

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS  
RECICLADAS A QUENTE**

**MATHEUS SILVA OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD**  
**COORIENTADOR: JOÃO PAULO SOUZA SILVA, DSc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: 349/20**

**BRASÍLIA / DF: 2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS  
RECICLADAS À QUENTE**

**MATHEUS SILVA OLIVEIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)  
ORIENTADOR**

---

**JOÃO PAULO SOUZA SILVA, DSc (UnB)  
(COORDENADOR)**

---

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**KAMILA VASCONCELOS SAVASINI, PhD (USP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 09 DE DEZEMBRO DE 2020.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, MATHEUS SILVA

Análise da Fadiga em Misturas Asfálticas Recicladas à Quente, [Distrito Federal], 2020  
xv, 136 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2020)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Pavimento

2. Misturas Asfálticas

3. Fresado

4. Fadiga

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, M. S. (2020). Análise da Fadiga em Misturas Asfálticas Recicladas à Quente. Dissertação de Mestrado, Publicação 349/20, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Matheus Silva Oliveira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise da Fadiga em Misturas Asfálticas Recicladas à Quente

GRAU / ANO: Mestre / 2020

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Matheus Silva Oliveira

Brasília/DF – Brasil

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me concedido sabedoria e persistência, e por me honrar com mais essa conquista.

Aos meu pais, Paulo e Maria, por mesmo devido a simplicidade não saberem ao certo do que se tratava um mestrado, me deram apoio e força para continuar a caminhada e não esmorecer no trajeto, e por sempre apoiarem minhas decisões, em prol da minha realização pessoal.

Aos meus irmãos Ana Cláudia e Paulo Sérgio por me motivarem cada vez mais, e por confiarem em mim.

Em especial à minha amiga, Claudia Azevedo, que mesmo estando longe, nos momentos difíceis me aconselhava sobre o que fazer, e que me ajudou muito no decorrer do processo de aperfeiçoamento como pessoa, engenheiro e pesquisador, ao qual tenho grande apreço e consideração.

Ao caro Pedro Vítor de Oliveira Souza, pelo companherismo e por me ensinar muitas coisas aos quais eram necessárias e por estar comigo mesmo longe.

Ao professor Márcio Muniz pela orientação, confiança, paciência, por seu empenho e ética como docente e profissional.

Meu agradecimento ao professor João Paulo pela coorientação e toda dedicação em se prontificar a me ensinar, além da viabilização prática da pesquisa que foi executada em parceria com a Universidade Federal de Goiás, onde é professor.

Aos meus amigos Gabriella, Karla e José Wilson por dividirem comigo o seu tempo e prontificarem a ajudar nos momentos de precisão, o que tornou a caminhada mais humana e acolhedora, e à Keyllane, pela amizade adquirida e por estar sempre comigo durante esses anos.

Meu agradecimento à todos integrantes do INFRALAB, em representatividade à Letícia Nunes, pela ajuda do dia a dia com ensaios e equipamentos, além do compartilhamento de conhecimento.

À todos, meu muitíssimo obrigado.

## ANÁLISE DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS À QUENTE

### RESUMO

Os pavimentos flexíveis, ao longo de sua vida útil estão sujeitos a solicitações oriundas do tráfego, que causam deformações, gerando dano ao revestimento. Sendo as patologias mais recorrentes o trincamento por fadiga e a deformação permanente, cujo processo de fadiga está relacionado ao trincamento do revestimento asfáltico, devido o carregamento repetido, estando a fadiga relacionada a rigidez das misturas e do material. Assim, dada premissa dos deslocamentos e interligações geográficas no Brasil serem em maioria realizado pela matriz rodoviária, a necessidade de conceber pavimentos com melhor desempenho à fadiga é um tema relevante. E juntamente com a precisão de novas estruturas, surge a preocupação com o meio ambiente mediante a exploração de jazidas, demandando a adoção de técnicas sustentáveis, e menos poluentes para a pavimentação. Nesta perspectiva, a reciclagem de pavimentos traz a possibilidade de redução do quantitativo de exploração às jazidas de agregados minerais, com a utilização do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) em substituição matriz de agregados da mistura em até 100%. Logo, a presente pesquisa teve como foco estudar o comportamento da fadiga em misturas asfálticas recicladas à quente, utilizando agregado do tipo micaxisto, ligante CAP 50-70, e agente rejuvenescedor AR-5, com teores de 25, 45 e 100% de incorporação do RAP em substituição dos agregados. O processo de dosagem adotado conforme especificação Superpave, focou na análise de desempenho mecânico das misturas em aspectos de resistência, deformação, adesão e coesão. Os resultados obtidos, indicaram um bom desempenho das misturas recicladas. Nos ensaios de módulo resiliência e resistência a tração, foram observados proporcionalidade nos valores obtidos com incorporação de RAP, além da coesão e adesão atestada pelo dano por umidade induzida e desgaste cântabro serem satisfatórias. Constatou-se uma melhora no módulo dinâmico para misturas com maiores teores, isso se deve ao fato das misturas estarem mais rígidas. Devido a fadiga estar associada a rigidez, as misturas com maiores incorporações tenderam a uma menor vida de fadiga, estando a mistura com 25% de RAP com melhor comportamento. Sobretudo os resultados indicaram um bom desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas quente, comprovando a viabilidade na aplicação da técnica em obras de pavimentação.

**Palavras-Chaves:** RAP, reciclagem, fadiga, misturas quente, sustentabilidade, pavimentos.

## FATIGUE ANALYSIS IN HOT RECYCLED ASPHALT MIXTURES

### ABSTRACT

Flexible pavements, throughout their useful life, are subject to stresses arising from traffic, which cause deformations, causing damage to the coating. The most common pathologies are fatigue cracking and permanent deformation, whose fatigue process is related to cracking of the asphalt coating, due to repeated loading, with fatigue being related to the stiffness of mixtures and material. Thus, given the premise that displacements and geographical interconnections in Brazil are mostly carried out by the road network, the need to design pavements with better fatigue performance is a relevant topic. And along with the precision of new structures, concern with the environment arises through the exploitation of deposits, demanding the adoption of sustainable and less polluting techniques for paving. In this perspective, the recycling of pavements brings the possibility of reducing the amount of exploration to the deposits of mineral aggregates, with the use of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) in substitution matrix of aggregates of the mixture in up to 100%. Therefore, the present research focused on studying the behavior of fatigue in hot recycled asphalt mixtures, using mica shale aggregate, CAP 50-70 ligand, and AR-5 rejuvenating agent, with contents of 25, 45 and 100% of incorporation RAP instead of aggregates. The dosing process adopted according to the Superpave specification, focused on the analysis of the mechanical performance of the mixtures in aspects of strength, deformation, adhesion and cohesion. The results obtained, indicated a good performance of the recycled mixtures. In the tests of resilience module and tensile strength, proportionality was observed in the values obtained with the incorporation of RAP, in addition to the cohesion and adhesion attested by the damage caused by moisture and cannabinoid wear are satisfactory. There was an improvement in the dynamic module for mixtures with higher contents, this is due to the fact that the mixtures are more rigid. Due to fatigue being associated with stiffness, mixtures with greater incorporation tended to have a shorter fatigue life, with the mixture having 25% RAP with better behavior. Above all, the results indicated a good mechanical performance of hot recycled asphalt mixtures, proving the feasibility in applying the technique in paving works.

**Keywords:** RAP, recycling, fatigue, hot mixtures, sustainability, pavements.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	16
	1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....	18
	1.2 OBJETIVOS.....	19
	1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
	2.1 RESTAURAÇÃO E RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	21
	2.2 CENÁRIO NACIONAL E INTERNACIONAL .....	25
	2.3 RAP- <i>RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT</i> .....	28
	2.4 RECICLAGEM À QUENTE .....	30
	2.4.1 Taxa de reciclagem.....	33
	2.4.2 Limitações quanto ao uso do RAP em misturas recicladas a quente .....	34
	2.5 DOSAGEM SUPERPAVE DAS MISTURAS RECICLADAS À QUENTE .....	30
	2.6 COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS À QUENTE .....	38
	2.7 DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS.....	42
	2.8 FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	47
	2.8.1 Fadiga por flexão a 4 pontos .....	57
	2.8.2 Fadiga por flexão a 3 pontos .....	57
	2.8.3 Fadiga por flexão em corpos de prova trapezoidais (2 pontos).....	58
	2.8.4 Fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) .....	58
	2.8.5 Fadiga por compressão diametral.....	59
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
	3.1 MATERIAIS .....	62
	3.1.1 Material fresado.....	62
	3.1.2 Rejuvenescedor .....	63
	3.1.3 Agregado mineral .....	63
	3.1.4 Ligante asfáltico .....	63
	3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	64
	3.2.1 Caracterização do agregado mineral .....	65
	3.2.2 Caracterização do ligante asfáltico.....	66
	3.2.3 Caracterização do RAP .....	67

3.3	DOSAGEM DAS MISTURAS RECICLADAS .....	68
3.4	MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS .....	72
3.5	COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS .....	73
3.6	ENSAIOS MECÂNICOS.....	77
3.6.1	Resistência a tração por compressão diametral .....	78
3.6.2	Determinação do dano por umidade Induzida.....	79
3.6.3	Desgaste Cântabro- determinação da perda de massa por abrasão .....	81
3.6.4	Determinação Módulo de Resiliência .....	83
3.6.5	Determinação da fadiga por compressão diametral a tensão controlada.....	84
3.6.6	Determinação do módulo dinâmico .....	86
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	89
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS VIRGENS .....	90
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE VIRGEM .....	91
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO RAP .....	92
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO AGENTE REJUVENESCEDOR .....	97
4.5	DOSAGEM SUPERPAVE.....	97
4.6	COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS RECICLADAS .....	100
4.6.1	Resistência à tração por compressão diametral (RT) .....	100
4.6.2	Dano por umidade induzida (DUI).....	102
4.6.3	Desgaste Cântabro .....	104
4.6.4	Módulo Resiliência.....	106
4.6.5	Módulo Dinâmico.....	108
4.6.6	Comportamento à fadiga por compressão diametral das misturas recicladas ....	118
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	121
5.1	CONCLUSÕES.....	121
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	124
	REFERÊNCIAS .....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Subclassificação dos processos de reciclagem de pavimentos. ....	22
Tabela 2-2 Tipos de reciclagem de pavimentos. ....	23
Tabela 2-3 Classificação dos processos de reciclagem de pavimentos. ....	24
Tabela 2-4 Classificação dos processos de reabilitação e recuperação de pavimentos ....	24
Tabela 2-5 Geração de RAP em trechos administrados pelo grupo CCR. ....	27
Tabela 2-6 Gestão do RAP. ....	30
Tabela 2-7 Valores de $N_{inicial}$ , $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$ , para diferentes carregamentos de tráfego. ...	44
Tabela 2-8 Fatores influentes na resistência a fadiga. ....	44
Tabela 2-9 Diferença entre os ensaios de vida de fadiga. ....	48
Tabela 3-1 Composição das misturas recicladas produzidas ....	83
Tabela 3-2 Ensaios mecânicos realizados e normativas. ....	90
Tabela 3-3 Corpos de prova utilizados na pesquisa. ....	90
Tabela 4-1 Caracterização do micaxisto. ....	90
Tabela 4-2 Caracterização do CAP 50/70. ....	92
Tabela 4-3 Massa específica medida em estado solto do RAP. ....	93
Tabela 4-4 Massa específica do RAP. ....	93
Tabela 4-5 Dados de extração de ligante do RAP. ....	93
Tabela 4-6 Caracterização do CAP remanescente. ....	94
Tabela 4-7 Densidade, massa específica e absorção do agregado do RAP. ....	95
Tabela 4-8 Desgaste e forma dos agregados do RAP. ....	95
Tabela 4-9 Caracterização do rejuvenescedor. ....	97
Tabela 4-10 Distribuição granulométrica das misturas e faixa limite DNIT. ....	98
Tabela 4-11 Dados de dosagem das misturas recicladas (CP's cilíndricos). ....	99
Tabela 4-12 Dados de dosagem das misturas recicladas (placas). ....	100
Tabela 4-13 Dados de RT das misturas recicladas. ....	100
Tabela 4-14 Dados de RRT das misturas recicladas. ....	102
Tabela 4-15 Dados de desgaste cântabro das misturas recicladas. ....	106
Tabela 4-16 Dados de MR das misturas recicladas. ....	106
Tabela 4-17 Dados de MD para mistura reciclada MAR-R100. ....	109
Tabela 4-18 Dados de MD para mistura reciclada MAR-R45. ....	110

