcançar o teor de ligante das misturas de referência de 4,9%. Assim, para as misturas contendo 20% de RAP, apenas 3,9% de ligante novo foi adicionado, já que a presença de 20% de RAP representa 0,96% do ligante naquelas misturas. No entanto, essa porcentagem foi arredondada para 1,0% buscando mitigar possíveis erros operacionais. A partir disso, foram confeccionadas amostras com três corpos de prova e, posteriormente, suas propriedades foram avaliadas.

Figura 29 – Teor de CAP virgem adicionado às misturas recicladas.



Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 19 estão os dados resumidos das misturas elaboradas com as proporções de ligantes proveniente do RAP e do ligante adicionado em cada mistura analisada.

Tabela 19 – Resumo dos dados das misturas.

Misturas	Teor CAP Adicionado (%)	Teor CAP proveniente RAP (%)	Gmm (g/cm³)	Gmb (g/cm³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estab. (Kgf)
M0C	4,9	0,0	2,487	2,387	4,0	15,8	74,5	1025
M20C	3,9	1,0	2,509	2,416	3,7	15,5	76,1	1309
M0P	4,9	0,0	2,478	2,376	4,1	15,7	74,0	1227
M20P	3,9	1,0	2,502	2,398	4,2	15,8	74,1	1596
Camada de rolamento					3 a 5	> 15	75 - 82	> 500

Fonte: Autor (2022).

Ao analisar os dados da Tabela 19, é possível perceber que as misturas M0C, M0P e M20P apresentaram, respectivamente, 74,5%, 74,0% e 74,1%, uma leve discrepância nos valores de RBV, situando-se próximas ao limite de aprovação para o requisito volumétrico de RBV, que varia entre 75% e 82%. Essa situação pode estar relacionada ao tipo de RAP utilizado. No entanto, apesar dessa diferença, as misturas se enquadraram em todos os outros parâmetros da especificação e serão submetidas a ensaios de desempenho. Portanto, as misturas foram validadas para prosseguir com esta pesquisa.

3.3. Estudo das propriedades das misturas asfálticas

Uma vez estabelecida a dosagem das misturas asfálticas, foram moldados corpos de prova para testes laboratoriais a fim de verificar o desempenho mecânico das misturas, passando por análises de rigidez, tenacidade a deformação e dano causado pela ação da água.

É importante destacar que as amostras empregadas nos ensaios de desempenho das quatro misturas propostas neste estudo foram produzidas no compactador giratório por amassamento, com o objetivo de garantir que os corpos de prova estivessem em conformidade com as condições estipuladas pelas normas técnicas atuais, respeitando de forma rigorosa a quantidade de asfalto determinada pela dosagem.

3.3.1 Ensaio de rigidez

Compreender a rigidez dos materiais do revestimento e das subcamadas é fundamental para analisar a integridade estrutural do pavimento, resultando em informações sobre as tensões, deformações e deslocamentos do sistema em camadas, como pavimentos, são impactados por cargas transitórias causadas pelo movimento dos veículos, gerando tensões verticais com formas de onda senoidais, entre outros padrões. A tensão aplicada na superfície é influenciada pela intensidade do carregamento (Bernucci *et al.*, 2022).

Com o objetivo de analisar a rigidez das misturas asfálticas, os testes empregados incluíram o Módulo de Resiliência (MR) e o Módulo Dinâmico (MD), visto que ambos os ensaios têm sido aplicados em diversas pesquisas e já possuem normas brasileiras. Sendo assim, esses ensaios serão delineados nos segmentos subsequentes.

a) Módulo de Resiliência (MR):

Para determinar a rigidez de uma mistura asfáltica utiliza-se o ensaio de Módulo de Resiliência (MR). Esse ensaio, é similar ao módulo de elasticidade, representando a relação entre a tensão aplicada e a deformação específica recuperável. A diferença entre os dois reside no método de determinação, pois o módulo de resiliência é estabelecido mediante a aplicação repetida de carga. Utilizando uma prensa adequada, os resultados são registrados por um software e calculados para obter o valor do módulo de resiliência (Pimentel *et al.*, 2022).

Para calcular o módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas neste estudo, seguiu-se a normativa ME132 do DNIT (2018), tendo como propósito avaliar o comportamento elástico de um material e sua capacidade de armazenar energia.

O ensaio de MR foi realizado na máquina Servo-Hidráulica Universal Cooper, modelo CRT-UTM-HYD-25-II, esta possui uma câmara com temperatura programável possibilitando a realização de varreduras de frequência/temperatura. As formas de onda precisas são geradas digitalmente e aplicadas pelo atuador, criando condições repetíveis semelhantes às geradas por veículos em movimento ou estático. O atuador, de dupla ação, permite a aplicação e medição de forças de compressão e tração pela célula de carga, com capacidade de 25 kN. Diversos sistemas estão disponíveis para medir o módulo de materiais, o que permite a avaliação da rigidez e das deformações dos materiais utilizados nas camadas asfálticas (Stratura Asfaltos, 2021). A Figura 30 ilustra o equipamento e o condicionamento da amostra para o ensaio.

Neste ensaio, foram empregados corpos de prova com diâmetro com cerca de 10 cm e altura de 6,3 cm, com a condição de apresentarem um volume de vazios de 4% tendo uma tolerância máxima de $\pm 1\%$. Em seguida, o corpo de prova é condicionado à temperatura de 25°C por no mínimo 4 horas, e posteriormente, posicionado no suporte onde os transdutores do tipo LVDT (*Linear Variable Differential*

Transducer) são acoplados. Assim, o MR é calculado a partir da aplicação de cargas repetidas, com uma duração de 0,1 segundo e um repouso de 0,9 segundo. Nesse processo, a amostra sofre deslocamento de tração, que são medidas por meio de dois LVDT's. A carga de ensaio adotada foi determinada como a menor possível para gerar deformação na amostra sem causar danos.

Figura 30 – Prensa Cooper 25 kN e ajuste dos LVDT's na amostra.



Fonte: Autor (2022).

b) Módulo Dinâmico (MD):

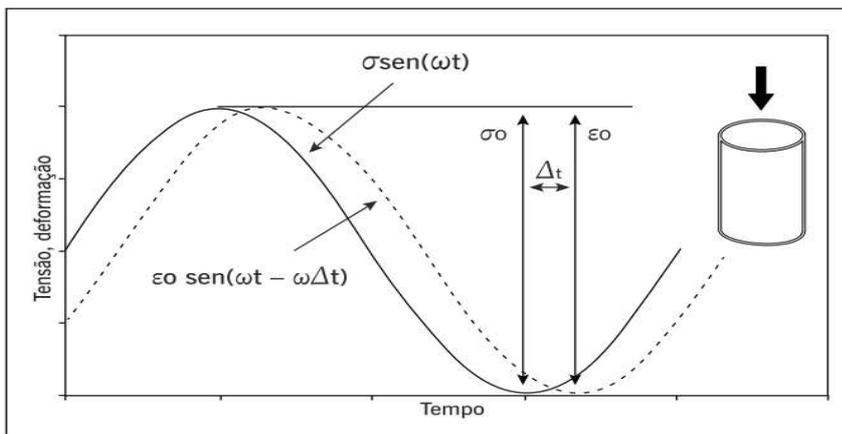
O Módulo Dinâmico foi mais um ensaio utilizado para investigar a rigidez das misturas asfálticas. Segundo Correa (2020), o ensaio permite avaliar o comportamento do material sob diferentes temperaturas e frequências, aplicando carga uniaxial senoidal em amostras cilíndricas. Durante esse processo, a rigidez e o ângulo de fase são determinados dentro da faixa de comportamento viscoelástico linear. Assim, a relação entre a amplitude da tensão e a deformação é estabelecida pelo Módulo Complexo (E^*), sendo seu valor absoluto denominado Módulo Dinâmico $|E^*|$. Além disso, o ângulo de fase (φ) da mistura asfáltica representa a diferença temporal entre a aplicação da carga e a resposta da deformação na amostra.

Dessa forma, o ângulo de fase determina uma das características viscosas do material, assumindo 0° para materiais puramente elásticos e 90° para materiais viscosos (Witczak, 2005).

No Brasil, a norma para a realização deste ensaio é a ME416 do DNIT (2019). Para executar este ensaio foi utilizada a prensa servo-hidráulica conhecida comercialmente como MTS *LANDMARK* 100 kN. Este equipamento possui uma câmara de temperatura que permite o condicionamento das amostras na temperatura do ensaio variando entre 4°C a 40°C . Além disso, essa máquina tem a capacidade de aplicar frequências a compressão, com variação entre 0,1 a 25 Hz, e suportar variações de cargas superiores a 25 kN.

Na Figura 31 é representado a defasagem entre a tensão e deformação após aplicação da carga.

Figura 31 – Representação da aplicação da carga cíclica e da resposta de deformação durante o ensaio, destacando o ângulo de fase.



Fonte: ME416 (DNIT, 2019).

Quanto aos corpos de prova (CP's), foram confeccionados com 10 cm de diâmetro e 15 cm de altura, apresentando um volume de vazios de 5,5% e tolerância admissível de $\pm 0,5\%$. Posteriormente, os CP's foram submetidos ao condicionamento na câmara de temperatura controlada.

Com o intuito de realizar o ensaio, cada corpo de prova foi munido de LVDT's., necessitando ser testado todas as combinações de temperatura e frequência de carregamento, começando da temperatura mais baixa e progredindo para a mais alta. Em cada nível de temperatura, são prescritos níveis específicos de carga a serem aplicados. O ensaio, a uma determinada temperatura, inicia-se com a frequência de carregamento mais elevada e é sucessivamente reduzido até atingir a mais baixa (Bernucci *et al.*, 2022). Na Figura 32 é apresentado o equipamento MTS e o corpo de prova com os aparatos para iniciar o ensaio.

Figura 32 – Equipamento MTS e amostra com os aparatos de medição.



Fonte: Autor (2022).

Visando atingir o estado viscoelástico linear, foi definida uma deformação alvo de 63 microstrain (μS), sendo aceitável uma variação entre 50 e 75 μS . Nessa faixa específica, a ausência de deformação plástica permite a preservação da integridade das misturas, tornando essa abordagem ideal para o estudo.

Após a conclusão do ensaio nas amostras, os dados experimentais são ajustados utilizando um modelo matemático. De acordo (Nascimento *et al.*, 2014), as curvas mestras são elaboradas com base nos resultados dos ensaios de módulo dinâmico (módulo e ângulo de fase), empregando o princípio da superposição tempo-temperatura (t-TS). As curvas obtidas foram ajustadas ao modelo sigmoidal, utilizando um polinômio de segunda ordem para adaptar os fatores de deslocamento (*shift factors*) à temperatura.

3.3.2 Ensaio de danificação

Neste tópico, serão delineados e explicados os ensaios conduzidos para avaliar a danificação das misturas asfálticas. Para essas análises, as amostras foram submetidas aos ensaios de Flow Number (FN), Resistência à Tração (RT) e Fadiga por Compressão Diametral.

a) Flow Number (FN):

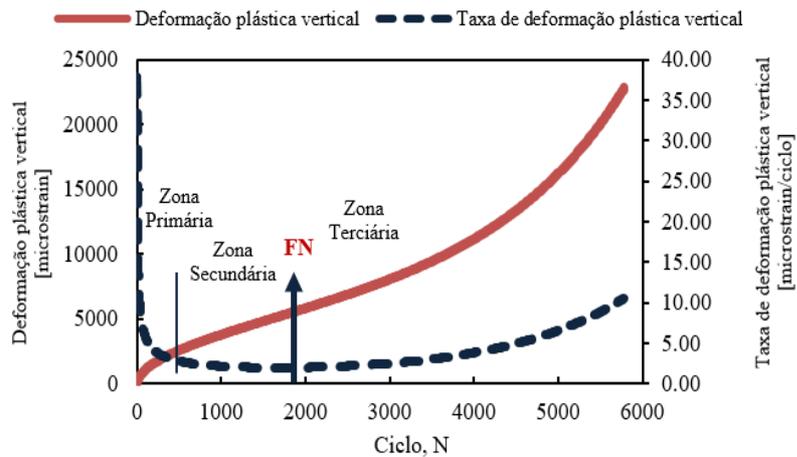
Atualmente, o ensaio uniaxial de carga repetida Flow Number (FN) tem sido empregado como critério de desempenho para avaliar a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. Esse ensaio é normatizado pela ME184 do DNIT (2018) e adotado pelo novo Método de Mecânico-Empírico de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) como requisito de desempenho.