Tabela 4-19 Dados de MD para mistura reciclada MAR-R25.....	111
Tabela 4-20 Rigidez das misturas recicladas. ....	119

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Técnicas de reciclagem de pavimentos .	23
Figura 2-2 Amostra De RAP .	28
Figura 2-3 Ensaio de desempenho mecânico em misturas asfálticas .	44
Figura 2-4 Diferença entre os estados de tensão e deformação controlada no ensaio de vida de fadiga.	51
Figura 2-5 Tipos de ensaio para determinação da vida de fadiga.	47
Figura 2-6 Características dos ensaios de vida de fadiga.	48
Figura 2-7 Condições de carregamento no ensaio de fadiga.	62
Figura 3-1 Local de coleta do material fresado.	62
Figura 3-2 Fluxograma do programa experimental.	61
Figura 3-3 Caracterização do agregado mineral.	61
Figura 3-4 Caracterização do ligante asfáltico .	66
Figura 3-4 Processo de obtenção e caracterização do fresado.	70
Figura 3-6 Procedimento de rotaevaporação.	74
Figura 3-7 Compactadores giratórios SuperPave.	76
Figura 3-8 Corpos de prova produzidos.	81
Figura 3-9 Curva de compactação dos CP's.	81
Figura 3-10 Densidade e RT das misturas.	82
Figura 3-11 Usinagem e compactação das misturas recicladas.	84
Figura 3-12 Rolo compactador mecânico.	85
Figura 3-13 Processo de compactação das amostras em placas.	86
Figura 3-14 Protótipo para confecção e desmolde de placas.	87
Figura 3-15 Placas produzidas.	62
Figura 3-16 Corpos de prova prismáticos.	88
Figura 3-17 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral.	90
Figura 3-18 Ensaio de dano por umidade induzida.	93
Figura 3-19 Ensaio de desgaste cântabro.	94
Figura 3-20 Ensaio de módulo de resiliência.	95
Figura 3-21 Ensaio de fadiga por compressão diametral.	98
Figura 3-22 Ensaio de módulo dinâmico em vigas prismáticas.	100

Figura 4-1 Curva granulométrica do agregado virgem .....	103
Figura 4-2 Curva granulométrica do RAP. ....	91
Figura 4-3 Curva granulométrica das misturas recicladas, enquadradas na faixa C DNIT. ....	98
Figura 4-4 Gráfico das curvas de RT para misturas recicladas. ....	101
Figura 4-5 Gráfico de DUI e RRT das misturas recicladas.....	116
Figura 4-6 Gráfico do desgaste cântabro das misturas recicladas.....	118
Figura 4-7 Curva mestra da mistura MAR-R100.....	96
Figura 4-8 Variabilidade do ângulo de fase da mistura MAR-R100. ....	98
Figura 4-9 Curva mestra da mistura MAR-R45.....	101
Figura 4-10 Variabilidade do ângulo de fase da mistura MAR-R100. ....	116
Figura 4-11 Curva mestra da mistura MAR-R25.....	119
Figura 4-12 Variabilidade do ângulo de fase da mistura MAR-R100. ....	101
Figura 4-13 Curva mestra das misturas recicladas.....	116
Figura 4-14 Vida de fadiga por diferença de tensão das misturas recicladas. ....	119
Figura 4-15 Vida de fadiga por deformação resiliente das misturas recicladas.....	119

## LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIações

4PB	<i>Four Point Bending;</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials;</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>apud</i>	Citado por;
ARRA	Associação de Reciclagem Asfáltica dos Estados Unidos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials;</i>
AR	Agente Rejuvenecedor
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo;
CNT	Confederação Nacional de Transporte;
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre;
DUI	Dano por Umidade Induzida
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer;</i>
EN	Norma europeia;
<i>et al</i>	E outros;
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	<i>Flow Number</i>
Hz	Hertz;
IGG	Índice de Gravidade Global
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura;
LabAsfalto	Laboratório de Asfalto
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep;</i>
kN	Quilo Newton;
kPa	Quilo Pascal;
MAR-R25	Mistura Reciclada com 25%
MAR-R45	Mistura Reciclada com 45%
MAR-R100	Mistura Reciclada com 100%
Máx	Máximo;
MD	Módulo Dinâmico
Mín	Mínimo;
mm	Milímetros;
MPa	Mega Pascal;
M&R	Manutenção e Reabilitação
MR	Módulo Resiliência
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
PCI	Índice de Condição do Pavimento
R <sup>2</sup>	Coefficiente de correlação linear;
RBV	Relação Betume Vazios;

RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement;</i>
RT	Resistência a Tração
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test;</i>
s	Segundos;
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program;</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Pavements;</i>
S-VECD	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage;</i>
TR	Taxa de reciclagem
TRa	Taxa de reciclagem com agregado
TRl	Taxa de reciclagem com ligante
UFG	Universidade Federal de Goiás;
UnB	Universidade de Brasília;
VAM	Vazios no Agregado Mineral;
VSA	Valor de Serventia Atual
Vv	Volume de Vazios.

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	% de perda de massa cântabro
D	dano
Ds	densidade do ligante
<i>Eel</i>	Módulo de elasticidade
$E^*$	módulo complexo
$ E^* $	módulo dinâmico
Fs	força exercida pelo equipamento
<i>f</i>	frequência
h	altura da amostra
i	número imaginário
$k_i$	coeficientes dos modelos
Le	comprimento da vigota entre apoios externos
Li	comprimento da vigota entre apoios internos
$n_i$	coeficientes dos modelos
N	número de ciclos
Nf	vida de fadiga
P	carga cíclica em Newtons
r	raio da amostra
RRT	% resitência retida a tração
S0	rigidez inicial
t	tempo
$\mu$	coeficiente de Poisson'
$\varepsilon$	deformação
$\varepsilon_0$	amplitude de deformação
$\varepsilon_i$	deformação de tração
$\varphi$	ângulo de fase da mistura
$\omega$	frequência angular
$\omega_r$	frequência angular reduzida
$\sigma$	tensão
$\sigma_i$	tensão de tração
$\sigma_t$	tensão de tração'
$\sigma_r$	resistência a ruptura estática
$\sigma_0$	amplitude de tensão
$\Delta\sigma$	diferença entre tensão horizontal e vertical
$\tau$	tensão cisalhante
$\nu$	coeficiente de Poisson
w	energia dissipada

# 1 INTRODUÇÃO

Em razão do Brasil ser um país cujas dimensões são continentais, a busca por infraestruturas de transportes destinadas à interligação dos espaços geográficos, é algo estratégico e necessário. Dessa maneira, o modal rodoviário atualmente, é o mais utilizado no Brasil, sendo responsável por mais de 60% do transporte de cargas e por mais de 90% do transporte de passageiros (CNT, 2019).

Ao se fazer análise da atual situação da malha rodoviária no país, segundo levantamento feito pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT) em 2019, apenas 12,4% das rodovias brasileiras são pavimentadas, ou seja, 213.453 km de um total de 1.720.700 km existentes, sendo que destes pavimentados, 99% são pavimentos flexíveis.

A respeito disso, a CNT constatou que o desgaste é a principal deficiência observada no período, sendo assim, o percentual de trechos com pavimento desgastado passou de 13% em 2004, para 49% em 2016, e para 50,9% em 2019. Deste mesmo modo, a porcentagem de trechos federais em perfeito estado de conservação no país caiu de 48% para 32% no mesmo período.

As rodovias pavimentadas na região Centro-Oeste representam 17,5% da totalidade existente no país, onde no período de 2009 a 2019 houve um crescimento de 90,8% do número de frota operante, o que torna um certo desalinhamento em função da não proporcionalidade de crescimento da malha pavimentada, ocasionando então um processo de desgaste e de surgimento de defeitos de maneira intensificada, comprometendo a qualidade das vias na região (CNT, 2019).

Entretanto, ao se analisar as condições do pavimento desta malha, nota-se que este nem sempre apresenta funcionalidade ao que se destina. Isso é perceptível não apenas com quantitativo de dados proveniente das pesquisas, mas também em função das consideráveis perdas de insumos, dentre outros problemas, decorrentes das condições da infraestrutura e dos grandes deslocamentos necessários, principalmente no transporte de cargas.

A falta de manutenção, bem como excesso de cargas excepcionais, ausência de um controle tecnológico dos materiais, deficiência na fiscalização aos parâmetros de qualidade na etapa de construção, e inexistência dos dispositivos de drenagem, compõem os fatores causais dos danos gerados na malha rodoviária brasileira. Com relação à camada de revestimento, a principal causa de dano está associada à repetição do carregamento que leva ao trincamento por fadiga e à deformação permanente, refletindo assim no desprendimento de material e em afundamentos excessivos nas trilhas de rodas (Nunes, 2017).

Dentre os principais defeitos e/ou patologias que se tem nos pavimentos rodoviários do país

nota-se que dos 108.863 km analisados, 41 % dos pavimentos apresentam aspectos considerados como “bom” para operação, enquanto 59% apresentam sinais de desgaste e predominam defeitos tais como trinca em malha e/ou remendos, afundamentos, ondulações e buracos, bem como situações em que o pavimento está totalmente destruído (CNT, 2019).

Oliveira (2018) comenta que esse fato se deve principalmente à má qualidade da rede de pavimentos, o que torna necessário a adoção de ações de manutenção e reabilitação e até reconstrução, para garantir desempenho e serventia da estrutura durante sua vida útil.

Juntamente com essas ações, surgem a geração dos resíduos oriundos do processo de desbaste do pavimento antigo, destinados a deposição em bota foras, o que causa uma certa preocupação ambiental. Dessa maneira, a busca por novas tecnologias de reaproveitamento de materiais provenientes dos serviços de restauração de pavimentos, torna-se cada vez mais presente no meio técnico.

Nesse contexto, tem-se que as pesquisas no âmbito da reciclagem de pavimentos e o uso do material fresado no Brasil tem avançado, onde cada vez mais centros de pesquisas bem como órgãos de fomento e concessionárias, tem percebido a importância dos processos e técnicas utilizados, mediante a incorporação do mesmo em misturas que de alguma maneira contenham esse material.

O material fresado recebe diversas designações no meio técnico e científico, podendo basicamente ser dividido em duas categorias:

- Fresado: proveniente do corte e/ou desbaste de duas ou mais camadas, assim contendo material da capa de rolamento e também das camadas granulares;
- RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*): material fresado apenas da camada de rolamento, portanto não contém resíduos de solo das camadas granulares (Base, Subbase e Reforço).

Contudo, conhecer as implicações da reciclagem de pavimentos, assim como analisar o comportamento do material oriundo da fresagem, seja em termos relacionados às práticas sustentáveis, a economia, a qualidade e, principalmente ao desempenho do material na concepção de novos pavimentos, passa a ser algo de grande importância para o meio técnico e científico.

Uma vez que com há crescente preocupação com as questões ambientais, e é notório que a estrutura de um pavimento não deve ser concebida apenas com a finalidade em resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e proporcionar aos usuários o rolamento com conforto e segurança,

esta também deve ser durável e economicamente sustentável (Suzuki, 2019).

## **1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA**

A demanda por técnicas eficientes aplicadas aos projetos de construção, manutenção e restauração de pavimentos já é uma realidade, e a busca por alternativas que sejam economicamente sustentáveis tem ganhado dia após dia maior aceitação.

Dessa forma, diversos órgãos de infraestrutura rodoviária, tem-se atentado a aplicabilidade da técnica de reciclagem de pavimentos, onde, materiais que antes eram descartados e considerados como resíduos, tendem a ser empregados na concepção de novas misturas e ou como estabilizantes granulométricos de camadas granulares do pavimento.

Visto que diversos países fazem a reciclagem da camada asfáltica para concepção de novas capas, a aplicação da técnica tem sido amplamente discutida a fim de estabelecer o uso deste material reciclado, que se trata de um material de potencial nobre, garantindo assim soluções sustentáveis e economicamente viáveis, aplicadas à pavimentação.

A partir de análises das propriedades do material, e com o monitoramento do nível de desempenho das camadas produzidas com a inserção de RAP, é possível observar em diversas pesquisas que o material apresenta bom comportamento quando incorporado em novas dosagens, e também quando este compõe a nova mistura como um todo, com 100% de RAP na composição em massa.

Segundo Specht (2013), dentre as vantagens da reciclagem estão a redução nos custos de construção, na conservação de agregados e ligantes, na preservação da geometria do pavimento existente, na manutenção das condições de drenagem, na preservação do meio ambiente, na conservação de energia, na homogeneização estrutural, na readequação estrutural e na rápida liberação da pista, fato este atrelado a rigidez do material.

Assim, o reaproveitamento e reciclagem podem ser considerados como técnica economicamente sustentável, visto o risco de sucesso na redução de custo final do processo, além da preservação dos recursos naturais.

Diante da realidade do modal rodoviário ser o mais demandado no Brasil, tem-se que os investimentos com a criação de novas redes de pavimentos, bem como as ações de restauração e reconstrução das já existentes, é algo já bastante difundido. Deste modo, surge uma preocupação com o acúmulo de resíduos nos bota foras devido as ações de restauração e reconstrução, fato este

que no Brasil há carência no processo de controle com a deposição destes resíduos.

Suzuki (2019) afirma que o controle da armazenagem e deposição destes resíduos provindos da fresagem de pavimentos antigos é algo que deve ser levado em consideração pelos órgãos responsáveis, uma vez que trata de um material de composição para concepção de novas misturas, e deve-se ter um controle tecnológico do mesmo, a fim de garantir parâmetros de conhecimento do material a ser incorporado.

Nesse sentido, a presente dissertação é justificada visando a aplicabilidade do material fresado do revestimento de pavimentos flexíveis em misturas asfálticas recicladas a quente, dada a premissa de avaliar se as características funcionais e mecânicas das misturas com RAP, com enfoque na vida de fadiga, são semelhantes à de uma mistura convencional aplicada em vias de tráfego moderado a alto no estado de Goiás.

É importante ressaltar ainda que o interesse em pesquisar sobre o assunto, partiu da observação de grandes volumes de material fresado em botas foras as margens das rodovias em Goiás, que tem aumentado corriqueiramente, e dada a importância da aplicabilidade e utilização de materiais que tornem as rodovias mais resistentes e duráveis com baixo custo de produção, e menor impacto ambiental.

## **1.2 OBJETIVOS**

A presente dissertação teve como objetivo avaliar o desempenho das misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de RAP em diferentes teores, com ênfase na vida de fadiga, visando aplicação das misturas recicladas em obras de pavimentação no estado de Goiás.

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos alguns objetivos específicos, que se pautaram em:

- Prevê se o uso de elevados teores de RAP em misturas asfálticas recicladas a quente comprometem o desempenho das misturas, para isso buscou-se avaliar misturas com 25, 45 e 100% de incorporação;
- Avaliar se as diferenças nos processos de dosagem em função dos teores de incorporação de RAP na mistura, interferem no seu desempenho mecânico;
- Analisar se a incorporação de agente rejuvenescedor surfactante na mistura reciclada, melhora os parâmetros e índices obtidos em laboratório para determinação do desempenho das misturas em campo;

- Verificar, a partir dos objetivos anteriores, se há potencial na utilização de RAP para produção de novas misturas de desempenho satisfatório a serem aplicadas em vias de médio ou alto volume de tráfego no estado de Goiás.

### **1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução ao tema da pesquisa destacando a finalidade da mesma, com uma breve abordagem de dados estatísticos, seguido da justificativa e relevância da pesquisa e posteriormente os objetivos geral e específico que buscou atingir.

No Capítulo 2 é realizada a revisão da literatura acerca do tema, abordando aspectos do estado da arte e da ciência em prol da técnica de uso do RAP para concepção de novas misturas asfálticas. Por se tratar de misturas recicladas com elevada rigidez, são apresentados os conceitos referente a desempenho das misturas asfálticas e ensaios de fadiga por tensão controlada para avaliação da vida de fadiga. Essa abordagem também tem o objetivo de evidenciar o uso, e disseminação da técnica em outros países com diferentes percentuais de incorporação na dosagem, e as análises executadas tanto em desempenho mecânico, como em operacionalidade das usinas para a concepção da misturas recicladas.

O Capítulo 3 refere-se aos materiais, conceitos e critérios utilizados no planejamento e execução da metodologia, onde é apresentada a matriz experimental da pesquisa, descrevendo o processo de obtenção, coleta e caracterização do fresado e dos materiais que foram utilizados, a dosagem das misturas, os procedimentos utilizados para produção dos corpos de prova, os ensaios mecânicos realizados nas misturas com diferentes percentuais de incorporação de RAP e rejuvenescedor, assim como os equipamentos utilizados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios cumpridos. Aqui ainda foi realizada a interpretação desses resultados, comparando-os com parâmetros estabelecidos em normas e trabalhos técnicos disponíveis na literatura, a fim de se obter conclusões.

E por fim o capítulo 5 refere-se às considerações finais e conclusões obtidas durante a realização da pesquisa, além de sugestões para futuros estudos dentro da mesma temática.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os pavimentos são definidos como sendo uma estrutura capaz de resistir aos efeitos do tráfego, apresentando assim condições de conforto e segurança ao usuário no decorrer da sua vida útil de serviço, classificados comumente como flexíveis ou rígidos, podendo ainda haver os do tipo semirrígidos.

Dado seu comportamento estrutural e funcional, Bernucci *et. al.* (2008) afirmam que as camadas estruturais de um pavimento são projetadas para resistirem a distintas solicitações de carga, e transmitir esforços, de modo que ocorra um alívio das pressões nas camadas inferiores, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto; e que a camada de revestimento cujo comportamento é funcional, é destinada a receber de forma direta a carga dos veículos e de modo mais intenso à ação climática.

### 2.1 RESTAURAÇÃO E RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A técnica de pavimentação tem como finalidade garantir condições funcionais de tráfego, otimizando o desempenho das viagens, dada premissa de conforto e segurança ao usuário. Devido ao tempo e à ação do tráfego, o pavimento chega ao fim da sua vida útil e torna-se necessário que a infraestrutura receba ações de manutenção e reabilitação (M&R), para que haja um ganho no nível de serventia do pavimento.

O momento de entrar com as ações de M&R está correlacionado com a condição estrutural e funcional do pavimento, determinados por meio de índices, tais como o PCI (Índice de Condição do Pavimento), VSA (Valor de Serventia Atual) bem como o IGG (Índice de Gravidade Global), que tratam de ferramentas e metodologias dentro do sistema de gerenciamento do pavimento, que auxiliam na determinação real da condição da estrutura, e na ação de intervenção mais eficaz (OLIVEIRA, 2018).

Entretanto de acordo com Bonfim (2016), em uma análise funcional, quando o revestimento não atende mais a finalidade de tráfego seguro e confortável deve-se intervir visando a sua restauração. Pode-se considerar como uma dessas intervenções a fresagem com a reciclagem deste material fresado na execução do reforço estrutural de uma via, ou mesmo a construção de uma nova capa.

A reciclagem de pavimentos teve início em meados da década de 70 nos Estados Unidos,

com o princípio da fragmentação, desbaste e retirada da camada antiga do pavimento para reutilização combinada a outros componentes (GENNESSEAUX, 2015). Neste momento o petróleo registrava valores muito elevados, ocasionando em altos custos de fabricação, transporte e aplicação das misturas. Surgindo a reciclagem então como uma solução da problemática de recursos não renováveis e da deposição dos resíduos resultante de pavimentos degradados.

Já no Brasil a reciclagem de pavimentos teve sua primeira utilização na obra de restauração da Via Anchieta, no estado de São Paulo, no ano de 1980 (Bonfim 2016).

Centofante (2016) afirma, que a técnica de reciclagem de pavimentos consiste no processo de reutilizar o material da camada de rolamento envelhecida e deteriorada de um pavimento, cuja retirada é feita por meio de uma fresagem, para a produção de novas misturas tendo ali um aproveitamento de agregados e ligantes remanescentes.

Genesseeaux (2015) relata que as técnicas de fresagem podem ser classificadas quanto à espessura do corte, e quanto à rugosidade. Já Bonfim (2016) relata que a fresagem pode ser classificada quanto ao corte e rugosidade, classificações estas relacionadas a profundidade de desbaste e ao modo de intervenção. E classifica a reciclagem não somente ao tipo, mas em categorias mais descritivas e detalhadas, quanto à origem, ao local, tipo de material, incorporação e aplicação, conforme Tabela 2.1.

**Tabela 2-1** Subclassificação dos processos de reciclagem de pavimentos.

<b>Quanto ao Corte</b>	<b>Quanto à Espessura</b>
<b>Superficial:</b> ou de regularização, dispensa o recapeamento, garante padrões mínimos de funcionalidade.	<b>Padrão:</b> empregadas em processos que necessitam da posterior aplicação de nova camada de revestimento, distância longitudinal dos cilindros de 15mm.
<b>Rasa:</b> pode chegar até a camada de ligação, corte 5 cm, defeitos na capa.	<b>Fina:</b> empregada na remoção de sinalização horizontal da pista, dispensa recapeamento, cilindros a 8mm.
<b>Profunda:</b> corte pode atingir a sub-base, utilizada para defeitos estruturais	<b>Microfresagem:</b> empregada para remoção de espessuras muito delgadas do pavimento, cilindros de 2 a 3mm espaçados.

**Fonte:** Adaptado de BONFIM (2016).

Quanto aos processos de reciclagem sendo este a frio e à quente, são classificados de acordo com o local onde é feita a reciclagem, podendo ser *in situ* ou em usina específica fora do local de fresagem, contudo a escolha pelo método depende da condição da superfície do pavimento,

disponibilidade de equipamentos e avaliação dos custos (SACHET, 2007).

Picado-Santos *et al* (2005) estabelecem cinco principais técnicas de reciclagem em função do tipo de incorporação, local de reciclagem e tipologia de homogeneidade da mistura, conforme Tabela 2.2 e Figura 2.1.

**Tabela 2-2** Tipos de reciclagem de pavimentos.

Tipologia de reciclagem	Mistura	
	<i>In situ</i>	Em centrais
Reciclagem a frio com cimento	Sim	Não
Reciclagem a frio com emulsão	Sim	Sim
Reciclagem a frio com asfalto espuma	Sim	Sim
Reciclagem morna com emulsão	Não	Sim
Reciclagem a quente	Sim	Sim

**Fonte:** Adaptado de Picado-Santos (2005).



**Figura 2-1** Técnicas de reciclagem de pavimentos (Martinho 2005 apud autor 2020).

Ainda há outros pesquisadores que classificam o tipo de reciclagem em categorias mais descritivas. Bonfim (2016) apresenta uma classificação mais detalhada quanto a origem, local, tipo de material, incorporação e aplicação apresentada na Tabela 2.3.