Para determinar o Flow Number, utilizou-se uma máquina de teste MTS com temperatura controlada a 60°C, que teve como objetivo quantificar a deformação permanente acumulada em um corpo de prova moldado com um volume de vazios de 7% e tolerância de $\pm 0,5\%$ com dimensões de diâmetro e altura de 10 cm e 15 cm, respectivamente. Nesse procedimento, aplica-se uma carga de compressão de 1600N no corpo de prova por 0,1 segundo, seguida por um período de repouso de 0,9 segundo. Essa ação gera uma tensão de 204 KPa no material. Durante todo o ensaio, uma carga de contato equivalente a aproximadamente 5% da carga máxima é mantida (aproximadamente 10,2 KPa).

Na Figura 33, é possível observar três zonas distintas em que uma curva específica da função de fluência é estabelecida para uma determinada mistura asfáltica, sendo categorizadas como primária, secundária e terciária. Assim, na zona primária, ocorre uma taxa de deformação de forma progressiva, posteriormente passa-se para a zona secundária onde a deformação é constante e em seguida a deformação aumenta abruptamente com o tempo indicando a ruptura do material.

Dessa forma, o ensaio é concluído com 7.200 ciclos (em torno de duas horas) ou até que seja verificado o colapso do corpo de prova, indicando a transição para a zona terciária.

Figura 33 – Zonas da curva de deformação plástica e obtenção do FN.



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

Na Figura 34 demonstra-se o corpo de prova integro (antes do ensaio) e ao final em ruptura total.

Figura 34 – Corpos de prova integro e em ruptura total.



Fonte: Autor (2022).

b) Resistência à tração por compressão diametral (RT):

Na análise de misturas asfálticas, a resistência à tração (RT) se destaca como um indicador fundamental de seu desempenho (Bernucci *et al.*, 2022).

No teste de RT, uma carga estática é aplicada gradualmente em duas geratrizes opostas em um corpo de prova cilíndrico, alongando-o e gerando tensão até sua ruptura. Esse ensaio é preconizado pela norma do ME136 do DNIT (2018). A Figura 35 mostra a prensa automática utilizada neste ensaio com amostra.

Figura 35 – Prensa automática com amostra.



Fonte: Autor (2022).

Destaca-se a utilização dos mesmos corpos de prova tanto no ensaio de RT quanto no ensaio de MR, possibilitando uma análise mais completa das propriedades do material.

c) Dano por fadiga a compressão diametral:

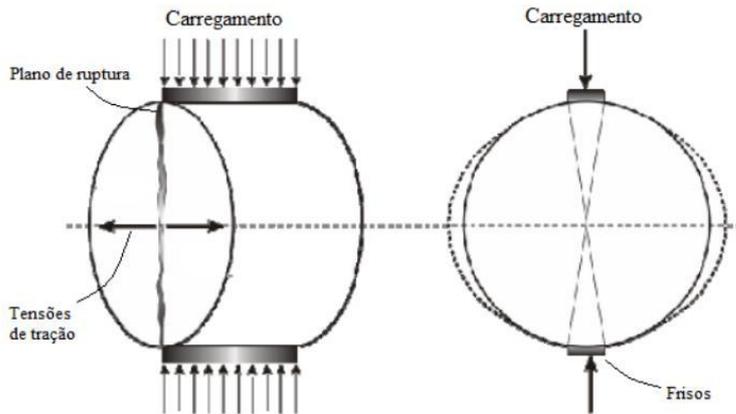
A Fadiga é um fenômeno caracterizado por uma alteração estrutural permanente, gradual e concentrada em um ponto específico da amostra, submetido a variações nas amplitudes das tensões. Essas tensões resultam na formação de fissuras, as quais, ao longo de um determinado número de ciclos, culminam na ruptura total do material (Bernucci *et al.*, 2022). Esse fenômeno tem sido objeto de estudo há anos, e ainda representa um desafio significativo para a engenharia rodoviária em termos de compreensão e modelagem precisas.

Portanto, para avaliar a resistência à fadiga das misturas desse estudo, utilizou-se o ensaio de fadiga sob compressão diametral à tensão controlada, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma ME183 do DNIT (2018). Neste teste, a tensão aplicada ao material permanece inalterada ao longo do tempo, enquanto a carga é aplicada e removida ciclicamente a cada segundo, com 0,1 s sob carga e 0,9 s em repouso em um corpo de prova cilíndrico.

Durante esse processo, as tensões de tração se desenvolvem de maneira indireta, agindo no diâmetro perpendicular à carga aplicada, como consequência do carregamento, uma condição de ruptura se forma e se propaga ao longo do diâmetro. (Mocelin, 2018).

Na Figura 36 ilustra-se as tensões no centro da amostra de um CP cilíndrico.

Figura 36 – Ilustração das tensões no centro do CP.



Fonte: Mocelin (2018).

Além disso, será realizada uma simulação da ativação média do ligante no RAP (Grover, 2024). Esse valor médio de ativação é calculado com base em dados relativos às volumetrias da mistura asfáltica e dos agregados, além de técnicas que possibilitam analisar a variação da área superficial dos materiais. Para isso, foram investigados modelos de fadiga que pudessem estimar de forma adequada o desempenho dos materiais asfálticos considerando a ativação do ligante no RAP em 100% e 60%. Nesse sentido, optou-se por empregar o Modelo do Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004), o qual é conhecido por ser um modelo laboratorial calibrado.

De acordo com Rossato (2015), a calibração do modelo da AASTHO (NCHRP, 2004) foi realizada utilizando informações e dados observados ao longo do tempo em 82 trechos experimentais distribuídos em 24 estados dos Estados Unidos e do Canadá. A maioria desses trechos faz parte do programa LTPP (Long Term Pavement Performance), que envolve o monitoramento e a instrumentação de várias seções de estradas americanas, visando criar um amplo banco de dados sobre as propriedades e o desempenho dos pavimentos.

Assim, o modelo proposto pela AASHTO, conforme descrito no NCHRP (2004), foi desenvolvido com base no modelo do *Asphalt Institute* (1982). Esse modelo introduziu uma revisão nos coeficientes n_1 , n_2 e n_3 , realizada por meio de otimização numérica e outras formas de comparação de dados. O aspecto distintivo deste modelo em comparação com outros reside na inclusão da espessura da camada de revestimento como um fator influente no mecanismo de falha por fadiga, representado na equação pelo parâmetro k_1 (ROSSATO, 2015).

Uma outra característica do modelo é a inserção dos dados obtidos no ensaio de módulo dinâmico, realizado nas amostras a uma temperatura e frequência (Hz) específicas. Isso permite que essas informações sejam integradas ao modelo, possibilitando, em seguida, a realização de simulações. Portanto, a equação 1 apresenta o modelo de previsão.

$$N_f = 0,00432 \cdot k_1' \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \cdot \left(\frac{1}{E^*}\right)^{1,281} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

$C = 10^M$;

$$M = 4,84 \left(\frac{V_{asf}}{V_{asf} + V_{ar}} - 0,69 \right);$$

V_{asf} = Teor de asfalto em volume na camada asfáltica;

V_{ar} = Volume de vazios com ar na camada asfáltica;

N_f = Número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

ε_t = Deformação específica de tração da camada asfáltica, em cm/cm

E^* = Módulo dinâmico da camada asfáltica, em psi.

Neste contexto, o parâmetro k_1 foi incluído no modelo com o objetivo de estimar uma correção no dano por fadiga devido à influência da espessura da camada asfáltica. Esse parâmetro pode ser calculado utilizando duas expressões diferentes, dependendo da direção do trincamento. Se o trincamento começar na parte inferior da camada de asfalto, a Equação 2 é recomendada:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02-3,49.hac)}}$$

(Eq.2)

Caso o trincamento ocorra de forma oposta, da superfície para o interior da camada asfáltica, utiliza-se a Equação 3:

$$k'_1 = \frac{1}{0,0001 + \frac{29,844}{1 + e^{(30,544-5,7357.hac)}}$$

(Eq.3)

Onde:

hac = é a espessura total da camada asfáltica.

3.3.3. Ensaio de dano por umidade

Neste item, será detalhado o ensaio de Dano por Umidade Induzida, visando compreender o comportamento de misturas asfálticas em face da ação prejudicial da água sob condições severas de temperatura. Este ensaio tem como objetivo identificar a qualidade da adesão e coesão entre os constituintes da mistura asfáltica pesquisada:

a) Dano por umidade induzida (DUI):

Para determinar a influência da umidade na vida útil e nas propriedades de misturas asfálticas, amostras são submetidas a um processo acelerado de degradação por umidade em condições controladas de laboratório. Esse efeito é obtido por meio do condicionamento acelerado e da saturação dos corpos de prova, seguindo a norma ME180 do DNIT (2018).

Para realizar o teste, são produzidos seis corpos de prova da mistura asfáltica pesquisada, cada um com uma porcentagem de vazios em torno de 7% com tolerância admissível de $\pm 1\%$ e dimensões de altura e diâmetro, 6,4 cm e 10 cm, respectivamente.

Esses seis corpos de prova são posteriormente divididos em dois grupos iguais, totalizando três corpos de prova em cada grupo. Sendo que o primeiro grupo é submetido ao ensaio de tração por compressão diametral, conforme estabelecido pela norma ME136 do DNIT (2018), com o objetivo de avaliar a resistência à tração (RT).

Já o segundo grupo é exposto a um condicionamento rigoroso com umidade controlada entre 55% e 80% de saturação e temperatura variável entre -18°C e 60°C . Após essa etapa, as amostras foram submersas em água a 25°C até atingirem o equilíbrio térmico. Passado todas as etapas supracitadas, os corpos de prova são submetidos ao ensaio de compressão diametral para avaliação da resistência à tração (RT). Na Figura 37 ilustra-se os processos realizado no ensaio desde a saturação até o rompimento das amostras.

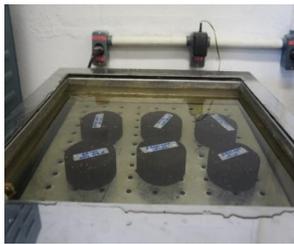
Figura 37 – Etapas de condicionamento das amostras até ruptura.



(a) Saturação da amostra



(b) Condicionamento a -18°C



(c) Imersão em banho com a temperatura



(d) Ruptura da amostra

Fonte: Autor (2022).

O resultado será representado pela resistência à tração retida, que é a relação entre a média da resistência à tração dos corpos de prova submetidos ao condicionamento e aqueles não condicionados. Tradicionalmente, uma razão superior a 0,7 é considerada um resultado satisfatório, conforme especificação ES 031 (DNIT, 2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo 4, os resultados dos ensaios com ligantes asfálticos e misturas asfálticas serão apresentados e analisados, revelando suas propriedades e características de desempenho.

4.1 Avaliações dos ligantes asfálticos

Os resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14 referentes aos ligantes CAP 30/45 e CAP 65/90-E satisfazem os requisitos estabelecidos pela resolução da ANP n° 897 (ANP, 2022). No entanto, é importante observar que, nos ensaios de penetração, os resultados foram limítrofes aos limites especificados. Quanto ao ligante recuperado do RAP, conforme apresentado na Tabela 12, o resultado indica uma baixa penetração e uma viscosidade Brookfield elevada, evidenciando uma forte rigidez dentre os ligantes estudados, o que já era esperado.

Importante salientar, que as propriedades viscoelásticas presentes nos ligantes asfálticos são transmitidas ao revestimento asfáltico, o qual é um material viscoelástico termossensível. Conseqüentemente, quando submetido a cargas em velocidades mais altas, o ligante asfáltico exibe um comportamento quase elástico. Por outro lado, sob cargas aplicadas a velocidades mais baixas, observa-se predominantemente um comportamento viscoso. Portanto, entre esses dois casos extremos, o comportamento é caracterizado como viscoelástico, dependendo do nível de deformação e da temperatura (Bohn, 2017).

Considerando as propriedades do material RAP, é importante analisar determinadas diretrizes e considerações ao aumentar o teor de incorporação, especialmente aquelas relacionadas ao ligante asfáltico, para garantir o cumprimento em partes da especificação da M323 da AASHTO (2022). Portanto, para porcentagens de 20% de RAP, é recomendável escolher um ligante com uma classificação mais baixa nas temperaturas críticas, tanto alta quanto baixa.

Sendo assim, optou-se por utilizar os ligantes 30/45 (PG 64-16) e 65/90 (76-22), uma vez que esses produtos são tradicionalmente empregados no setor rodoviário.

A partir dessas considerações, incluímos neste estudo a especificação Superpave (PG e MSCR), a qual utiliza critérios associados ao desempenho durante a vida de serviço dos materiais. Sendo assim, foram realizados ensaios na amostra de RAP, nos ligantes de convencional (M0C) e modificado por polímero (M0P), além dos ligantes recuperados das misturas recicladas (M20C e M20P). Os resultados estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultado reológico dos ligantes asfálticos.