**Tabela 2-3** Classificação dos processos de reciclagem de pavimentos.

<b>Quanto à geometria original</b>	Sem modificações	Quando se mantém as cotas do greide
	Com modificações	Quando não se mantém as cotas do greide
<b>Quanto ao local de processamento</b>	Em usina	Fixa ou móvel, quente ou frio
	<i>In situ</i>	A quente ou frio
	Mista	Reciclagem <i>in situ</i> da Base e aplicação de reciclagem a quente processada em usina com material fresado
<b>Quanto à fresagem do material</b>	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do ambiente
<b>Quanto à profundidade de corte</b>	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, Base, e até Sub-Base
<b>Quanto à mistura reciclada</b>	Mistura a quente	PMF
	Mistura a frio	CBUQ, PMQ
<b>Quanto ao uso da mistura</b>	Como Base reciclada	
	Como camada de ligação	<i>Binder</i>
	Como revestimento	
<b>Quanto aos materiais adicionados</b>	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e Cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial, CAP e polímeros	Rejuvenescimento
	Misturas asfálticas	Adição de material fresado

**Fonte:** Adaptado de BONFIM (2016).

Existe ainda uma outra classificação, proposta pela Associação de Reciclagem Asfáltica dos Estados Unidos, dividida em cinco categorias sendo, reciclagem a frio; a quente; a quente *in situ*; a frio *in situ*; e, profunda, detalhados na Tabela 2.4.

**Tabela 2-4** Classificação dos processos de reabilitação e recuperação de pavimentos (ARRA, 2009).

<b>Classificação</b>	<b>Fresagem</b>	<b>Utilização</b>	<b>Tipo de reciclagem</b>
Cold planing	controlada	regularização / texturização	<i>in situ</i> , ou em usina se for ter recomposição
Hot recycling in asphalt plant	controlada	regularização / novas misturas	usina gravimétrica e ou volumétrica
Hot in-place recycling	2 a 4 cm	regularização / novas misturas	<i>in situ</i> (aquecimento e incorporações)
Cold in-place recycling	2 a 4 cm	regularização / novas misturas	<i>in situ</i> (frio e com incorporações de emulsões)
Full depth reclamation	profunda	estabilização granulométrica	<i>in situ</i> ( incorporado nas camadas granulares)

**Fonte:** Adaptado de ARRA (2009).

É possível notar que os métodos podem ser utilizados isoladamente e ou combinados, o que vai definir a escolha do mais apropriado está relacionado com o tipo de intervenção bem como histórico e dados de inventário do pavimento, proveniente de uma avaliação da estrutura.

A associação ainda recomenda que a escolha do método de reabilitação seja feita conforme as tipologias das patologias existentes no pavimento, discriminando assim uma orientação sob qual método utilizar mediante o defeito presente na estrutura, proveniente de uma avaliação e de dados de inventário do pavimento, podendo os métodos serem utilizados isoladamente e ou combinados.

Entretanto, é necessário que a aplicação da técnica de reciclagem não comprometa o desempenho do pavimento, sendo que independente da escolha pelo método de reciclagem, seja este à frio ou quente, e o tipo de fresagem a ser empregado, não venha comprometer as propriedades principais que garantem o comportamento mecânico e funcional do pavimento (CUNHA, 2010).

PRADYUMNA *et al.* (2013) e SILVA, J., (2011) comentam que uma vez que um projeto é executado de forma correta com misturas recicladas, torna-se possível obter um desempenho semelhante ou até melhor se comparado aos de misturas asfálticas com material virgem.

No processo de reciclagem, dentre as várias possibilidades destaca-se a recuperação dos materiais usinados da capa de rolamento do pavimento antigo, que podem ser combinados com materiais virgens, para então se conceber novas misturas a serem usadas como camada de revestimento, e/ou também podem ser utilizados como estabilizante granulométrico para as camadas granulares, cuja aplicabilidade é de utilizar o material nas características em que se encontra no momento da intervenção.

Vasconcelos (2020) afirma que alguns países fazem a reciclagem do RAP, incorporando 100% do material em massa para concepção de nova capa, dada comprovação de desempenho da camada para situação de tráfego local.

## **2.2 CENÁRIO NACIONAL E INTERNACIONAL**

Em alguns países o percentual de adoção da técnica de reciclagem e uso de RAP já é algo bastante difundido, dada a premissa de ser um material com propriedades mecânicas favoráveis ao processo de repavimentação e pelos espaços geográficos, visto a dificuldade de dispor-se de áreas para deposição do resíduo oriundo do desbaste de pavimentos antigos.

De acordo com pesquisas da *National Asphalt Pavement Association* -NAPA e da *Federal Highway Administration* - FHWA (2016), nos Estados Unidos grande parte do RAP é utilizada para

concepção de misturas à quentes e mornas. Ainda segundo as fontes de dados é possível observar um montante de mais de 80 milhões de toneladas por ano o equivalente a um aumento de 37% comparado ao ano inicial da pesquisa em 2009, cuja aplicação em misturas a quente foi responsável por 76,9 milhões de toneladas.

Com percentuais de incorporação na taxa de 25% em novas misturas, nota-se uma economia de mais de 71 milhões de toneladas de agregados e 22 milhões de barris de ligante asfáltico, além da redução da emissão de CO<sub>2</sub> à atmosfera de 1,5 milhões de toneladas por ano (NCAT, 2011).

Na Europa os números percentuais de adoção da técnica de reciclagem também são elevados, dada consideração que os princípios da reciclagem já são considerados como característica. De acordo com Oliveira (2013), o país europeu que mais faz uso de material fresado em misturas asfálticas utilizando cerca de 80% de todo material disponível, tem sido a Alemanha, acompanhados da Holanda e a França, com 75% e 40% respectivamente.

Entretanto de acordo com pesquisa publicada pela *European Asphalt Pavement Association-EAPA* (2019), no ano de 2018 mostra que a produção total de misturas recicladas a quente na Europa aumentou em 2,8%, atingindo um total de 240,5 milhões de toneladas. Essa produção atingiu níveis de reutilização e reciclagem de asfalto na fabricação de novas misturas da ordem de 76% da matriz existente, 20% para estabilização de camadas granulares, e apenas 4% destinadas a aterros.

Desde 1984 na Ásia Oriental, o panorama no Japão é semelhante à de outras nações que fazem reciclagem em alta escala. Com percentual de utilização de RAP em quase 100% do que é gerado, seja para concepção de misturas asfálticas e estabilizações granulométricas, é possível observar amplamente a aplicação do uso da técnica de reciclagem de pavimentos. Nota-se ainda que em 2013 da matriz total de misturas asfálticas usinadas, 76% correspondiam a misturas com incorporação de material fresado, totalizando assim 41,8 milhões de toneladas produzidas (NAPA, 2015).

Analisando os percentuais de uso do RAP no Brasil, é possível observar que ainda tem sido muito baixo, devido principalmente ao quantitativo alto de produção do resíduo. Entretanto, a técnica de substituição dos agregados virgens pelo RAP vem sendo empregada em diversas regiões do país, dada a comprovação da eficiência do material, a necessidade de um ambiente sustentável e redução de custos com transporte (CENTOFANTE, 2016; GENNESSEAU, 2015).

De acordo com o grupo CCR (2016) apud Suzuki (2019), entre os anos de 2017 a 2021, presume-se que sejam gerados mais de 1 milhão de toneladas de RAP nos trechos administrados pela concessionária, cuja quantidade seria suficiente por exemplo para construir trechos de 331 km de base estabilizada com 20 cm de espessura e largura de via de 7,2m, correspondente a 11% da malha rodoviária administrada pelo grupo, como pode ser observado na Tabela 2.5.

**Tabela 2-5** Geração de RAP em trechos administrados pelo grupo CCR.

<b>RAP- Reclaimed Asphalt Pavement (toneladas)</b>						
<b>Concessionária (CCR)</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>Total</b>
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
<b>Total</b>	<b>288.000</b>	<b>268.000</b>	<b>267.000</b>	<b>139.000</b>	<b>125.000</b>	<b>1.087.000</b>

Fonte: adaptado Suzuki (2019)

Filho (2019) afirma que tomada essa mesma proporção estimada pela concessionária, e dado a mensuração dos 213 mil km pavimentados existentes no Brasil (CNT, 2019), o país teria um potencial de geração de RAP excedente a 70 milhões de toneladas nos próximos cinco anos, sendo este montante suficiente para construção de aproximadamente 23 mil km de capa asfáltica reciclada, para um volume de tráfego de médio a alto com plataforma de 15,2 metros.

Por ser considerada ainda como técnica recente, a reciclagem no Brasil tornou-se corrente e utilizada em maior escala a partir de 1990 (MEDINA e MOTTA, 2015), com primeira constatação de trechos construídos com camada de revestimento reciclada em 1985, cuja utilização de RAP foi de 50% incorporada na usinagem de novas misturas para a construção de um trecho de 100 km na rodovia Anhanguera, entre São Paulo e Campinas (VASCONCELOS, 2020), além de trechos como SP-330 e *in situ* na rodovia Presidente Dutra, BR-116/ SP (BALBO, 2004).

Entretanto Freire *et al.* (2014) afirma que a baixa adoção da reciclagem apenas do revestimento asfáltico está associada a crença de que essas misturas apresentam desempenho inferior à de misturas convencionais e com materiais virgens.

Filho (2019) relata que a necessidade de mudar essa doutrina é de extrema importância e

necessária para um desenvolvimento da gestão de pavimentos mais eficaz, tomada premissa de ser favorável ao meio ambiente, de promover uma economia nos gastos de produção, além de promover soluções duradouras.

Suzuki (2019) complementa que o Brasil possui ainda entraves a serem superados para técnica de reciclagem de pavimentos, em específico a quente/morna, destacando a avaliação do comportamento das misturas recicladas com elevado teor de incorporação do RAP, análise da interação entre o ligante remanescente e o virgem, bem como do agente rejuvenescedor e adaptação das usinas de asfalto do país.

### 2.3 RAP- RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT

O RAP é um material oriundo do processo de fresagem de pavimentos antigos e não funcionais, é o principal resíduo resultante dos serviços de restauração, sendo também constituído pelo refugo gerado em usinas de asfalto devido à produção de misturas asfálticas fora das especificações de serviço (VASCONCELOS *et. al.* 2016).

Considerado como produto resultante da fresagem de revestimento asfáltico, o RAP pode ser considerado como um novo material de pavimentação cujas necessidades de dosagem podem ser realizadas por meio de correções granulométricas, adição de agentes rejuvenescedores e mais aglomerantes (KEARNEY *et al.*, 1999).

Cada amostra de RAP é constituído por unidades pétreas (agregado), encobertos de um mástique (fíler e ligante envelhecido) formando ali grumos do material fresado (SILVA, 2011). A Figura 2.2 ilustra o material.

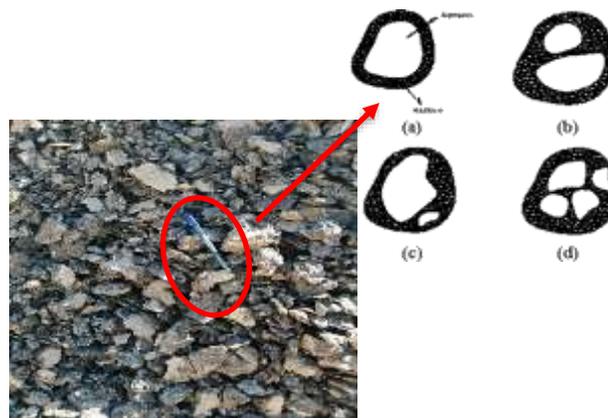


Figura 2-2 Amostra De RAP (Autor 2020).

De acordo com a WIRTGEN (2012) o RAP apresenta 3 principais características, sendo granulometria, consistência e teor de ligante asfáltico, podendo este teor ser considerado como ativo ou inativo para a nova mistura.

Teixeira *et al.* (2017) comentam que o CAP remanescente presente no RAP é considerado como ativo que proporciona uma coesão inerente ao asfalto, ou seja ainda possui propriedades aglomerantes, e como inativo quando o RAP em si apresenta um comportamento similar à de um agregado apenas, onde o percentual de betume existente no fresado aponta um elevado grau de oxidação, resultando em um material de baixa e ou nenhuma adesividade, podendo ser considerado como um agregado negro ou *Black Stone* (WIRTGEN, 2012).