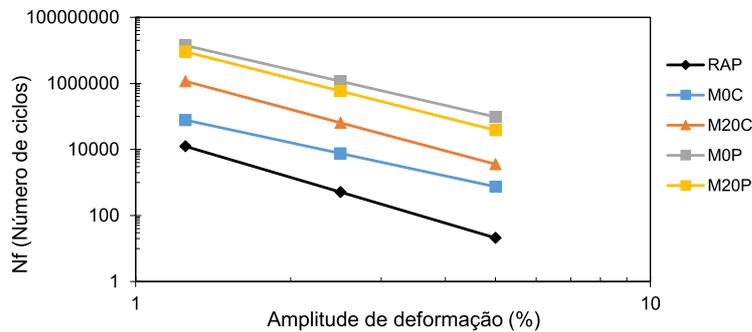
RESULTADOS REOLÓGICOS							
PERFORMANCE GRADE (PG)							
Ensaio - RTFOT	Método	Unid.	RAP	M0C	M0P	M20C	M20P
PGH (+)	ASTM D 7175/15	°C	88	64	76	70	76
PGH - TRUE		°C	89,6	69,8	77,5	72,8	77,1
PGH - G*/sen δ 64°C		KPa	2,648 0	2,2100	2,3726	3,0682	2,4609
PGL (-)	ASTM D 6648/18	°C	-22	-16	-22	-22	-22
BBR - Rigidez Estática S		Mpa	203	107	66,2	144	107
m-Value		MPa/s	0,327	0,367	0,362	0,315	0,328
MSCR							
Ensaio	Método	Unid.	RAP	M0C	M0P	M20C	M20P
MSCR Jnr (3,2 KPa) – 64°C	ME 423 (DNIT, 2020)	1/KPa	0,05	1,8918	0,1127	0,6659	0,1699
% Rec. Média (3,2 KPa)		%	38,47	1,05	86,62	9,51	57,75
LAS							
Ensaio	Método	Unid.	RAP	M0C	M0P	M20C	M20P
LAS	ME 439 (DNIT, 2022)	FFL	1,024	1,320	1,989	1,637	1,916
ESPECIFICAÇÃO SUPERPAVE							
Determinação	Norma	Unid.	RAP	M0C	M0P	M20C	M20P
Performance Grade (PG)	AASHTO M 320/17	°C	88-22	64-16	76-22	70-22	76-22
MSCR	AASHTO M 332/14	Classe	E	H	E	V	E

Fonte: Stratura Asfaltos (2022).

A partir dos resultados obtidos na Tabela 20, verificou-se que o tipo de ligante asfáltico com adição de RAP, exerce forte efeito nas características dos ligantes recuperados das misturas. De maneira geral, as misturas com ligantes modificados por polímero M0P e M20P, quando comparadas com as feitas com ligantes não modificados M0C e M20C, apresentaram PG mais elevados, indicando maior resistência à deformação permanente, com valores menores de J_{nr} , sendo compatível com tráfego extremamente pesado (E) a 64°C. Importante destacar que o ligante extraído do RAP demonstrou uma elasticidade significativa durante o ensaio de MSCR, sugerindo, em tese, a presença de alguma porcentagem polimérica no material fresado.

O ensaio LAS fornece dados que permitem a aplicação do princípio VECD (Dano Contínuo Viscoelástico) para a construção de uma curva de fadiga. Essa curva fornece informações sobre o comportamento do ligante asfáltico em relação à deterioração sob temperaturas intermediárias, considerando uma ampla faixa de deformações e ciclos de carga. Através dessa curva, é possível calcular o Número de Ciclos até a Falha (Nf), que indica o volume de tráfego que o material pode suportar para uma determinada deformação, a qual depende das camadas que compõem o pavimento (Duarte, 2018). Assim, os resultados de Nf foram calculados para deformações de 1,25%, 2,5% e 5,0%. Na Figura 38 abaixo são apresentados os resultados.

Figura 38 – Variação no número de ciclos até a ruptura em relação à amplitude de deformação para os ligantes asfálticos estudados.



Fonte: Autor (2022).

Em todos os níveis de deformação, ficou evidente que o ligante proveniente do RAP (asfalto envelhecido) apresentou valores menores de Nf em comparação com os outros materiais, o que era esperado devido à sua alta rigidez. Os ligantes recuperados das misturas que com RAP demonstram ter uma influência significativa nos resultados de Nf. Para uma deformação de 1,25%, o número de ciclos é consideravelmente mais alto, e as amostras M0P e M20P apresentaram uma vida de fadiga semelhante quando comparadas com as amostras M0C e M20C. Com o aumento para 2,5% de deformação, o número de ciclos suportados até a falha diminuiu significativamente para ambas as amostras, porém a amostra M0P mostra uma redução menor na vida de fadiga. Em 5% de deformação, observa-se que a amostra reciclada M20P exibiu a maior resistência à fadiga quando comparada à amostra M0C.

Em relação ao FFL das misturas apresentado na Tabela 20, os resultados indicaram que a amostra de RAP registrou o valor mais baixo para o FFL, evidenciando a fragilidade elevada decorrente do envelhecimento da amostra e, conseqüentemente, sendo classificado como insatisfatório, embora o ensaio de LAS e seus respectivos critérios ainda não foram validados para ligantes recuperados de RAP, apenas para ligantes virgens. Em contrapartida, a amostra M0C obteve um resultado médio, enquanto os ligantes M0P, M20C e M20P foram classificados como excelentes de acordo com a classificação sugerida na Tabela 5.

4.2 Dados de rigidez

Nesta seção, se concentra na análise dos resultados dos ensaios de Módulo Resiliente (MR) e Módulo Dinâmico (MD).

a) Módulo de Resiliência (MR):

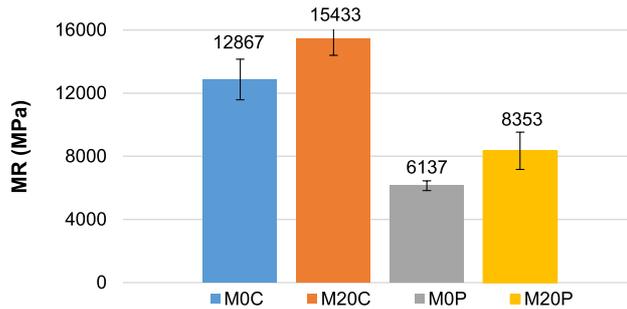
Após a realização dos ensaios de MR, os dados coletados foram processados e sistematizados na Tabela 21, que apresenta os valores do módulo de resiliência, desvio padrão e coeficiente de variação para cada mistura. Complementando a análise numérica, a Figura 39 apresenta um gráfico que ilustra os resultados de MR para cada mistura, facilitando a visualização e comparação dos resultados.

Tabela 21 – Valores médios de MR com aplicação de carga de 1Hz.

Misturas	Temperatura 25°C		
	MR (MPa)	DP	CV (%)
M0C	12867	1285	10,0
M20C	15433	1032	6,7
M0P	6137	308	5,0
M20P	8353	1182	14,1

Fonte: Autor (2022).

Figura 39 – Resultados médios obtidos pelo módulo de resiliência.



Fonte: Adaptada Stratura Asfaltos (2022).

Nota-se que os valores de MR das misturas com CAP 30/45 foram mais altas do que as das misturas com polímero. Além disso, em ambos os casos, o valor de MR aumenta com a adição do material reciclado. Esse comportamento era esperado, uma vez que o ligante envelhecido do RAP associado a influência do CAP 30/45, tendenciam ao aumento da rigidez das misturas. Já para as misturas M0P e M20P que empregaram o ligante modificado 65/90-E, os resultados indicaram que a incorporação de 20% de RAP na mistura reciclada, representada pela mistura M20P, resultou em um aumento na rigidez da amostra. Esse padrão era previsto, pois a rigidez alta das misturas evidenciou da interação entre o ligante envelhecido do RAP e a influência do CAP 30/45.

A pesquisa de Bohn (2017) evidenciou que ao utilizar uma quantidade maior de RAP nas misturas resultou em um aumento nos valores de MR. Nas misturas com CAP 50/70, os valores de MR oscilaram entre 9500 e 13000 MPa, enquanto nas misturas com CAP 60/85, os valores se situaram entre 9900 e 14200 MPa.

De acordo com Suzuki (2019), os resultados do Módulo de Resiliência (MR) indicaram um aumento nas misturas recicladas com a adição de material fresado, variando de 10% a 65%, juntamente com o incremento do CAP 30/45. Este aumento foi observado nas misturas recicladas com teores de fresado superiores a 25%, em comparação com as adições menores.

Nesse contexto, Costa (2022) abordou em sua pesquisa a inclusão de RAP em uma faixa de 25% a 100% juntamente com CAP 50/70 e agentes rejuvenescedores. Assim, os resultados indicaram um aumento significativo na rigidez das amostras examinadas em laboratório. Dessa forma, o autor destacou a viabilidade de utilizar frações entre 25% e 50% de RAP sem a necessidade de adição de agentes de reciclagem. Além disso, estudos anteriores, como os de Lima (2003) e Centofante (2016), corroboraram com o aumento do Módulo de Resiliência (MR) à medida que a quantidade de material reciclado era adicionada.

Dessa forma, os resultados de MR estão em concordância com os valores encontrados nesta pesquisa, reforçando, conforme as literaturas descritas acima, que a presença de material reciclado contribui para o aumento da rigidez das misturas asfálticas

b) Módulo Dinâmico (MD):

A apresentação dos resultados do ensaio de Módulo Dinâmico seguirá a recomendação de análise conforme a norma ME416 do DNIT (2019). Inicialmente, serão apresentados os valores referentes a cada temperatura e frequência com seus respectivos Módulo $|E^*|$ e ângulo de fase (ϕ), e, por último, as conclusões relacionadas aos módulos dinâmicos e as curvas mestras.

Na Tabela 22 apresenta-se os resultados das amostras pesquisadas e nas Figuras 40 e 41 são demonstradas as curvas mestras das misturas em uma escala semi-log e log-log, acompanhadas do ângulo de fase na Figura 42, ambas ajustadas para a temperatura de referência de 20°C.

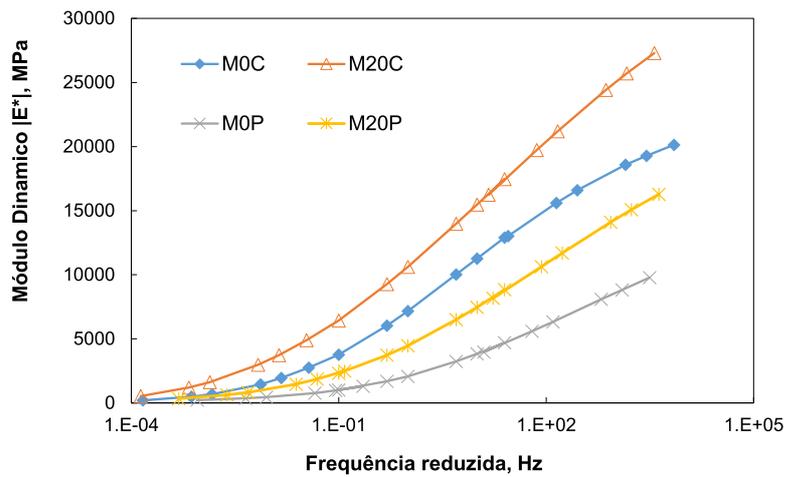
Tabela 22 – Resultados médios das quatro misturas pesquisadas.

CONDIÇÃO		TEMPERATURAS											
		4°C				20°C				40°C			
Misturas	Freq. (Hz)	E* MPa	CV (%)	φ (°)	DP (°)	E* MPa	CV (%)	φ (°)	DP (°)	E* MPa	CV (%)	φ (°)	DP (°)
M0C	25	20824	7.4	4.5	0.1	12544	7.0	13.0	0.8	2972	2.6	31.0	0.7
	10	19661	8.3	5.0	0.4	10781	7.0	14.0	0.9	1979	1.1	33.9	0.2
	5	18900	7.7	6.1	0.3	9604	6.9	15.5	0.9	1473	0.4	34.7	0.2
	1	16541	7.9	8.0	0.3	7111	7.5	18.5	0.7	650	2.9	36.4	0.1
	0.5	15438	8.1	8.9	0.4	6087	7.8	20.2	0.7	443	4.4	36.5	0.4
	0.1	12821	8.4	11.4	0.5	3971	8.7	24.5	0.7	217	9.1	32.0	0.9
M20C	25	28944	1.8	3.7	1.3	17688	2.2	10.2	0.4	5115	7.2	25.1	0.6
	10	25295	5.3	5.4	0.2	15124	1.4	11.4	0.5	3793	4.7	27.4	0.9
	5	23875	5.3	5.9	0.2	13606	1.3	12.6	0.5	2946	4.2	29.6	0.7
	1	20768	3.0	7.3	0.0	10515	1.3	15.3	0.7	1590	7.7	32.3	0.9
	0.5	19506	3.0	8.0	0.1	9277	1.4	16.7	0.8	1142	8.7	33.6	1.1
	0.1	16554	3.3	9.7	0.1	6624	2.6	20.4	1.0	548	12.6	34.2	1.6
M0P	25	9890	12.3	12.2	0.4	4755	11.1	20.7	0.4	1352	6.6	25.5	1.0
	10	8895	10.9	12.8	0.2	3809	7.9	22.0	0.5	955	4.8	26.3	0.6
	5	8059	10.5	13.8	0.2	3169	7.2	23.4	0.6	793	5.3	25.3	0.6
	1	6219	10.2	16.1	0.3	2065	7.0	25.2	0.9	436	8.1	25.5	0.8
	0.5	5499	10.1	17.1	0.3	1688	7.2	26.0	0.8	349	8.9	24.7	0.6
	0.1	4061	9.1	19.5	0.3	1042	8.1	27.3	0.4	232	10.4	22.6	0.7
M20P	25	16779	13.4	8.2	1.3	8717	12.3	16.4	1.1	2665	14.2	27.0	1.7
	10	15170	12.1	9.2	1.1	7334	10.8	17.8	1.3	1859	16.7	28.7	1.4
	5	13969	12.1	10.0	1.1	6329	10.7	19.2	1.5	1466	16.9	28.7	0.9
	1	11548	11.8	11.8	1.3	4468	13.6	21.9	2.0	780	22.4	29.2	0.8
	0.5	10508	12.2	12.8	1.5	3758	14.9	23.3	2.4	596	22.7	28.8	0.5
	0.1	8257	13.6	15.2	1.8	2390	18.9	26.3	2.5	349	21.0	26.9	1.0

Fonte: Autor (2022).

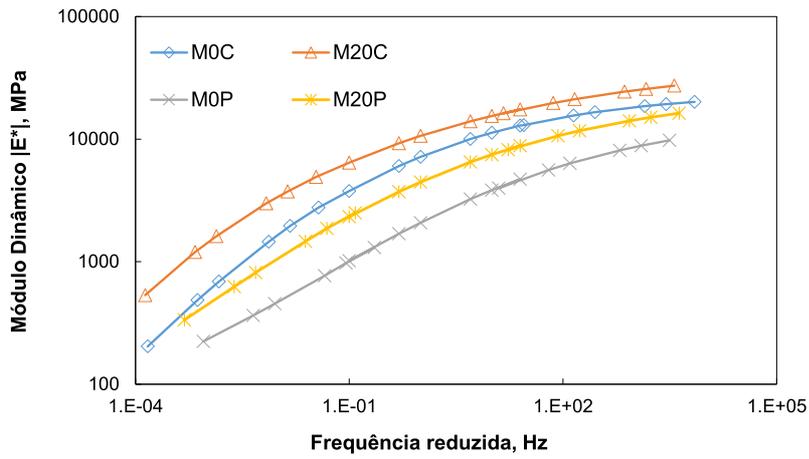
Nas curvas mestras, frequências mais altas indicam maior propensão ao dano por trincamento térmico em misturas asfálticas, embora esse tipo de dano seja menos frequente no Brasil devido ao clima tropical. Por outro lado, frequências mais baixas estão associadas à ocorrência de deformação permanente, enquanto as temperaturas intermediárias estão relacionadas ao dano por fadiga. Já o ângulo de fase está relacionado às características elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, fornecendo informações valiosas sobre seu comportamento sob diferentes frequências (Boeira, 2018).

Figura 40 – Característica da curva mestra das misturas na temperatura de 20°C, escala semi-log.



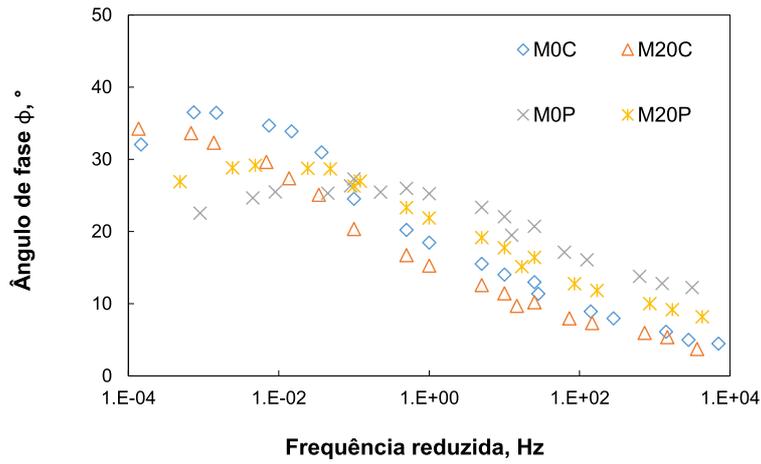
Fonte: Adaptada Stratura Asfaltos (2022).

Figura 41 – Característica da curva mestra das misturas na temperatura de 20°C, escala log-log.



Fonte: Adaptada Stratura Asfaltos (2022).

Figura 42 – Comportamento do ângulo de fase de cada mistura, com a frequência ajustada para a temperatura de referência de 20°C.



Fonte: Adaptada Stratura Asfaltos (2022).

Conforme o esperado, o ligante asfáltico envelhecido proveniente do RAP possui um efeito substancial na rigidez das misturas asfálticas. Os resultados da Tabela 22 revelam que as amostras M0P e M20P apresentaram valores de módulo inferiores em relação às amostras M0C e M20C. Esse fenômeno ocorre devido à menor maleabilidade do CAP 30/45 em comparação com o ligante modificado 65/90-E. Assim, a mistura M20C apresenta uma rigidez elevada, o que pode resultar em uma redução na vida de serviço do pavimento. Isso destaca a importância de ter um ligante capaz de compensar o uso de RAP devido ao ganho de rigidez, aspecto que foi alcançado pela mistura M20P.

Enfatiza-se que a adição de RAP foi um fator crucial para o aumento do módulo, independentemente do tipo de ligante, indicando que essas misturas podem apresentar maior resistência à deformação permanente, condição que será evidenciada nos resultados de FN.

A análise dos dados revela que o ângulo (φ) de defasagem da mistura M0C apresenta valores mais elevados, atingindo o pico na frequência de $1.E-0,3$ (0,001Hz), ou seja, apresentando maior dissipação de energia viscosa. Dessa maneira, a elasticidade do ligante asfáltico se torna menos significativa em frequências mais baixas e temperaturas mais altas, influenciando o comportamento da mistura, que passa a ser mais determinado pela disposição do arranjo mineral dos grãos. Verifica-se ainda, que as misturas contendo CAP 30/45 apresentam o menor valor de ângulo de fase em temperaturas mais baixas e frequências mais altas, o que justifica a maior rigidez dessas misturas, conforme apresentadas na Figura 42.

Martins (2014) evidenciou que o comportamento do CAP modificado por polímero em misturas convencionais, exibe uma menor rigidez em temperaturas mais baixas no resultado dos módulos. No entanto, à medida que a temperatura aumenta, a rigidez dessas misturas tende a ultrapassar a das misturas não modificadas, um aspecto que não foi identificado nesta pesquisa com a elevação da temperatura.

A pesquisa de Correa (2020) revelou que as misturas recicladas com CAP 50/70 apresentaram um desempenho ligeiramente superior em termos de módulo dinâmico do que as misturas com ligante modificado de CAP 60/85. Já nas misturas

recicladas que tiveram a incorporação de 30% de RAP, com ambos os ligantes, registraram os maiores valores de rigidez.

Bohn (2017) identificou, através da análise da curva mestra e do ângulo de fase, que as misturas com ligante 60/85 apresentam um comportamento mais elástico e menor propensão à deformação permanente em comparação com as misturas com ligante 50/70. Em relação às demais misturas que continham frações de RAP, a pesquisadora notou um incremento expressivo na parcela elástica quando o material reciclado foi empregado em conjunto com ligante 60/85, o que sustenta os resultados deste estudo.

Dessa forma, observa-se que o desempenho das misturas analisadas nas Figuras 41 e 42, corrobora com os dados das informações da norma M323 AASHTO (2022) ilustrada na Tabela 6. É importante destacar que essas análises servem apenas como indicadores e podem ou não ser consideradas consistentes apenas com a realização do ensaio. Essas observações demonstram a necessidade de realizar ensaios de dano, visto que misturas com rigidezes similares podem apresentar diferentes resistências à deterioração, seja por fadiga ou deformação permanente.

4.3 Propriedades de danificação nas misturas asfálticas

Neste tópico, serão delineados e explicados os ensaios que analisam as propriedades das misturas asfálticas após a ocorrência de dano. Entre esses ensaios, incluem-se o ensaio uniaxial de carga repetida (FN), a avaliação da resistência à tração por compressão diametral (RT) e o teste de fadiga.

a) Flow Number (FN):

O presente estudo investigou a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas com 20% de RAP por meio do ensaio uniaxial de carga repetida. Assim, os resultados obtidos foram comparados ao das misturas de referência para determinar se a presença de RAP influenciava significativamente à deformação permanente.

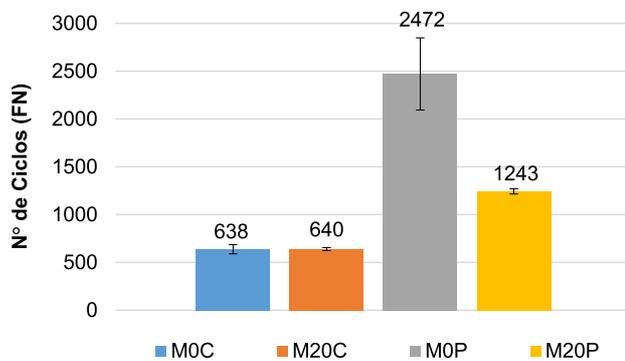
Dessa maneira, os resultados de FN para as quatro misturas analisadas, conforme o Modelo de Francken, são apresentados na Tabela 23. Incluem-se os dados de FN, desvios-padrões, coeficientes de variação. A Figura 43 apresenta um gráfico com os valores.

Tabela 23 – Resultados médios das quatro misturas analisadas.

Misturas	Temperatura 60°C		
	FN (Ciclos)	DP	CV (%)
M0C	638	48	7,5
M20C	640	16	2,5
M0P	2472	378	15,3
M20P	1243	27	2,2

Fonte: Autor (2022).

Figura 43 – Resultados médios do FN das misturas estudadas.



Fonte: Adaptada apresentação técnica Stratura Asfaltos - Paving (2022).

A mistura contendo 20% de RAP demonstrou um valor de FN bastante próximo da mistura de referência com CAP 30/45. Já a mistura com 20% de RAP e ligante modificado 65/90-E exibiu um valor médio inferior (1243 ciclos) em comparação com a mistura de referência (2472 ciclos), indicando uma redução na resistência da mistura

asfáltica reciclada. Ressalta-se que, apenas a mistura M0P ficou acima da faixa estabelecida pela norma T79 da AASHTO (2012) em relação ao coeficiente de variação (CV), que deve ser inferior a 14,1% para dois corpos de prova e não deve exceder 11,5% para três amostras. Entretanto, a norma brasileira não estabelece critérios para avaliar aceitação de CV das médias de FN. Essa performance pode ser resultado da influência do processo de mistura, nos agregados do RAP ou no condicionamento do corpo de prova.

No Brasil, o ensaio de FN tem sido utilizado como um indicador de desempenho para avaliar a resistência à deformação permanente em misturas asfálticas, conforme estabelecido pelo Método Mecanístico-Empírico de Dimensionamento Nacional, conhecido como MeDiNa. Os limites das classes de desempenho estão definidos com base nos valores de FN e são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Parâmetros de FN estabelecidos para diversos níveis de tráfego.

Class e	Flow Number (FN)	Nível de Tráfego (Recomendado Condições Normais)	Nível de Tráfego Recomendado Condições Severas
1	FN \geq 100 ciclos	$N < 1e^6$	Não recomendado
2	100 ciclos \leq FN < 300 ciclos	$1e^6 \leq N < 1e^7$	$N < 1e^6$
3	300 ciclos \leq FN < 750 ciclos	$1e^7 \leq N < 1e^8$	$1e^6 \leq N < 1e^7$
4	750 ciclos \leq FN < 2000 ciclos	$N \geq 1e^8$	$1e^7 \leq N < 1e^8$
5	FN \geq 2000 ciclos	-	$N_{ser} \geq 1e^8$

Fonte: DNIT (2018).