WIRTGEN (2012) ressalta ainda que para um RAP cuja classificação do ligante remanescente seja ativo, recomenda-se uma inserção em torno de 30% em volume de agregado virgem e no máximo 70% de RAP, uma vez que o material ativo não apresenta uma boa compactação com rolos compressores devida alta rigidez da mistura que compromete a trabalhabilidade.

Logo segundo SILVA J. (2011) e PRADYUMNA *et al.* (2013), quanto maior o percentual de incorporação de RAP em novas misturas, mais ganhos se tem em questões econômicas e sustentáveis visto seu emprego como solução para manutenção e reabilitação de pavimentos.

Quanto ao uso do RAP nas misturas a quente tem-se uma resistência ao percentual de incorporação na substituição dos agregados virgens, onde essa preocupação se dá pelo fato de que as misturas resultantes serão muito rígidas e, conseqüentemente menos trabalháveis, e ainda que podem levar a falhas em campo, exemplo dano por fadiga do pavimento asfáltico (CENTOFANTE, 2016).

Zhao *et al.* (2013) afirmam que a incorporação de altos percentuais de RAP na mistura aumenta a susceptibilidade de fadiga e o craqueamento das misturas quando estiverem sob ações do tráfego, fato este devido à presença de ligante oxidado ativo que pode causar um efeito de enrijecimento com aumento brusco da rigidez, mas apresentam um bom desempenho a deformação permanente. Deste modo, o percentual de RAP a ser adicionado às misturas asfálticas recicladas a quente depende tanto de propriedades do material reciclado e do material virgem.

Suzuki (2019) alega que melhores práticas para uma boa gestão do RAP tem ligação direta com a qualidade e performance das misturas recicladas, elencando que a gestão do RAP abrange a geração do material, estocagem, beneficiamento, dosagem e usinagem, a fim de resultar em uma

mistura homogênea e de qualidade elevada, conforme descrito na Tabela 2.6.

**Tabela 2-6** Gestão do RAP.

<b>Geração de material</b>	Demolição	Corresponde a demolições de estruturas de pavimentos
	Fresagem	Oriundas da escarificação da superfícies de pavimentos
	Especificação	Oriundo fora das especificações de serviço (misturas frias e ou que excederam temperatura usinagem)
<b>Estocagem</b>	Separação de material	Separar o RAP por fontes de origem de obtenção
	Homogeneidade	Garantir um material homogêneo e bem misturado
	Controle da umidade	A cada 1% de umidade = 10% em taxa de emissão de poluente na usinagem
	Britagem	Realizar o processo no dia de utilização da usinagem do RAP
<b>Beneficiamento</b>	Peneiramento	Efetuar o peneiramento no mínimo na fração graúda e miúda
	Fracionamento	Destorroamento
<b>Dosagem</b>	Caracterização	Caracterização do RAP e do ligante remanescente (ativo ou inativo)
<b>Usinagem</b>	Adaptações de usinas	Favorecer controle na emissão de poluentes, e etapas para incorporação de ligante, AR e retorno dos finos

**Fonte:** Adaptado de SUZUKI (2019).

## 2.4 RECICLAGEM À QUENTE

A reciclagem a quente é realizada especificamente com material oriundo do processo de fresagem do revestimento asfáltico de um pavimento cuja condição funcional é baixa, ou seja, de um pavimento deteriorado. Pode a reciclagem a quente ser realizada em usinas e *in situ*, sendo que em ambos processos de reciclagem o CAP (cimento asfáltico de petróleo) age como aglomerante da mistura.

De acordo com ARRA (2015) as vantagens dos processos de reciclagem são notórias, onde no processo *in situ* tem-se uma redução na ordem de 30% a 50% dos custos gerados com manutenção em comparação a fresagem e recomposição convencional, sendo o processo composto primeiramente pelo aquecimento da superfície do pavimento, com posterior fresagem e escarificação de no máximo 5 cm. Por fim, o RAP é direcionado ao misturador móvel que poderá fazer incorporações de agente de reciclagem, ligante e corrigir granulometria para assim ser compactado. Nos casos em que a camada é apenas escarificada, o material é então deixado no local

para ser reaproveitado posteriormente.

Nos processos de reciclagem em usinas, o método de produção é correspondente ao de misturas a quente convencionais, fato que as usinas utilizadas são as mesmas, podendo ser do tipo volumétrica ou gravimétrica (SILVA, 2011).

Dentre as vantagens da reciclagem em usina tem-se um maior controle na homogeneidade da mistura, e conseqüentemente uma maior facilidade em realização da técnica uma vez que a usinagem, o transporte, o lançamento da mistura na plataforma e a compactação corresponde ao método convencional (RUIZ, 2012).

Baptista (2006) comenta que nas centrais descontínuas a produção das misturas recicladas a quente podem ser obtidas de quatro maneiras, sendo elas:

- introdução do RAP a frio, por central de torre;
- introdução do RAP frio direto na unidade de mistura (técnica a frio);
- o RAP é aquecido separado e introduzido na unidade de mistura junto com agregado virgem aquecido (técnica à quente);
- o RAP é aquecido junto com os agregados no tambor secador, antes de ser levado para unidade de mistura (método *recyclelean*);

Devido ao aquecimento é possível alcançar taxas de reciclagem mais elevadas comparada a técnica à frio.

De acordo com a NAPA (Young, 1996) apud NAPA (2015), durante a usinagem o RAP pode ser aquecido por meio da transferência de calor por condução ou convecção. Em situações em que o RAP não é aquecido, os agregados virgens são sobreaquecidos de maneira que a mistura reciclada apresente uma temperatura final adequada à compactação, uma vez que o RAP entra frio na mistura. Sendo nessas situações realizadas incorporações em menor percentual se comparadas aos processos em que há o aquecimento do RAP, em torno de 30%.

Assim, a reciclagem a quente em usina em detrimento aos outros tipos de reciclagem, se destaca por realizar reaproveitamento dos agregados e do ligante asfáltico remanescente, além de realizar a reciclagem total da camada de revestimento, podendo também corrigir erros de dosagem em misturas, e por propiciar a análise laboratorial do material desbastado (Kandhal & Mallick, 1997).

Suzuki (2019) afirma que de maneira intuitiva, quanto maior o teor de material reciclado na mistura maiores seriam os benefícios econômicos e ambientais, no entanto deve-se atentar aos

parâmetros de desempenho das mesmas, atestando também que características do RAP e o tipo de usina para a produção da mistura são fatores que podem limitar o teor de RAP na mistura final.

Conforme mencionado no item 2.1, as misturas usinadas em diversos países da Europa e nos Estados Unidos e da Ásia oriental possuem teores de RAP incorporados nas misturas, teores estes que variam de situação para a situação, aos quais as principais causas para essas incorporações são baseadas em regulamentações locais tanto para percentual de incorporação quanto para descarte em aterros.

Martínez (2010) e ARRA (2015) comentam que nestes países o percentual de incorporação de RAP em novas misturas a quente encontra-se na faixa de 10% a 30% em volume, sem afetar negativamente o desempenho das mesmas.

HAGHSHENAS *et al.* (2016) afirmam que misturas com elevado percentual de RAP são aquelas que possuem uma taxa superior a 25%.

Já West *et al.* (2013) mostram uma certa cautela em teores elevados de incorporação de RAP, mas relata que pavimentos com 50% de incorporação têm apresentado desempenho favorável em projetos para diversas condições climáticas.

Para Ruiz (2012), as misturas com percentual de incorporação em até 30% sem rejuvenescedores podem apresentar parâmetros de desempenho mecânico similares ao de misturas convencionais, já com teores mais altos de incorporação é requerido a adição de agente rejuvenecedor para garantia de um bom desempenho.

O autor ainda comenta que é notório, que pelo modo como se aumenta os índices de incorporação do RAP na mistura, mais rígida essa mistura ficará. Podendo essa conter parcelas de ligante remanescente ativo, devendo então avaliar a necessidade de adição de agente rejuvenecedor (AR), a fim de devolver as propriedades originais ao ligante envelhecido. Para tanto, o AR deve ser devidamente dosado e combinado tanto com o ligante novo quanto com o ligante presente no RAP.

Genesseeaux (2015), notou que no processo de reciclagem a quente, a técnica de aquecer o RAP sem acelerar ainda mais a oxidação do CAP residual pode ser um grande problema, fato este devido ao processo usinagem fazer com que o CAP sofra maior curso de oxidação, o que agravaria ainda mais o quadro, dado que o RAP já consta com uma parcela de ligante envelhecido.

A autora ainda menciona que existem caminhos e alternativas favoráveis para diminuir a ação da oxidação do ligante presente no RAP, como por exemplo, adaptações nas usinas podem

ser capazes de garantir que o RAP não tenha contato direto com o queimador, adoção da metodologia de misturas mornas, e emprego de agentes rejuvenescedores com intuito de reestabelecer as frações de asfalto ao ligante envelhecido, restituindo as propriedades viscoelásticas do material.

#### 2.4.1 Taxa de reciclagem

A estimativa de uso e geração de RAP tanto no cenário nacional quanto no internacional, está relacionado com a taxa de reciclagem para determinada obra. Se a quantidade de RAP de uma obra for baixa, é possível considerar uma reutilização em até 100%, mesmo sendo incorporado uma percentagem baixa em novas misturas, ou seja taxa de reciclagem (TR) baixa de 15% a 20%. Porventura se a quantidade de geração for elevada, mesmo em incorporações em até 100% em misturas, pode não ser possível reciclar todo material produzido devido alto volume de material disponível e por questões qualitativas do material em si (BAPTISTA, 2006).

Logo o conceito de taxa de reciclagem pode ser utilizado em duas vertentes, sendo relacionado com a proporção de RAP usado na concepção de novas misturas a quente, ou em referência à porcentagem de RAP disponível e que foi de fato reutilizado na obra.

Assim, a taxa de reciclagem ou como outros pesquisadores nomeiam de “taxa de incorporação ou percentual de reciclagem”, na presente pesquisa representa a proporção de material que se recicla e que será incorporada na mistura reciclada a quente, onde essa é expressa em porcentagem, determinada pela razão entre a massa total do RAP (mtR), e a massa total da mistura reciclada (mtM).

$$TR = \frac{mt R}{mt M} \quad (2.4)$$

Deste modo, há outras recomendações quanto a definição das taxas de reciclagem, bem como a de agregados (TRa), onde relacionam a massa do agregado do RAP (maR) e a massa do agregado da mistura reciclada (maM), com a ressalva de que a massa do agregado do RAP pode ser obtida tanto com ou sem a parcela do ligante envelhecido.

$$TRa = \frac{ma R}{ma M} \quad (2.4.1)$$

Por outro lado, a taxa de reciclagem de ligante (TRI), representa a proporção entre a massa de ligante envelhecido remanescente no RAP (mlR), e a massa de ligante total da mistura reciclada (mlM).

$$TRI = \frac{mlR}{mlM} \quad (2.4.2)$$

Assim, a taxa de reciclagem equivalente em uma mistura reciclada à quente que é o enfoque dessa dissertação, está relacionada com o percentual de incorporação do RAP em uma nova mistura, onde a inserção de agentes de reciclagem e ou rejuvenescedores é estimada em função do percentual de ligante para a mistura, sendo esse percentual de AR (agente rejuvenescedor ou de reciclagem) já equivalente ao teor ótimo para dosagem, ou seja, dosado e combinado tanto com o ligante virgem quanto com o ligante remanescente no RAP.

#### **2.4.2 Limitações quanto ao uso do RAP em misturas recicladas a quente**

Deve-se ter cautela no momento de realizar incorporações de RAP em misturas recicladas a quente a fim de ser garantir um bom desempenho das mesmas, cautelas essas no momento da dosagem e principalmente usinagem, pois a mistura estará composta por materiais já envelhecidos que podem influenciar de modo negativo a garantia dos parâmetros mecânicos da mistura.