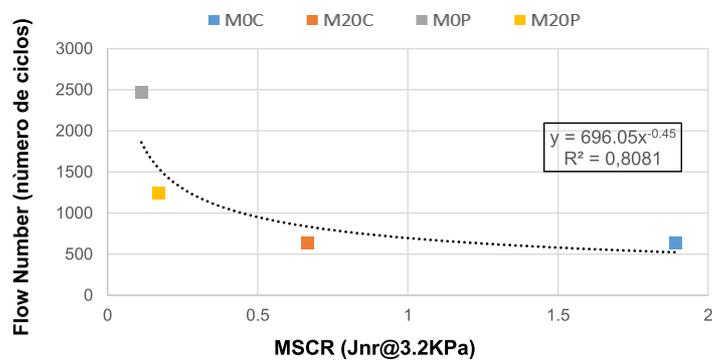
Os dados exibidos na Figura 43 destacam que as misturas M0C e M20C demonstraram desempenho apropriado para a classe 3. Por outro lado, a amostra M20P atendeu à classe 4, enquanto a amostra M0P alcançou a classe 5, indicando o melhor desempenho entre as misturas asfálticas analisadas. Portanto, podemos inferir que as misturas contendo 20% de RAP apresentaram um desempenho positivo no que se refere à resistência à deformação permanente. É crucial destacar que o ligante modificado na mistura M20P demonstrou uma resistência superior em comparação com as misturas contendo CAP 30/45, o que já era previsto.

Em seu estudo, Bohn (2017) constatou que o aumento do teor de RAP nas misturas asfálticas, com ligantes 50/70 e 60/85, resultou em um incremento no FN. Já Suzuki (2019) alcançou resultados expressivos de FN para misturas recicladas com

CAP 30/45 sem agente rejuvenecedor, onde teores de RAP (35%, 50%, e 60%) atingiram quantidades significativas de ciclos, variando de 1.198 a 1.833, respectivamente. Entretanto, Luzzi (2019) chegou à conclusão de que quanto maior a porcentagem de RAP adicionada com asfalto modificado, este mostrou um desempenho inferior das misturas em termos de deformação permanente. Dentre as misturas recicladas, a que apresentou o menor número de ciclos foi a composta por 30% de RAP, registrando 309 ciclos, enquanto a mistura com 10% de RAP destacou por suportar 590 ciclos.

Na Figura 44, apresenta-se a correlação encontrada entre os dados do Flow Number (FN) das misturas e o MSCR (Jnr@3.2KPa) dos ligantes asfálticos, demonstrando uma boa correlação em termos de previsão à deformação permanente.

Figura 44 – Correlação entre Flow Number (FN) e MSCR.



Fonte: Autor (2022).

É possível identificar que, à medida que o valor de Jnr (3,2KPa) diminui, o número de ciclos do FN aumenta, apresentando uma melhoria mais expressiva na resistência à deformação permanente. Portanto, nota-se que as amostras com CAP 65/90-E apresentaram uma melhor performance em relação a deformação permanente quando comparada as amostras com CAP 30/45, o que já era previsto.

Ao comparar as amostras M0C (referência) e M20C (com RAP), ambas apresentaram resultados de FN semelhantes. No entanto, a amostra M20C registrou um valor menor de Jnr em comparação à amostra M0C.

Portanto, observa-se que a amostra M20C demonstrou uma resistência superior à deformação a propriedade elástica do ligante envelhecido do RAP. Já a amostra M0P apresentou um desempenho superior em relação as demais amostras, enquanto a amostra M20P resiste melhor à deformação permanente em relação a amostra M0C. Esse fato pode ser atribuído à melhoria da capacidade de recuperação elástica apresentada pelo CAP 65/90-E.

Assim, destaca-se que as misturas recicladas neste estudo demonstram resultados satisfatórios, tanto para tráfego de média intensidade (M20C) quanto para tráfego pesado (M20P), no que diz respeito à resistência à deformação permanente.

b) Resistência à Tração (RT)

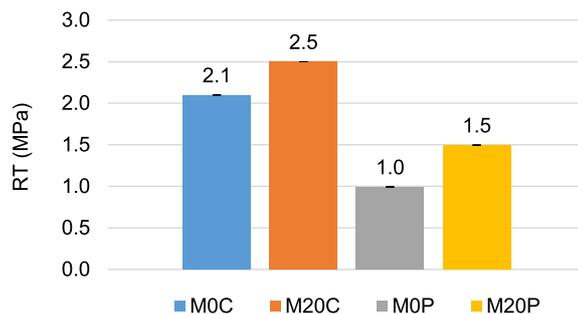
Depois de conduzir o ensaio de módulo de resiliência, deu-se início ao ensaio para avaliar a resistência à tração (RT), considerando que o ensaio de módulo não danifica as amostras. Portanto, o ensaio de RT foi executado nas quatro misturas estudadas a uma temperatura de 25°C, tendo sua determinação apresentado na Tabela 25 e na Figura 45.

Tabela 25 – Resultados médios da RT das amostras.

Misturas	Temperatura 25°C		
	RT (MPa)	DP	CV (%)
M0C	2,1	0,05	2,2
M20C	2,5	0,05	2,0
M0P	1,0	0,04	4,1
M20P	1,5	0,17	11,1

Fonte: Autor (2022).

Figura 45 – Resultados médios da RT.



Fonte: Autor (2022).

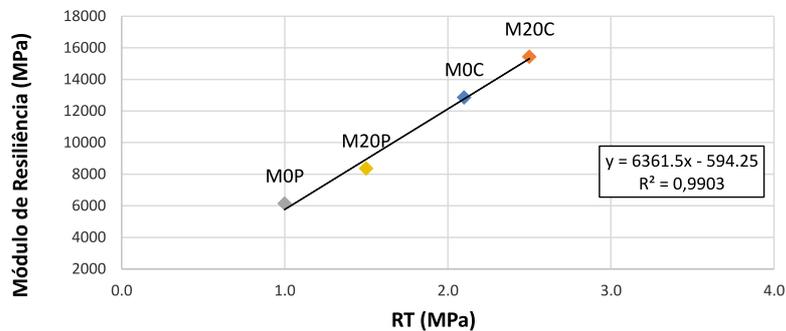
A especificação ES031 do DNIT (2006) estabelece que, um valor mínimo de RT de 0,65 MPa seja atingido para misturas asfálticas com ligante convencional. Por outro lado, a norma ES385 DNER (1999) para ligantes modificados por polímero, determina que as misturas asfálticas devem atender um intervalo de valores de RT (0,7 a 1,2 MPa). Ao analisar essas especificações, os resultados obtidos nesta pesquisa podem ser considerados adequados.

Nota-se, através da Tabela 25, que as misturas contendo ligante convencional 30/45 apresentaram valores de resistência à tração (RT) superiores em comparação com as misturas que utilizaram ligante modificado 65/90. Além disso, as misturas que contém RAP tiveram um aumento significativo nos valores de RT, o que era esperado.

Assim, os resultados obtidos estão em conformidade com a literatura de Bernucci *et al.* (2006) apontando que, para a maioria das misturas asfálticas, a RT se encontra na faixa de 0,5 a 2,0 MPa. Esses valores tendem a ser mais elevados em comparação com os valores limites estabelecidos pela norma devido à consistência mais rígida do ligante asfáltico, especialmente em misturas de módulo elevado. Ressalta-se que neste estudo apenas a mistura M20C, com a inclusão de RAP associado ao ligante 30/45, apresentou valores acima de 2,0 MPa.

Os resultados da pesquisa revelaram uma relação linear positiva e estatisticamente significativa entre os valores de Resistência à Tração e os de Módulo de Resiliência, com um coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9903$) conforme ilustrado na Figura 46.

Figura 46 – Relação entre o MR e RT das quatro misturas.



Fonte: Autor (2022)

Destaca-se, que a relação entre o Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração (MR/RT) é uma premissa para determinar a resistência à formação e propagação de trincas por fadiga. Quanto menor o valor dessa relação, melhor, indicando menor rigidez para evitar a absorção excessiva de tensões, ao mesmo tempo em que a resistência à tração é maximizada (Santos, 2020). Assim, os resultados desta análise foram derivados dos dados de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT), provenientes das Tabelas 21 e 25, respectivamente, tendo os resultados mecânicos de MR/RT apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados da razão de MR/RT .

Misturas	MR/RT
MOC	6127
M20C	6173
MOP	6137
M20P	5569

Fonte: Autor (2022).

Dessa forma, constatou-se que a mistura com ligante modificado e RAP (M20P) teve a menor relação MR/RT em comparação com as outras misturas analisadas neste estudo, indicando uma menor rigidez que pode ser associada ao efeito do ligante modificado por polímero, conforme mencionado por Bernucci *et al.* (2006). No entanto, essa avaliação requer a análise de outros parâmetros de dano por fadiga.

c) Dano por Fadiga a compressão diametral

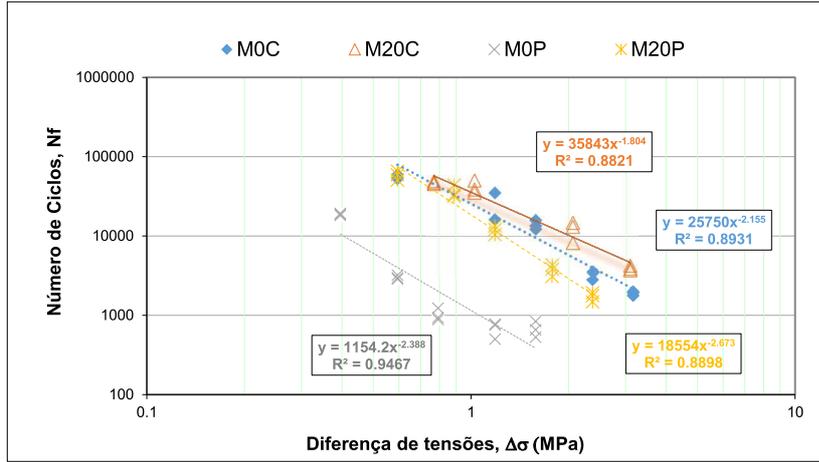
A fadiga das misturas asfálticas foi avaliada neste estudo de acordo com a norma ME183 do DNIT (2018), através do ensaio de compressão diametral realizado a 25°C.

Para avaliar o comportamento das misturas com e sem RAP, foram realizados testes em quatro níveis de carga, com tensões entre 5% e 40% da obtida no ensaio de RT. Além disso, o critério de ruptura total dos corpos de prova determina o término do ensaio. Por fim, define-se a relação entre o número de ciclos de carga e a deformação /tensão, sendo representada por curvas de Wöhler que indicam o desempenho à fadiga do material (Boeira, 2018).

Os resultados obtidos do ensaio de fadiga têm como objetivo determinar a relação entre a vida de fadiga em função da diferença de tensões ($N \times \Delta\sigma$), conforme apresentado na Figura 47, e a vida de fadiga em relação à deformação resiliente ($N \times \epsilon_r$), como demonstrado na Figura 48.

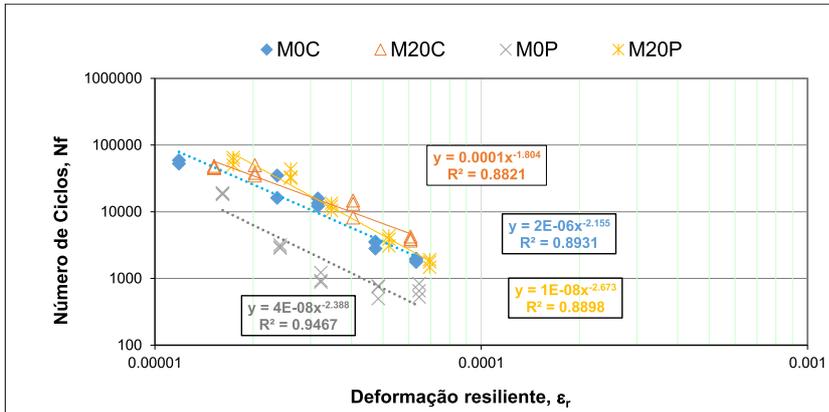
Assim, as curvas de fadiga são geradas utilizando uma linha de tendência do tipo potência, com o objetivo de obter o maior coeficiente de determinação (R^2) possível. O R^2 indica o ajuste da linha em relação aos pontos de dados, sendo que valores próximos de 1 indicam uma menor dispersão dos pontos. Conforme especificado pela normativa, é necessário que esse valor seja maior que 0,8.

Figura 47 – Vida de fadiga por diferença de tensão (ϵ_r) das misturas asfálticas.



Fonte: Autor (2023).

Figura 48 – Vida de fadiga por deformação resiliente (ϵ_r) das misturas asfálticas.



Fonte: Autor (2023).

De forma geral, quanto maior o número de ciclos até a ruptura para um determinado nível de deformação resiliente, melhor espera-se que seja o desempenho da mistura em relação à fadiga. Portanto, ao examinar as curvas de fadiga do modelo de deformação resiliente, conforme mostrado na Figura 48, pode-se inferir que a mistura asfáltica M20C com CAP 30/45 demonstrou melhor desempenho em relação à fadiga comparado com as demais misturas. Entretanto, fica claro que os valores obtidos das misturas com ligante 65/90-E, tanto em termos de tensão de tração quanto de deformação resiliente, não corresponderam ao esperado. Observa-se que o ensaio de fadiga por compressão diametral pode não estar capturando adequadamente o comportamento desse material, já que a mistura M0P, devido à natureza do ligante, deveria apresentar a curva mais elevada em relação às demais. Ao analisarmos os resultados da curva de fadiga do ligante (LAS) é possível verificar que o CAP 65/90 se destaca como um polímero de alta performance, sendo o ligante mais resiliente sob efeito da fadiga. Por outro lado, o CAP 30/45 é mais suscetível ao dano e possui uma rigidez consideravelmente maior. Assim, outras pesquisas corroboram com esses resultados dos ligantes, evidenciando que a incorporação de polímeros resulta em propriedades aprimoradas como rigidez e elasticidade, indicando uma maior resistência a deformação permanente e trinca por fadiga (Martins, 2014; Bohn, 2017 e Duarte, 2018).

Portanto, fica claro que o ensaio de fadiga à compressão diametral à tensão controlada não foi capaz de apresentar de forma nítida a vida de fadiga das misturas asfálticas modificadas e aquelas com RAP, demonstrando uma limitação do ensaio.

Com base nos dados obtidos no teste de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, buscou-se realizar uma simulação utilizando o Modelo do Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004).

Com base nos dados obtidos em laboratório das quatro misturas asfálticas, foi possível aplicar o modelo AASTHO (NCHRP, 2004) a todas as misturas analisadas, considerando uma ativação do RAP de 100% e outra assumindo 60% como o valor médio, fundamentando-se no uso dessa proporção pelos departamentos de transportes da Flórida e do Texas (Grover, 2024).

Assim, a partir dos dados de volume das misturas recicladas, foi estabelecido uma ativação de 60% do RAP como simulação para este modelo, o que resultou em uma quantidade residual de 0,6% de RAP, além da adição de 3,9% de ligante novo. Isso resultou em um total de 4,5% de ligante na mistura reciclada, permitindo a inclusão das informações necessárias para o cálculo no modelo da AASHTO (NCRP, 2004). Os resultados volumétricos das misturas calculadas estão disponíveis na Tabela 27.

Tabela 27 - Determinação do teor de ligante e volumetria, considerando ativação do RAP em 60%.

MISTURAS	M20CS	M20PS
Tipo de ligante asfáltico	30/45	65/90-E
CAP virgem adicionado (%)	3,9	3,9
CAP proveniente do RAP ativado (%)	0,6	0,6
Teor de CAP total na mistura ativo (%)	4,5	4,5
DADOS VOLUMETRICOS		
Gmm (g/cm ³)	2,525	2,518
Gmb (g/cm ³)	2,432	2,412
Vv (%)	3,7	4,2
VAM (%)	15,1	14,9
RBV (%)	72,1	71,9

Fonte: Autor (2024).

Dessa forma, optou-se por empregar uma espessura de 5 cm (hac) para a camada asfáltica como parâmetro no modelo da AASTHO, visto que essa é a espessura mínima admissível conforme o método de dimensionamento brasileiro MeDiNa (2018). Além disso, foram estimados três níveis de deformação específica de tração (cm/cm), assim como os dados de módulos dinâmicos (MPa) obtidos na temperatura de 20°C e na frequência de 10Hz.

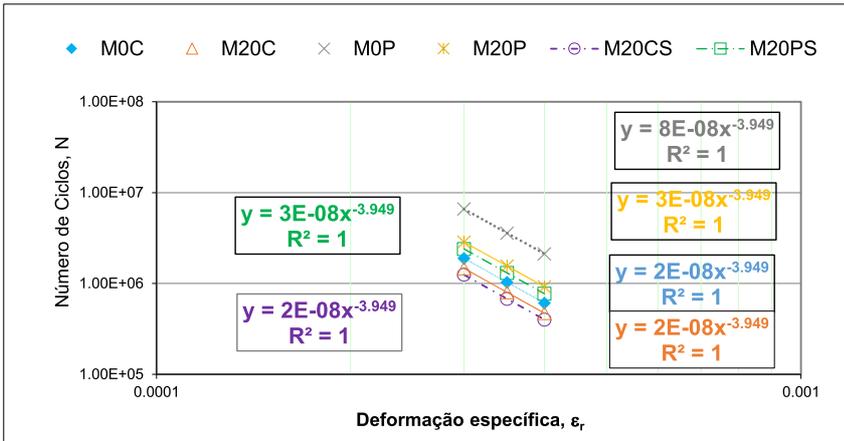
Os valores previstos pelo modelo são apresentados nas Tabelas 28 e 29, com as respectivas vidas de fadiga (curvas de Wöhler) ilustradas nas Figuras 49 e 50.

Tabela 28 - Análise ao trincamento de baixo para cima da camada asfáltica.

Eq.	Temp. (°C)	Def. específica de tração (cm/cm)	Desempenho à Fadiga (ciclos)					
			M0C	M20C	M0P	M20P	M20CS	M20PS
2	20	0.00030	1.89E+06	1.47E+06	6.59E+06	2.86E+06	1.25E+06	2.40E+06
		0.00035	1.03E+06	7.98E+05	3.59E+06	1.56E+06	6.78E+05	1.31E+06
		0.00040	6.08E+05	4.71E+05	2.12E+06	9.18E+05	4.00E+05	7.71E+05

Fonte: Autor (2024).

Figura 49 – Modelo considerando trincamento de baixo para cima.



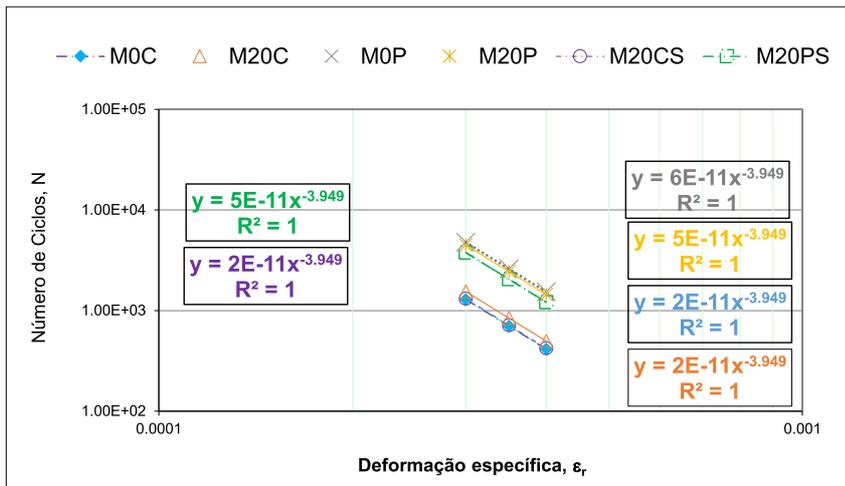
Fonte: Autor (2024).

Tabela 29 - Análise ao trincamento de cima para baixo da camada asfáltica.

Eq.	Temp. (°C)	Def. específica de tração (cm/cm)	Desempenho à Fadiga (ciclos)					
			M0C	M20C	M0P	M20P	M20CS	M20PS
3	20	0.00030	1.29E+03	1.55E+03	4.77E+03	4.48E+03	1.31E+03	3.76E+03
		0.00035	7.01E+02	8.41E+02	2.60E+03	2.44E+03	7.15E+02	2.05E+03
		0.00040	4.13E+02	4.97E+02	1.53E+03	1.44E+03	4.22E+02	1.21E+03

Fonte: Autor (2024).

Figura 50 – Modelo considerando trincamento de cima para baixo.



Fonte: Autor (2024).

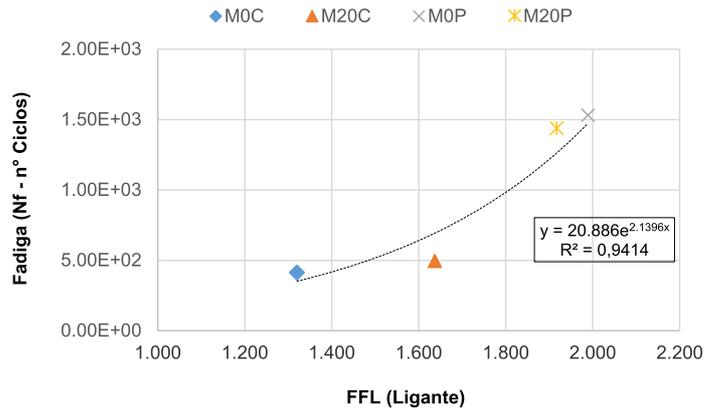
Os resultados do modelo, indicam que a mistura com ligante modificado tiveram um desempenho superior à vida de fadiga nas solicitações e níveis analisados. Essa condição fica mais evidente quando a trinca ocorre de cima para baixo, resultando em um maior afastamento entre as curvas de fadiga (Nf), conforme apresentado na Figura 50.

Ao analisar as misturas M0C, M20C e M20CS com ligante 30/45, observa-se um comportamento próximo frente ao desempenho à fadiga, sendo que a mistura M0C demonstrou maior resistência a esse tipo de falha na condição de trincamento de baixo para cima. No entanto, ao analisar o trincamento de cima para baixo, a mistura M20C mostra uma leve superioridade. Em contrapartida, a mistura M20CS mostrou um desempenho próximo ao da mistura M0C, o que era inesperado, uma vez que a diminuição da quantidade de ligante normalmente resulta em uma vida útil de fadiga menor.

Assim como realizado com as misturas contendo o ligante 30/45, também foi avaliado o desempenho à fadiga das misturas M0P, M20P e M20CS que utilizam o ligante 65/90-E. Observou-se que a mistura M0P apresentou um desempenho mais satisfatório, superando em 56% o desempenho à fadiga da mistura M20P quando a falha ao trincamento é analisada de baixo para cima. Novamente, a mistura M0P demonstrou ser mais resistente à falha em comparação à mistura M20P, com uma superioridade de 6% na análise de cima para baixo. Já a mistura M20PS apresentou um desempenho inferior das demais misturas que utilizam ligante modificado.

De modo geral, observa-se que os dados obtidos pelo modelo da AASHTO (NCHRP, 2004) apresentam um bom ajuste das curvas de fadiga, o que sugere que os resultados encontrados para as misturas asfálticas analisadas são mais consistentes quando correlacionados aos resultados de FFL dos ligantes. É importante ressaltar que os resultados obtidos através desse modelo podem apresentar desvios quando analisados por métodos experimentais. Na Figura 51, são apresentados os resultados da correlação entre os dados de FFL do ligante e a fadiga obtida pelo modelo, considerando o trincamento de cima para baixo e dos materiais reciclados com ativação de 100% do ligante.

Figura 51 – Correlação entre a Fadiga da mistura e o FFL do ligante.

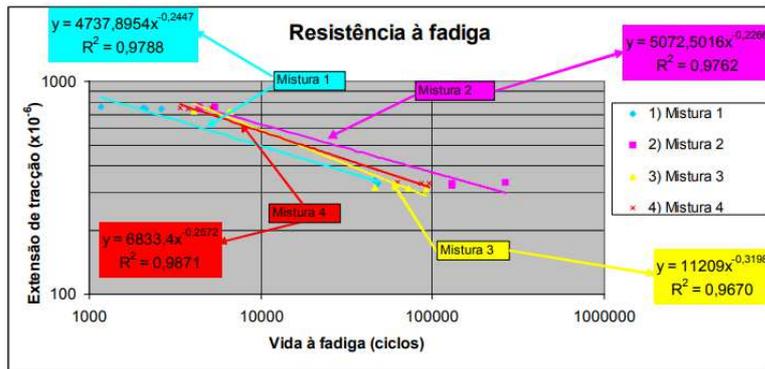


Fonte: Autor (2024).

É importante destacar que outros testes de fadiga, com análises mais detalhadas, devem ser realizados para misturas com ligantes modificados, a fim de validar o desempenho das amostras. Isso se deve ao fato de que o ensaio de fadiga preconizado pelo ME183 do DNIT (2018) para este estudo não capturou adequadamente os dados das misturas com ligante 65/90-E.

Gomes *et al.* (2006) investigaram misturas recicladas utilizando o rejuvenescimento do ligante envelhecido por meio da adição de aditivos. Para determinar a durabilidade das amostras na fadiga, foi utilizado o ensaio de flexão de 4 pontos. Assim, os pesquisadores examinaram a vida de fadiga de 4 tipos de misturas, incluindo a mistura referência (1) com 0% de RAP e uso de CAP 35/50, a mistura (2) com 30% de RAP usando CAP 35/50, a mistura (3) com 30% de RAP com CAP 50/70 e a mistura (4) com 30% RAP, CAP 35/50 e agente rejuvenecedor. Na Figura 52 estão representados a vida de fadiga das misturas estudadas.