Entre os cuidados a serem tomados destacam-se limitações quanto ao superaquecimento do RAP, ao envelhecimento do ligante asfáltico presente no RAP, a heterogeneidade do RAP, e a remobilização do ligante do RAP (LUZZI, 2017).

##### **2.4.2.1 Superaquecimento do RAP**

Em misturas asfálticas cuja taxa de reciclagem é superior a 25%, o aquecimento passa a ser um limitante uma vez que a transferência de calor ocorre pelo contato entre o agregado virgem, e em grandes proporções de incorporação o processo torna-se energeticamente inviável pela necessidade de superaquecer o agregado entre 250 e 300 °C, podendo o agregado virgem se degradar e aumentar a proporção de material fino na mistura, um alerta que rochas calcárias

apresentam grande susceptibilidade a degradação do agregado quando aquecido à elevadas temperaturas (BROUSSEAUD, 2011, GENNESSEAU, 2015).

O aquecimento do RAP em usinas requer adaptações para aumentar a produtividade sem que haja prejuízos no envelhecimento do ligante durante a usinagem, sendo que as alterações podem ser feitas em usinas do tipo volumétricas com secador-misturador/contra fluxo, ou a partir da construção de usinas Drum-Mixer. Além da separação do material fresado em frações diferentes de tamanhos proveniente da gestão do RAP, e ou pode ser utilizada a técnica de misturas asfálticas mornas para incorporações elevadas de RAP, pois a temperatura de usinagem e compactação é reduzida de 30 a 50°C, além de propiciar economia do consumo de energia durante o processo de reciclagem (OLIVEIRA et al., 2012, Bohn 2017, SUZUKI, 2019).

#### **2.4.2.2 Envelhecimento do ligante asfáltico presente no RAP**

Segundo WITHEOAK (1991) *apud* Morilha Jr. (2004) o índice de envelhecimento pode ser expresso pela relação entre a viscosidade após o envelhecimento em cada instante ( $\eta_a$ ) e a viscosidade original do ligante ( $\eta_0$ ), ocorrendo em três etapas, na de usinagem da mistura representando em torno de 60% do envelhecimento, na estocagem, transporte, espalhamento e compactação representando 20% do envelhecimento, e por fim durante a vida útil do revestimento devido ações do clima representando 20% do envelhecimento do ligante.

Assim, o ligante envelhecido torna-se menos dúctil e menos elástico; apresentando um enrijecimento, característica essa favorável a deformações permanentes, porém, mais susceptível ao trincamento o que acarreta a uma baixa vida de fadiga (BUDNY, 2012).

#### **2.4.2.3 Heterogeneidade do RAP**

Conforme descrito por Genesseeaux (2015) a incorporação em percentuais acima de 20%, requer a averiguação da homogeneidade do RAP disponível para a reciclagem, cuja análise é realizada com a mistura entre o RAP e os novos materiais, e, mistura do ligante do RAP e o novo ligante, que pode não ter ocorrido caso o ligante asfáltico do RAP não tenha sido remobilizado.

Assim como abordado no modelo de gestão do RAP descrito no trabalho de Suzuki (2019), a origem do material fresado, tipologia da estrutura desbastada e estocagem precisam ser levadas

em conta, afim de se obter uma caracterização e níveis de beneficiamento adequados, garantindo assim um controle tecnológico favorável.

Don Brock & Richmond (2007) relatam que a heterogeneidade das misturas é reduzida usando RAP fracionado e estocado em montes por fração. E Valdés *et al.* (2011) reafirma que utilizar RAP peneirado em várias frações e utilizar maior percentual de frações finas do RAP, resulta em menor variabilidade no teor de ligante e na granulometria. Contudo a distribuição do ligante nas misturas asfálticas é proporcional à superfície específica dos grãos, quanto mais finos presentes maior será o consumo de ligante. Assim a separação de frações na reciclagem, em graúda e miúda, bem como o destorroamento do RAP proporcionam melhores resultados e controle de dosagem das misturas recicladas (GENNESSEAU, 2015).

#### **2.4.2.4 Remobilização do ligante do RAP**

Alguns pesquisadores atentam-se muito a composição granulométrica do RAP, entretanto a heterogeneidade não está relacionada apenas a granulometria da mistura, mas também em relação ao teor de ligante final (residual + virgem). As misturas asfálticas recicladas conforme descritas (DOYLE e HOWARD, 2010) podem ser classificadas em função da remobilização do ligante remanescente do RAP, ou seja, da parcela considerada ativa ou inativa. As classificações apresentam as seguintes condições:

- se o RAP apresenta comportamento apenas de agregado, sem nenhum percentual de ligante remobilizado ( agregado negro ou “Black Rock”);
- se houve a mistura completa do ligante remanescente com o ligante virgem, considera-se que o ligante asfáltico foi remobilizado (“full blending”);
- uma parte do ligante do RAP é reutilizado na mistura, dadas propriedades e tempo de envelhecimento do ligante, temperatura e aditivos;

Deste modo há especificações quanto a métodos de dosagem que preconizam até que ponto deve-se realizar modificações no processo de dosagem com a inserção de RAP. Um exemplo disso é a especificação Superpave, que por meio da normativa AASHTO M 323- 13 - Superpave *Volumetric Mix Design*, não recomenda modificações para projetos de misturas com teores inferiores a 15% de RAP, entre 15 e 25% de RAP. A norma aconselha o uso de um ligante virgem com baixa viscosidade, superiores a 25%, sugere análises da “*performance graded*” (PG) ou grau

de desempenho do ligante (BOHN 2017).

## 2.5 DOSAGEM SUPERPAVE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS À QUENTE

A dosagem é caracterizada como sendo a escolha da proporção dos constituintes de uma mistura, de modo a se conseguir um bom desempenho em campo. Desempenho este medido a partir de propriedades da mistura estimada em laboratório, tais como rigidez, estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência (à ruptura, deformação permanente, fadiga), atrito, permeabilidade, e trabalhabilidade (Bernucci 2008).

Em 1987, o Strategic Highway Research Program começou a desenvolver um novo sistema de especificação de materiais asfálticos, caracterizado como *Superior Performance Asphalt Pavements*. Cujos métodos permitem especificar materiais, projetar e analisar misturas asfálticas, prever desempenho de pavimentos, além de possuir equipamentos, métodos e critérios próprios para as análises de desempenho.

A principal diferença da dosagem Superpave está pautada no método de compactação, que consiste em uma compactação por amassamento realizada em função do número de giros que o compactador realiza, ou seja, pelo CGS (Compactador Giratório Superpave) ou PCG (*Pavement Compactor Gyrotory*).

A quantidade de rotações e/ou número de giros representa a energia necessária para atingir o arranjo do esqueleto mineral da mistura, e assim correlaciona com a energia de compactação e com o volume de tráfego previsto para a via.

Deste modo, o método determina três níveis de giros respectivamente, sendo o número de giros inicial ( $N_{\text{inicial}}$ ), o de projeto ( $N_{\text{projeto}}$ ) e o máximo ( $N_{\text{máximo}}$ ). Estando esses números em função do fator de equivalência de carga do tráfego, cujo  $N_{\text{projeto}}$  é utilizado para definição do teor ótimo de ligante da mistura. (DNIT, 2018).

A Tabela 2.7 traz o  $N_{\text{inicial}}$ ,  $N_{\text{projeto}}$  e  $N_{\text{máximo}}$  para diferentes cargas do tráfego em função da especificação AASHTO M 323-04, ao qual na compactação com o SGC a densidade da mistura é medida de acordo com que se vai compactando a mesma, ou seja, em função do número de giros.

**Tabela 2-7** Valores de  $N_{inicial}$ ,  $N_{projeto}$  e  $N_{máximo}$ , para diferentes carregamentos tráfego- AASHTO M 323-04

Tráfego, ESALs ( $10^6$ )	Parâmetros de compactação		
	$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$
$\dots < 0,3$	6	50	75
0,3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
$> 30$	9	125	205

Outra diferença do método está pautada na granulometria da mistura, pois estabelece pontos de controle e uma zona de restrição, dentro da faixa granulométrica adotada. Os pontos de controle são definidos por 4 peneiras que definem onde a curva deve passar, sendo as peneiras máxima (com o primeiro tamanho acima da peneira de TMN), máxima nominal (tamanho acima da primeira peneira que reter mais de 10% do agregado combinado), peneira 2,36mm e 0,075mm.

A zona de restrição equivale área formada em ambos os lados da linha de densidade máxima (representa a granulometria mais compacta que deve ser evitada), limitada nas peneiras intermediárias (2,36 mm). Cujas funcionalidades da zona de restrição é evitar o uso de uma quantidade excessiva de areia natural na mistura. É recomendável que as misturas possuam granulometria abaixo da zona de restrição.

Além dessas distinções, o método estabelece alguns requisitos para preparo das misturas asfálticas, tais como dosagem com 3 composições granulométricas diferentes (gráuda, miúda e intermediária), a fim de moldar um total de 8 corpos de provas, sendo 2 CPs por mistura com teores de ligante variados, teor inicial de 5% variando em  $\pm 0,5\%$  e  $\pm 1\%$  para obtenção do teor ótimo.

Ainda o método estabelece requisitos volumétricos, com volume de vazios em torno de 4% e teor de fíler da mistura enquadrado no percentual de 0,6 a 1,2 do passante na peneira 200 em função do teor de asfalto.

Em uma abordagem generalista, e em função de ensaios e análises laboratoriais realizados por outros pesquisadores a cerca da metodologia Superpave, o  $V_v$  equivalente a 4% corresponde à um volume de vazios que o pavimento estaria trabalhando em sua vida de serviço. Fato este que quando se tem a abertura de trechos recém construídos, em função de fatores de campo, os pavimentos tem normalmente um  $V_v$  de 7%, assim conforme a estrutura vai sendo solicitada este  $V_v$  reduz a 4%, e no do final de sua vida útil o mesmo tende a terminar com cerca de 2,5% a 2%

de maneira a desempenhar sua funcionalidade (Christensen e Bonaquist, 2003).

Assim presume-se o valor de  $V_v$  em 4%, devido propriedade da mistura estar mais preenchida e mais densa, deste modo a mesma apresentará um ganho de rigidez e transmitirá melhor as cargas às camadas subjantes da estrutura, fato este que apresentará melhor desempenho a deformação permanente e ao trincamento por fadiga.

Na dosagem de misturas asfálticas recicladas à quente, o critério da quantidade de incorporação de material fresado utilizado nas misturas, se dão em função da taxa de reciclagem da obra, do tipo de usina, do tipo de reciclagem, e de propriedades do material. Podendo essas misturas conterem agentes rejuvenescedores em sua composição e ou não, onde diversos autores têm buscado realizar análises, com intuito de avaliar o desempenho mecânico em função de distintas taxas de incorporação de RAP com ou sem agente rejuvenescedor.

De acordo com a Betunel (1998), fabricante de agentes rejuvenescedores, a mesma afirma que o agente a partir de sua própria formulação ocasiona um equilíbrio às frações de maltenos, presentes no ligante oxidado, já que introduz os “solventes” de peptização em um alto teor, levando o ligante a readquirir suas propriedades iniciais de um novo e altamente durável cimento asfáltico.

A fabricante ainda complementa que em função de análises experimentais realizadas, o percentual de incorporação para o AR em específico está suscetível a variações. Variações essas feitas com base no valor da viscosidade absoluta do ligante oxidado a 60°C, e da necessidade de corrigir a deficiência do RAP mediante o processo de fresagem, para isso recomenda-se utilizar um valor teórico obtido pela fórmula de Duriez, onde esse valor consta em torno de 20 a 25% do percentual de ligante residual componente do RAP, ressalva que devem ser realizadas análises para cada tipo de material utilizado.