Figura 52 – Vida de fadiga das misturas recicladas.



Fonte: Gomes et al., (2006).

Com base na Figura 52, Gomes *et al.* (2006) constataram de que as misturas asfálticas 3 e 4 apresentam um comportamento semelhante, embora a mistura 4 demonstre um desempenho ligeiramente superior, refletido por uma menor inclinação da reta que representa as condições de fadiga. A mistura 2 foi a que mostrou o melhor desempenho em relação à fadiga entre as analisadas. Por outro lado, a mistura 1 teve um comportamento pior em condições de tração mais elevada, no entanto igualou-se ao desempenho das misturas 3 e 4 em extensões mais baixas que ocorrem durante a vida de serviço do revestimento. Portanto, as misturas recicladas não apresentam diferenças significativas no comportamento em relação à resistência à fadiga quando comparada com a mistura tradicional.

No estudo realizado por Luzzi (2019), foram examinadas misturas nas proporções de 10%, 20% e 30% de RAP com CAP 60/85, além de uma mistura convencional de referência. Para determinar a vida de fadiga, foi utilizado o método de tração-compressão (ensaio uniaxial cíclico) através do modelo S-VECD. Os valores encontrados indicaram que a amostra com 20% de RAP demonstrou um desempenho superior às outras misturas em relação à fadiga.

Oliveira (2020) conduziu um estudo sobre três tipos de misturas que continham 25%, 45% e 100% de RAP, usando CAP 50/70 e adição de aditivos rejuvenescedores. O método de ensaio utilizado foi o de fadiga por compressão diametral sob tensão

controlada. Assim, a mistura com 25% de RAP, mostrou uma menor rigidez do que as outras, evidenciando um desempenho superior em relação à vida de fadiga com menor taxa de trincamento. No entanto, o autor enfatiza que essa conclusão não exclui a possibilidade de misturas com teores de RAP mais elevados.

De maneira geral, os resultados para estimar a fadiga de misturas recicladas variam bastante, como evidenciado pelos autores citados anteriormente. É importante destacar que existem vários ensaios e abordagens metodológicas disponíveis para investigar este comportamento em detalhes, o que pode dificultar a comparação direta.

4.4 Efeito do dano por umidade

Esta seção da pesquisa, será apresentado o resultado do ensaio de DUI que avaliara a propriedade de adesão e coesão das quatro misturas desenvolvidas:

a) Dano por umidade induzida (DUI):

Foi realizado o teste de Dano por Umidade Induzida (DUI) a fim de identificar os efeitos do dano causado pela umidade em uma mistura asfáltica compactada, bem como seu impacto na adesão e coesão dos componentes da mistura. Portanto, foram confeccionados seis corpos de prova de cada mistura, sendo que em um grupo de três amostras foi realizado apenas o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (Não Condicionado), enquanto um segundo grupo de três amostras passou por todo o processo de severidade (Condicionado), conforme descrito na metodologia do ensaio.

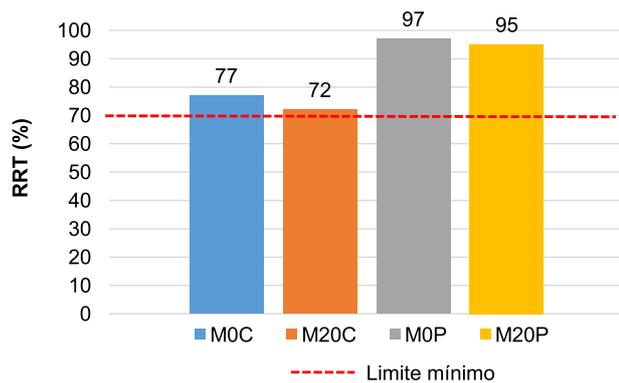
Os resultados de resistência à tração para ambos os grupos e a relação entre eles estão apresentados na Tabela 30. Na Figura 53, são exibidos os dados com o limite mínimo estabelecido pela especificação ES031 do DNIT (2006).

Tabela 30 – Resultados da Relação de Ruptura por Tração.

Misturas	Condicionado (MPa)	DP	CV (%)	Não Condicionado (MPa)	DP	CV (%)	RRT (%)
M0C	1,54	0,06	3,7	2,01	0,04	2,0	77
M20C	1,88	0,03	1,4	2,61	0,06	2,3	72
M0P	0,85	0,04	5,1	0,88	0,09	10,3	97
M20P	1,31	0,10	7,4	1,37	0,05	3,6	95

Fonte: Autor (2022).

Figura 53 – Dados da Relação da Ruptura por Tração.



Fonte: Adaptada Stratura Asfaltos (2022).

A análise do ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI) é feita com base no RRT, conforme mostrado na Figura 53. Ao examinar os resultados, observa-se um leve aumento no RRT entre as misturas de referência M0C e M0P em comparação com as misturas recicladas M20C e M20P.

Além disso, ao verificar o tipo de ligante empregado no estudo, observa-se uma influência substancial, uma vez que os resultados de RRT foram inferiores com CAP 30/45, ou seja, tendência o ganho de rigidez em comparação ao CAP 65/90-E. Isso sugere que o tipo de ligante associado ao RAP pode ocasionar alterações no

desempenho das misturas asfálticas, especialmente em relação à adesão e coesão dos constituintes, conforme valores demonstrados na Tabela 30.

Centofante (2016) investigou misturas que continham 0%, 10%, 20% e 30% de RAP. A autora verificou uma tendência semelhante em suas misturas, com uma redução na RRT à medida que o material RAP era incorporado. Em suas análises, apenas a mistura com 30% de RAP não atingiu o limite de aceitação estabelecido pelo DNIT. Contrariando essa tendência, Bohn (2017), ao analisar o impacto da água em amostras com diferentes teores de RAP (0%, 25% e 50%), observou que o RRT apresentou resultados melhores à medida que a quantidade de RAP aumentava.

Suzuki (2019) realizou uma investigação sobre misturas asfálticas recicladas a quente, variando os percentuais de material fresado entre 0%, 10%, 20%, 25%, 35%, 50% e 65%, tanto com quanto sem a adição de um agente rejuvenescedor, e os valores encontrado atenderam os requisitos do DNIT, reforçando a conclusão de que a presença de água teve um impacto limitado nas propriedades de adesividade das misturas asfálticas analisadas, corroborando assim com os valores encontrados neste estudo.

Neste contexto, os resultados avaliados do RRT foram satisfatórios para todas as misturas, atendendo a especificação. Portanto, tanto as amostras M0P quanto as M20P foram submetidas à adição de asfalto modificado por polímero, evidenciando uma melhor aderência aos agregados virgens e ao RAP.

Por fim, os resultados das quatro misturas indicaram uma redução com a adição de RAP. Esse fenômeno pode estar associado à origem específica do RAP utilizado nas misturas e, portanto, ao tipo de ligante envelhecido presente no RAP. Além disso, pode-se argumentar que, no procedimento de ensaio do DUI, quando a mistura asfáltica é submetida à imersão em água e a pressão do vácuo, a água pode penetrar em partes do RAP onde não há ligante novo nos grumos, resultando na diminuição da resistência da mistura com RAP. Esse fator pode ter sido a principal razão para a redução do RRT das misturas com RAP em relação às de referência sem RAP.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo final, serão apresentadas as conclusões obtidas a partir desta pesquisa, fundamentadas nos dados coletados em laboratório, bem como uma análise detalhada desses dados. Além disso, serão propostas sugestões para pesquisas futuras.

5.1 Conclusões

As principais considerações obtidas das análises no estudo foram:

- É evidente a diminuição do ligante asfáltico requerido ao trabalhar com misturas recicladas, seja utilizando CAP 30/45 ou CAP 65/90-E. Ao contrário do que se poderia supor, o RAP não se comporta como um material inerte, mas sim como um componente que permite a reativação do ligante asfáltico durante a dosagem das misturas. Essa característica proporciona uma economia considerável, pois reduz a necessidade de utilizar material novo e mais caro na construção de rodovias. Assim sendo, verificou-se que o ligante remanescente do RAP tinha características de envelhecimento “oxidado” deixando o material muito mais rígido. Alguns parâmetros da especificação da ANP são de vies empírico o que em tese não representaria seu desempenho em campo. No entanto, a metodologia SUPERPAVE desempenha um papel significativo na avaliação dos parâmetros mecânicos. Neste estudo, as amostras M0P e M20P demonstraram um desempenho superior em comparação com as amostras M0C e M20C. Entre as amostras recicladas, a amostra M20P foi a que mostrou a melhor performance.
- No que diz respeito ao ensaio de MR e RT, observou-se que a inclusão do CAP 30/45 nas misturas resultou em um aumento mais significativo na rigidez, conforme esperado, e que as misturas com CAP 30/45 quanto CAP 65/90 tornaram-se mais rígidas com a adição de material fresado. Tal fato justifica-se, pois o CAP 30/45, é menos viscoso, especialmente quando combinado com a incorporação de RAP. A análise da relação MR/RT revela que somente as misturas com polímero possuem o menor valor dessa relação, sugerindo uma durabilidade superior em termos de rigidez

da mistura. Esse resultado é oposto ao obtido no teste de fadiga por compressão diametral sob tensão controlada.

- Em relação ao ensaio de Módulo Dinâmico, ficou claro que a rigidez das misturas aumentou com a inserção de RAP, onde os menores valores foram verificados em ambas as misturas de referência. Nota-se, que as misturas com polímero, em geral, apresentaram menores módulos. Porém mesmo com menores módulos apresentaram menor vida de fadiga, especialmente quando observa-se no espaço de deformação. Ao passo que o ângulo de fase em temperaturas baixas e intermediária indicou um aumento da parcela viscosa das misturas com polímero.
- Analisando os resultados obtidos no ensaio de FN, podemos concluir que a inclusão de RAP nas misturas melhorou essa propriedade. Além disso, o uso do CAP 65/90-E resultou em valores superiores de FN em comparação com o CAP 30/45, evidenciando sua superioridade e melhor desempenho, principalmente ao analisarmos os ensaios reológicos MSCR e PG. Além disso, foi possível determinar que as misturas M0C e M20C possuem os menores valores, classificando-as na classe 3. As amostras M20P e M0P, por sua vez, foram categorizadas como classes 4 e 5, respectivamente. Ressalta-se a notável correlação entre o ensaio de FN e o MSCR, evidenciando que ambos os métodos são eficazes na avaliação da resistência à deformação permanente dos materiais.
- É esperado que a fadiga em condições de tensão controlada, por ser um teste mais severo, mostrasse resultados maiores de dissipação de energia entre as amostras com ligantes convencional e modificado, de acordo com a norma ME183 do DNIT (2018). No entanto, isso não foi confirmado. Esse resultado não era esperado, especialmente porque o ligante modificado tem o FFL elevado. Portanto, ao utilizar o modelo da AASHTO (NCHRP, 2004) para a análise das curvas de Wöhler, constatou-se que as misturas com ligante 65/90-E tiveram o melhor desempenho de fadiga em comparação as misturas com ligante 30/45. Ademais, as misturas de referência e recicladas que apresentaram o melhor comportamento foram, respectivamente, M0P e M20P. É importante destacar que as curvas de Wöhler para essa simulação consideram os valores de rigidez das misturas asfálticas, a volumetria dessas

misturas, temperatura, o tráfego e a espessura da camada. Tais variáveis podem influenciar de forma significativa o desempenho das misturas asfálticas em serviço. Por isso, é claro que o fenômeno da fadiga é bastante complexo e sua análise se torna desafiadora, uma vez que misturas recicladas podem apresentar os mesmos valores de N_f que as misturas de referência.