## **2.6 COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS REICLADAS À QUENTE**

De acordo com Tayebali *et al.*, (1994) apud Nunes (2017) para prever o comportamento de um material torna-se necessário compreender sua reação às solicitações de tensão deformação. E para determinar como um dado material responderá a um carregamento aplicado, podem ser realizados ensaios laboratoriais, e os resultados serem compilados e interpretados conjuntamente

com métodos mecanicistas para servir de parâmetro em metodologias de dimensionamento, prevendo um melhor desempenho do material.

As misturas asfálticas em si apresentam um comportamento mecânico bastante complexo, podendo ser definida de modo viscoelastoplástico, cuja parcela elástica e viscoelástica é compreendida pelas deformações recuperáveis, e a plástica e viscoplástica por não haver a recuperação das deformações (RIVIÈRE, 1996; HUET, 1963 apud BARRA, 2009).

Mello (2008) aborda que os materiais que possuem o comportamento viscoelástico possuem a propriedade de dissipar e armazenar energia mecânica, exibindo uma elasticidade instantânea dependente do tempo de aplicação, e também das características de fluência, sendo necessária uma teoria específica que contemple particularidades da elasticidade e da viscosidade, não enquadrando no princípio femológico da elasticidade por não se comportarem como a maioria dos materiais elásticos. Necessitando então as misturas asfálticas de modelos mais complexos para representar toda a diversidade de variáveis que regem seu comportamento.

Devido a estas características, não é simples prever o comportamento deste tipo de material quando submetido a uma solicitação qualquer, entretanto pesquisadores brasileiros por um bom período têm considerado que as misturas asfálticas apresentam o comportamento de acordo com um modelo viscoelástico linear, cuja análise prega que o desempenho mecânico do material é dependente do carregamento e da taxa de aplicação do mesmo, ou seja, o tempo. Sendo que a teoria da viscoelasticidade considera o material em um estado de transição entre sólido e líquido, ou seja, elástico e viscoso, apresentando assim respostas que dependem do carregamento, que seria o comportamento elástico, e da taxa cronológica de aplicação desse carregamento caracterizando no comportamento viscoso (EVANGELISTA JR. 2006).

E considerando uma parte que é recuperada em uma deformação total, a mistura asfáltica apresenta um comportamento dependente do tempo e da taxa cronológica de aplicação do carregamento. Cujas aplicações práticas do comportamento em relação ao tempo de uma mistura asfáltica, pode-se evidenciar a diferença da ação mecânica que um veículo gera na rodovia ao transitar em baixa velocidade, ocasionando num elevado tempo de carregamento, e quando este mesmo transita em alta velocidade gerando um baixo nível de carregamento. Sendo que as deformações que são recuperadas no material podem ser modeladas em função da teoria da viscoelasticidade (HUANG, 2004).

Contudo, Evangelista JR (2006) evidencia que os modelos viscoelástico lineares apresentam características que de certo modo dificultam seu uso, como por exemplo, para uma representação que de fato configura a matriz laboratorial, a caracterização constitutiva viscoelástica requer a manipulação de uma vasta quantidade de coeficientes, coeficientes estes da série de Prony, o que torna-se trabalhoso para se obter o ajuste do modelo.

Assim a fim de facilitar o emprego da teoria da viscoelasticidade linear na caracterização das misturas asfálticas, diversos autores têm empregado análises por meio de métodos numéricos que tem por finalidade realizar os ajustes das curvas da série de Prony, e a interconversão entre as propriedades viscoelásticas fundamentais, em consonância a taxa de aplicação, tais como o módulo de Relaxação  $E(t)$  e a Fluência  $D(t)$ . Estando o módulo de relaxação  $E(t)$ , dependente do tempo de aplicação do carregamento, e caracterizado como sendo a diminuição contínua da tensão que foi aplicada no material para que este sofresse uma deformação constante. E a fluência caracterizada como sendo a deformação crescente que o material apresenta sob uma tensão constante.

De acordo com Evangelista JR (2006) dado comportamento constitutivo viscoelástico das misturas asfálticas, a tensão horizontal no fundo da camada de revestimento em níveis de tráfego lento comparado com níveis rápido diferem em um valor em torno de 200%, tendo também variações discrepantes de tensões no topo do subleito, e de deslocamento vertical no topo do revestimento. Diferença essa não constatada quando se empregam análises de comportamento elástico linear para misturas asfálticas.

Onde de acordo com Soares *et al.* (2017), o comportamento elástico adotado pela engenharia rodoviária no Brasil, foi baseado em parâmetros que de fato não representavam a realidade, o que acarreta na aceleração do dano, e deterioração precoce dos pavimentos, com maior recorrência a danos por fadiga.

Assim análises mais realistas, baseadas em modelos constitutivos mais avançados e mais gerais resultam na simplificação do modelo viscoelastoplástico para os viscoelásticos, estando as deformações plásticas e viscoplásticas desprezíveis para um baixo estado de tensão.

Existindo então variados modelos para explicar o comportamento dos materiais asfálticos na definição dos parâmetros viscoelásticos, baseados em análises físico-matemáticas, estes são compostos por diferentes estruturas geométricas de molas (parcela elástica) e amortecedores (parcela viscosa). Sendo que a mola descreve a elasticidade do material no carregamento e no

descarregamento e o amortecedor descreve a interação no tempo do material durante o carregamento e descarregamento (MELO, 2014).

Contudo dentre os modelos existentes, o de Huet-Sayegh (1965) já bastante difundido, descreve de forma mais precisa o comportamento viscoelástico linear das misturas para qualquer faixa de temperatura e frequência de carregamento. Cujo modelo trata de um aperfeiçoamento do proposto por Huet (1963) devida a consideração de uma mola em paralelo de baixa rigidez, permitindo levar em conta o comportamento reológico das misturas asfálticas na condição estática, ou seja, quando solicitadas a baixas frequências e elevadas temperaturas (RIVIÉRE, 1996 apud BRAGA, 2009).

Entretanto para caracterização reológica dos materiais viscoelásticos é necessária uma varredura de frequências e temperaturas, representativas das condições que se tem em campo. Fato de que as misturas asfálticas possuem um comportamento variável em relação à temperatura e ao tempo de carregamento.

Contudo neste trabalho a caracterização a ser realizada, será através do módulo complexo ( $E^*$ ) e do ângulo de fase ( $\phi$ ), cujas propriedades constituem respostas mecânicas em condições de carregamento constante, e permite determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares do material (BERNUCCI et al., 2008).

## **2.7 DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

Os pavimentos flexíveis no Brasil durante muitos anos foram dimensionados mediante método empírico, podendo citar o método do DNER desenvolvido por Murilo Lopes, cujas análises adotadas como parâmetro de dimensionamento e determinação da espessura das camadas relacionavam com CBR do material.

Visto que se tinha um certo distanciamento do que era dimensionado, da real situação existente, a busca por métodos mecanicistas desde muito antes já era uma realidade, onde no ano de 2018 foi lançado o MeDiNa, novo método mecanístico empírico de dimensionamento de pavimentos no Brasil, produto fruto de um convênio entre DNIT/UFRJ/PETROBRÁS, pelo Projeto DNIT TED nº682/2014, que tratava da execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, em parceria com a Rede Temática de Asfalto (Composta pelo IPR e diversas universidades). Cujas análises de dimensionamento do pavimento levam em consideração o módulo de resiliência e deformação

permanente das camadas granulares e de revestimento, possibilitando também realizar uma certa previsão da vida de fadiga deste revestimento.

Assim nota-se que a necessidade em se ter métodos mecanicistas para o dimensionamento de pavimentos no país é bastante perceptível, pois estes consideram análises de tensões e deformações em meios elásticos. Contudo os pavimentos flexíveis não são compostos apenas de materiais elásticos, cabendo então a não adoção de métodos puramente mecanísticos (MOTTA 1991).

De acordo com Vasconcelos (2004), existe também uma limitação de que as tensões/deformações calculadas por métodos numéricos para a passagem de uma carga não são usadas de modo direto, mesmo quando são considerados modelos constitutivos sofisticados, sendo que as tensões e deformações são obtidas por meio das funções de transferência, que relacionam a resposta estrutural com a vida em campo, pois esses modelos em casos deixam de levar em análise fatores que ocorrem em campo, como envelhecimento do ligante, mudanças do clima, sazonalidade de carregamento.

Os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas visam simular situações reais de tráfego, mostrando serem ferramentas importantes na caracterização dos materiais de pavimentação e na mistura em si, fato este que no dimensionamento de pavimentos por método mecanístico é necessário considerar como parâmetros de entrada aspectos como deformabilidade dos materiais, fatores ambientais, e de tráfego, além dos critérios de aceitação, como vida de fadiga e afundamento de trilha de roda (CEZARO JUNIOR, 2008).

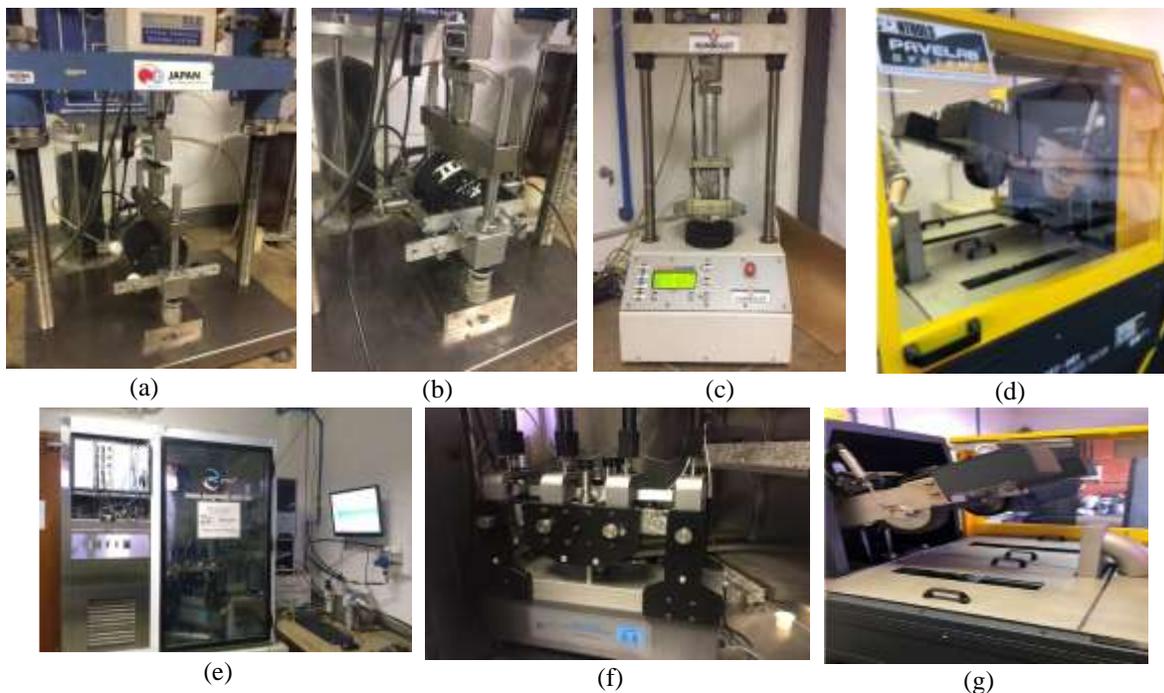
Dentro da mecânica dos pavimentos os estudos voltados para determinação de método de dimensionamento empírico, utilizam análises estruturais no cálculo de tensões e deformações que estabelecem correlações com a vida de fadiga, resistência e deformabilidade das misturas asfálticas (MEDINA e MOTTA, 2015).

Assim, o desempenho das misturas asfálticas está relacionado a sua resistência às tensões providas do carregamento dinâmico do tráfego, e em função das ações climáticas. Para atestar tal feito, e saber se as misturas irão exercer de fato sua serventia ao longo da vida útil do pavimento mediante essas solicitações, são analisados aspectos quanto a performance mecânica das mesmas.