- Os resultados obtidos no ensaio de DUI revelaram uma forte interação entre o ligante e o agregado, uma vez que o impacto nocivo da água não resultou na perda de adesão dos componentes das misturas. Um aspecto crucial destacado nessa análise é que, apesar da contribuição negativa da adição de RAP nos resultados do DUI, a inclusão do ligante modificado melhora significativamente as propriedades de adesão dos materiais.
- De acordo com a revisão bibliográfica e resultados deste estudo, torna-se evidente a relevância das características do RAP na influência do desempenho do concreto asfáltico. Assim sendo, é crucial considerar diversas variáveis que podem mudar de uma pilha de estoque de RAP para outra, tais como fracionamento, controle de umidade, rigidez do ligante RAP, porcentagem alvo de RAP utilizada, métodos de mistura, e outros fatores.
- Com base nas análises, pode-se dizer que as misturas contendo 20% de RAP mostraram-se satisfatórias em relação à dosagem e propriedades volumétricas. Assim, as misturas apresentaram boas propriedades mecânicas, resistência à umidade e deformação permanente, embora seja necessário tomar cuidados com a resistência, uma vez que o RAP aumenta a rigidez do material. Diante do fenômeno da fadiga, essa tarefa se torna mais complexa, tornando necessário a realização de outros tipos de análises. Ademais, a utilização do CAP 65/90-E demonstrou resultados satisfatórios nesta pesquisa, provavelmente devido à sua melhor capacidade de absorção de esforços e à eficiência aprimorada na recuperação elástica do concreto asfáltico.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- Utilizar maior quantidade de RAP nas misturas asfálticas recicladas, adicionando outros tipos ligantes asfálticos convencionais e modificados, com objetivo de aumentar a gama comparativa da pesquisa;
- Aprofundar a pesquisa relacionada à fadiga utilizando outras metodologias de ensaios, de modo a propor uma comparação entre diferentes maneiras de determinação deste mecanismo de falha em misturas recicladas;
- Investigar métodos de recuperação do ligante envelhecido do material reciclado, visando tornar a utilização de RAP ainda mais econômico e sustentável;
- Realizar testes em trechos experimentais para aprimorar avaliação do desempenho das misturas asfálticas recicladas em ambiente de campo.

REFERÊNCIAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO M 320. **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder**. Washington, D. C., 2017.

_____. AASHTO M 323. **Standard specification for Superpave volumetric Mix design**. Washington, D. C., 2022.

_____. AASHTO M 332. **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep and Recovery Test**. Washington, D. C., 2014.

_____. AASHTO R 28. **Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**, Washington, D. C., 2012.

_____. AASHTO T 79. **Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for HMA Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)**, Washington, D. C., 2012.

_____. AASHTO T 84. **Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate**, Washington, D. C., 2013.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR - 11341 **Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. ABNT NBR - 16208 - **Misturas asfálticas – Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. ABNT NBR - 15184 - **Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**, Rio de Janeiro, 2021.

_____. ABNT NBR - 15235 - **Materiais Betuminosos - Determinação do Efeito do Calor e do Ar em uma Película Delgada Rotacional**, Rio de Janeiro, 2009.

ALMEDIA JUNIOR, P. O. B. **Reciclagem de misturas 100% RAP: Investigação de parâmetros para avaliação e dosagem de agentes rejuvenescedores com foco na fadiga**. Tese de (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS, 2022.

ARRA. **An Overview of Recycling and Reclamation Methods for Asphalt Pavement Rehabilitation**. [S.l.]. 1992.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Hot-Mix Recycling**. Manual series nº 20, Maryland, USA, 1986.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM D 1856 - **Standard Test Methods for Recovery of Asphalt From Solution by Abson**. USA, 2021.

_____. ASTM D 5404 - **Standard Practice for Recovery of Asphalt From Solution Using the Rotary**. USA, 2012.

_____. ASTM D 6373 - **Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder**. USA, 2016.

_____. ASTM D 6648 - **Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. USA, 2018.

_____. ASTM D 7405 - **Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. USA, 2015.

_____. ASTM D 7175 - **Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. USA, 2015.

_____. ASTM D 8159 - **Standard Test Method for Automated Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures**. USA, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP Nº 897, de 18.11.2022 – Especificações dos asfaltos e dos aditivos asfálticos de reciclagem para misturas à quente, e suas regras de comercialização. Publicado 24.11.2022.

BARROS, L. M.; OTAVIANO, C. M. F.; Nascimento, L. A. H; Aragão, F. T. S. **Avaliação dos efeitos de propriedade de agregados na resistência a deformação permanente de misturas asfálticas**. 34º ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, p.1-12, 2020.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Edição 1ª edição - Rio de Janeiro – RJ, 2006.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Edição 2ª edição - Rio de Janeiro – RJ, 2022.

BOHN, K. A. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. Dissertação de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2017.

CASTRO NETO, A. M. **Proposta de Projeto de Dosagem de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo/SP, 2000.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas de reciclagem a quente**. Dissertação de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS, 2016.

CENTOFANTE, R.; SPECHT, L. P.; JUNIOR, P. O. B. A.; PINHEIRO, R. J. B.; PEREIRA, D. S. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 23, n. 03, p.1-19, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias: Relatório Gerência**, 25. ed. – Brasília, 2022.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. Report No. FHWA-HRT-11-021, n. FHWA, p. McLean, VA, 2011.

CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos de teores de RAP**. Dissertação de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS, 2020.

COSTA, D. B. **Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade à presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem**. Tese de (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande/PB, 2022.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER ME 035. **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”** – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER ME 043. **Misturas Betuminosas à quente – ensaio Marshall**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

_____. DNER ME 054. **Equivalente de areia**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNER ME 078. **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNER ME 083. **Agregados – análise granulométrica** – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER ME 081. **Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo** – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER ME 193. **Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – Determinação da deinsidade**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

____. DNER ES 385. **Pavimentação – Concreto asfáltico com asfalto polímero** – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1999.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT ES 031. **Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico** - Especificação de serviço. Brasília/DF, 2006.

____. DNIT ES 033. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente** – Especificação de serviço. Brasília/DF, 2021.

____. DNIT. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico – empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Projeto DNIT TED nº682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Rio de Janeiro, p. 65. 2018.

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

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

____. DNIT ME 180. **Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida** - Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

____. DNIT ME 183. **Pavimentação asfálticas - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada** - Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

____. DNIT ME 184. **Pavimentação asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente** - Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

____. DNIT ME 416. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico** - Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2019.

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

____. DNIT ME 427. **Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas** - Método de ensaio. Brasília/DF, 2020.

____. DNIT ME 439. **Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep)** - Método de ensaio. Brasília/DF, 2022.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos - 2ª edição** – Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, Publicação 720. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

DOYLE, J. D.; HOWARD, I. L. **Compactability and bitumen utilization of 100% warm mixed RAP**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 89, 2010, Washington. TRB, 2010.

DUARTE, E. V. N. **Avaliação reológica de ligante asfáltico 50/70 modificado com polímero reativo e não-reativo associado ao ácido poli fosfórico**. Tese de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande/PB, 2018.

EN 13108-1. **Bituminous mixtures. Material specifications. Asphalt Concrete** - 2016.

FONSECA, P. F. **Inovações incorporadas nas atualizações das normas de pavimentos do DER/SP**. Apresentação Técnica – 26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 49º Reunião Anual de Pavimentação, Aracaju/SE, 2024.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2003.

LO PRESTI, D.; VASCONCELOS, K.; OREŠKOVIĆ, M.; MENEGUSSO, G. P.; BRESSI, S. **On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agentes. Road Materials and Pavement Design**, p.1-24, 2019.

LUZ, P. M. S. G. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras Pinus e Eucalipto**. Tese de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande/PB, 2019.

LUZZI, F. C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. Dissertação de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS, 2019.

LUZZI, F. C.; SPECHT, L. P.; ALVES, V. S. **Dosagem de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de material**. Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 8, n. 1, p.23-39, 2021.

G1 – **Por que o Brasil depende tanto do transporte rodoviário?** 2018. Disponível: <https://g1.globo.com/economia/noticia/por-que-o-brasil-depende-tanto-do-transporte-rodoviario.ghtml>. Acessado em: 20.08.2023

GOMES, L.; MARICATO, S.; SANTOS, J. **Misturas Betuminosas com Reciclagem a Quente**. V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias. Recife/PE, Julho, 2006.

GOUVEIA, L. T. **Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) da Especificação SUPERPAVE**. Dissertação de (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, São Carlos, SP, 2002.

GROVER, A. **Is RAP just a black rock? The magazine of the Asphalt Institute digital Vol. 39. No.1, Spring 2024**. Disponível em < <https://asphalt.mydigitalpublication.com/> >. Acessado em 29.02.2024.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos**. Dissertação de (Mestrado). COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, 2014.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro. Editora Interciência, 2015.

MOCELIN, D. M. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico**. Dissertação de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2018.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, SC, 2004.

MONTEIRO, A. M. C.; SILVA, J. P. S.; REZENDE, L. R. **Laboratory study of hot recycled asphalt mixtures with different contents of RAP**. Revista Transportes, São Paulo, v. 31, n. 01, p.1-15, 2023.

NASCIMENTO, T. C. B.; FAXINA, A. L. **Avaliação dos efeitos da radiação ultravioleta sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com PPA e copolímeros SBS e SBR**. Revista Transportes, Rio de Janeiro, v. 25, n. 01, p.73-81, 2017.

NASCIMENTO, L. A. H.; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H.; KIM, Y. R.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T. **Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras**. 21º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, p.1-14, 2014.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA). **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage**. 12th Annual Asphalt Pavement Industry Survey, IS 138, EUA, 2021.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP)
Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement – Appendix II-1. Final Document. ERES Division of ARA Inc., Champaign Illinois, 2004.

NOROUZI, A.; SABOURI, M.; KIM, Y. R. **Evaluation of the fatigue performance of high RAP asphalt mixtures.** Journal of Taylor and Francis Group – Asphalt Pavements, CRC Press, 2014.

OLIVEIRA J. A. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo.** Dissertação de (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2013.

OLIVEIRA M. S. **Análise de fadiga em misturas asfálticas recicladas a quente.** Dissertação de (Mestrado) – Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília/DF, 2020.

OTAVIANO, F. C. M. **Influência da curva granulométrica no comportamento da mistura asfáltica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia Geotécnica) - Centro Universitário Augusto Motta - UNISUAM, Rio de Janeiro/RJ, 2017.

PINHEIRO, G. S. **Avaliação do processo de extração e recuperação de ligante asfálticos e da interação entre ligantes em misturas recicladas a quente.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo/SP, 2021.

PINHEIRO, G. S.; VASCONCELOS, K. **Procedimentos de extração e recuperação de ligantes asfálticos: uma revisão da literatura.** Revista Transportes, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p.1-17, 2022.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Tese de (Doutorado). Universidade Politécnica de São Paulo (USP), São Paulo/SP, 1999.

PIMENTEL R.; MIGUEL A.; TRILLO I.; MACIEL E.; MAXIMIANO F.; MOREIRA M.; BARROS M.; VILLELA A.; ALVES D.; HENRIQUE P.; CASTILHO W. **Rodovia de alta performance desenvolvida com adição de polímeros reciclados pós consumo e elvaloy (RET).** XXI CILA Congresso IberoLatinoAmericano del asfalto, Punta del Este/URU, p. 1-29, 2022.

PIRES, G. M. **A New methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation.** PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra, 2018.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P.; BROWN, R. E.; KENNED, Y. T. W. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction.** NAPA, Maryland, USA 1996.

ROWE, G. M.; BARRY, J.; CRAWFORD, K. **Evaluation of a 100% Rap Recycling Project in Fort Wayne, Indiana.** 8 th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. Volume 11. RILEM 2015.

SANTOS, E. F.; FERNANDES, JR. J. L. **Avaliação do módulo de resiliência de misturas asfálticas com granulometria definida pela faixa de agregados dominantes.** 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET 100% DIGITAL, 2020.

SILVA, J.P.S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas.** Tese de (Doutorado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/ DF, 2011.

STRATURA ASFALTOS – **Análise de desempenho em misturas asfálticas por meio da máquina COOPER-HYD-25-II** – Boletim Técnico nº22, 2021. Disponível em: <https://stratura.com.br/wp-content/uploads/2021/07/Boletim-Tecnico-No-22.pdf>. Acessado em: 19.11.2023

STRATURA ASFALTOS – **Comparação entre misturas de reciclagem aplicadas com ligantes convencional e modificado por polímero** – Palestra, 3º Congresso Paving Expo 2022.

Relatório Interno Petrobras Distribuidora S.a (2015) – **Boletim Técnico de Pavimentação.** Rio de Janeiro, RJ.

SIQUEIRA, M. V. **Avaliação de propriedade mecânicas de misturas asfálticas incorporadas com elevado teor de material fresado.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife/PB, 2021.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado.** Dissertação de (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo/SP, 2019.

TORRES, P. R. B; LUCENA, A. E. F. L.; SOUSA, T. M.; KRAU, M. M. T.; LUZ, P. M. S. G.; BARBOSA, L. F. L. **Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com adição de óleo vegetal residual.** Revista Transportes, São Paulo, v. 30, n. 01, p.1-13, 2022.

ZEGARRA, J. R. E. **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76-22.** Dissertação de (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos/SP, 2007.

WITCZAK, M. W. **Simple performance tests: Summary of recommended methods and database.** Transportation Research Board, 2005.

WHITEOAK, D. **SHELL Bitumen Handbook.** SHELL, Inglaterra, 1990.