A respeito disso as misturas asfálticas são ensaiadas em laboratório, a fim de obter parâmetros e índices usados para simular a situação real que se tem campo, e de fato atestar o seu desempenho, sendo que a deformação permanente e o trincamento por fadiga são as patologias

mais recorrentes e presentes nas camadas de rolamento dos pavimentos flexíveis, fato este devido propriedades do material, dosagem inadequada e não correlação entre o estado da arte com situação real do tráfego.

Contudo, a fim de se obter parâmetros e índices de desempenho das misturas, são realizados ensaios que nos dão respostas quanto ao comportamento daquela mistura à determinada solicitação, onde ensaios como módulo de resiliência que por meio de uma carga cíclica horizontal estabelece parâmetros de deformação horizontal recuperável, bem como módulo complexo, *flow test*, desgaste, fluência, e principalmente vida à fadiga e deformação permanente, como mostrado na Figura 2.3, são parâmetros necessários para análise de desempenho de uma mistura asfáltica.



**Figura 2-3** Ensaios de desempenho mecânico em misturas asfálticas- (a) fadiga por compressão diametral; (b) módulo resiliência; (c) resistência a tração; (d) deformação permanente; (e) módulo dinâmico (f) Fadiga 4PB; (g) DWT (Autor 2020).

O comportamento dos materiais de pavimentação e o desempenho das misturas asfálticas sob solicitação de determinado carregamento dinâmico, pode ser dividido em flexão repetida que ocasiona fadiga dos materiais resultando no trincamento, e a compressão simples repetida, que origina a deformação permanente provocando o afundamento de trilha de roda (MOURÃO 2003).

Comumente a fadiga na pavimentação é caracterizada como um processo de deterioração estrutural que o revestimento sofre, quando submetido a um estado de tensões dinâmico e repetitivo

ao longo da vida útil, responsável pelo trincamento da camada de rolamento, podendo resultar no total comprometimento das condições da funcionalidade do pavimento com o surgimento das panelas e buracos, chegando então a falha após a aplicação de determinado número de ciclos (BERNUCCI *et al.* 2008).

Por outro lado, a deformação permanente é caracterizada como uma das patologias mais comuns que ocorrem em pavimentos asfálticos brasileiros, que desencadeia na redução do conforto ao rolamento, na minimização da segurança das operações e no aumento dos custos operacionais, sendo ela evidenciada pelo afundamento longitudinal da camada asfáltica, quando submetido ao carregamento de tensões elevadas (BASTOS *et al.* 2017).

Desta maneira, analisar o comportamento mecânico das misturas recicladas leva a previsão do desempenho das mesmas, dadas propriedades viscoelásticas da mistura, e da alta rigidez da mesma em função das variações da taxa de reciclagem do RAP.

Onde Soares *et al.* (2003), avaliaram o desempenho das misturas recicladas a quente com taxa de incorporação de 10 e 50%, além da incorporação de um agente rejuvenescedor do tipo AR-75, e adotaram como parâmetro de avaliação mecânica os ensaio de MR e RT, cujos índices obtidos para os diferentes teores foram semelhantes, entretanto quanto maior era a taxa de incorporação, tinha-se um crescimento nos valores de MR e RT das misturas, levando a concluir que a incorporação de fresado não compromete o desempenho mecânico das misturas.

Mais tarde, Soares *et al.* (2004) avaliaram o envelhecimento a curto prazo para incorporações com taxas de 10, 30 e 50%, cujas misturas avaliadas levaram há uma difícil obtenção dos parâmetros volumétricos devido heterogeneidade do material, sendo apenas a mistura de 10% que não aumentou o teor de projeto em função do aumento do tempo de envelhecimento a curto prazo.

Já Lima (2003) usou em suas análises incorporações de 0, 10, 30 e 50% de fresado, e agente rejuvenescedor tipo AR -75, sendo que para análises de RT o autor observou um aumento da resistência a tração com o aumento da taxa de incorporação do RAP, e para MR notou uma maior variação nos valores mensurados em misturas com maiores taxas incorporação, o que atesta ganho na rigidez da mistura.

Posteriormente em Portugal, Bento (2010) afirma que no país o uso do RAP em novas misturas variam numa taxa de até 40%. Deste modo o autor buscou incorporar percentuais superiores a fim de avaliar qual seria o desempenho das misturas mediante um percentual de 70%

de incorporação. Cujas as amostras submetidas a ensaios mecânicos de deformação permanente e resistência tração com ação da água, notou-se que as amostras atendem o limite mínimo de resistência a tração e deformação permanente.

Contudo Pereira (2012) utilizou taxas ainda superiores se comparadas a de Bento (2010), com percentuais de 70, 80 e 90%, além de inserções do CAP 50-70 e AR-75 em proporção de 15 e 30%. Nos resultados obtidos pela autora, as incorporações cujo percentual de AR era de 15% houve incrementos crescentes com o aumento do teor de RAP, o que configura ganho na rigidez. E para incorporação de AR em 30% a mistura que obteve maior desempenho foi a com 70% de RAP, estando esta com menor rigidez favorecendo a vida de fadiga.

Basueny (2016) realizou análises de vida de fadiga em misturas recicladas a quente com taxas de 0, 15, 25 e 40% de RAP, além da inserção de agentes rejuvenescedores, ligante e agregados virgens, e concluiu o seu estudo com a hipótese de que a taxa de incorporação de RAP é proporcional ao ganho da rigidez. Contudo ao realizar varreduras de módulo dinâmico das misturas recicladas, notou que a mistura com percentual de incorporação de 25% em baixa temperatura apresentava rigidez superior a de 40%, sendo que a mistura de 40% apresentou melhor desempenho a vida de fadiga nas análises realizadas pelo autor.

Centofante (2016), trabalhou com taxas de 0, 10, 20 e 30% avaliando parâmetros como MR, RT e fadiga. O autor obteve como conclusão que ao passo que são incorporados percentuais de RAP na mistura tem-se um ganho no MR com aumento da rigidez. Quanto a resistência a tração também foi constatada a elevação do RT devido o aumento do percentual de RAP. Na vida fadiga a autora constatou que não houve melhoras e nem perda de desempenho com a inserção do material para análise descrita, mas ressalva a necessidade de averiguações mais precisas, visto que a verificada pela autora foi em elevadas frequências.

Bohn (2017) avaliou misturas com 0, 25 e 50% de RAP com emprego da técnica de dosagem e reciclagem de misturas mornas, cujo resultados obtidos levaram a conclusão do ganho de rigidez com inserção do RAP, onde os valores de RT e MR obtidos aumentaram, tanto para baixos, quanto para altos teores de RAP comparado a uma mistura de referência sem RAP.

Suzuki (2019) avaliou o desempenho de misturas com teores de 25, 35 e 50% de RAP, baseados nos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, módulo dinâmico, *flow number* e fadiga por flexão em quatro pontos. E notou que as misturas recicladas apresentaram um aumento dos valores de RT, MR e FN para altos teores de RAP, favorecendo um bom comportamento a

deformação permanente. Quanto ao MD as misturas com baixos teores apresentaram valores semelhantes à mistura de referência, e a vida de fadiga presumia-se que quanto maior o percentual de incorporação mais suscetível ao trincamento essa mistura estaria, entretanto a mistura com 50% de incorporação sem rejuvenescedor apresentou resultados melhores se comparada a de 25%.

## **2.8 FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Os materiais em si, no decorrer de sua vida de serviço, estão sujeitos a processos de deterioração que alteram suas propriedades mecânicas. Tal fato se exemplifica nos materiais de camadas de pavimentos, tendo sua degradação oriundas das cargas de veículos, produtos químicos e ações ambientais, como temperatura, umidade, entre outros aspectos (BALBO, 2007).

A fadiga de um material é caracterizada pelo processo de deterioração estrutural quando o material é submetido a um estado de tensões e deformações repetidas. Cujas cargas aplicadas na amostra pode ser inferior a carga de ruptura, resultando no trincamento após um número elevado de repetições no carregamento ou até mesmo a sua ruptura, ou seja, trata da perda de resistência do material quando solicitado por uma carga repetida (PREUSSLER et al., 1981 apud MELO, 2014).

Segundo a ASTM (1979), a fadiga trata do processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos.

Nas misturas asfálticas, a fadiga é caracterizada como sendo o trincamento da camada de revestimento em função das tensões impostas pelo tráfego. De acordo com Silva (2008), as trincas superficiais nos revestimentos asfálticos causadas pela fadiga podem ser do tipo isoladas ou interligadas, cujas as trincas interligadas do tipo couro de jacaré representam um estágio avançado de fadiga.

Fontes (2009) afirma que as trincas presentes na camada de rolamento, são os defeitos mais recorrentes dos pavimentos flexíveis, cuja causa do trincamento é caracterizado pelo fenômeno de fadiga, ou seja, devido às ações repetidas dos esforços de tração por flexão na camada de rolamento. Cujas trincas por fadiga iniciam-se na parte inferior da camada asfáltica e propagam-se até a superfície do pavimento.

De La ROCHE e ODEON (1993) apud BARRA (2009), relatam que em campo as misturas

asfálticas são submetidas a solicitações de curta duração a cada passagem do eixo de um veículo pesado. Deste modo, o pavimento que se encontra apoiado sobre um suporte deformável, é submetido a esforços de flexão alternada no sentido longitudinal do carregamento, e as tensões de tração surgem na base das camadas, e tem-se a repetição das solicitações a cada passagem de veículo.

Maillard (2005) apud Barra (2009) cita que estes carregamentos não provocam de modo imediato a ruptura do material, mas a repetição dos mesmos pode sim levar, em longo prazo a uma fissuração por fadiga e completa ruptura.

De acordo com Tayebali *et al.* (1994), no dimensionamento de uma estrutura de pavimento flexível, características que levam em análise o comportamento à fadiga são considerados como parâmetros de insuma importância em um projeto de pavimentos, fato este que a resistência à fadiga das misturas asfálticas é a capacidade que a estrutura tem de suportar carregamentos repetidos sem que haja evolução de trincas na camada de rolamento.

Dentre os agentes que ocasionam a fadiga, além das tensões críticas oriundas do carregamento do tráfego, a rigidez das misturas também é um agente causador, fato que, de acordo com Bernucci (2007) a fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que afetam a vida útil do material mesmo não parecendo serem críticas.

Bounnare *et al.* (1980) apud Nunes (2017) afirma que a rigidez das misturas asfálticas nas camadas de pavimentos variam com a profundidade, acarretando na variação da deformação, que atrelado à ação do tráfego ocasiona o desenvolvimento de trincas por toda a camada.

Speight (2016), relata que a quantidade de ligante é um dos fatores que afetam a resistência à fadiga das misturas asfálticas, onde misturas com baixo teor de ligante tende a ser mais susceptíveis a fadiga do que uma mistura mais ricas em ligante asfáltico.

Além disso, o autor complementa que baixos graus de compactação das misturas também contribuem significativamente para falhas nos pavimentos, pois reduzem sua resistência superficial, visto que um elevado volume de vazios na mistura e alta permeabilidade do pavimento, aumentando assim o dano causado pela solicitação do tráfego.

Fontes (2009) cita outros fatores também influenciam na vida de fadiga das misturas asfálticas, sendo o teor de ligante e a permeabilidade da mistura asfálticas os principais. Estando o agregado com menor influência comparado às outras duas variáveis. Onde no ponto de vista do autor, quanto maior for a percentagem de ligante, maior é a capacidade da mistura betuminosa para

resistir à fadiga.

A Tabela 2.8 apresenta a influência dos fatores componentes de uma mistura asfáltica que afetam a resistência à fadiga, com base em diversas constatações de autores (Pell 1973; Monismith et al., 1971; Monismith, 1981; SHRPB, 1993).

**Tabela 2-8** Fatores influentes na resistência a fadiga.

Fatores	Evolução dos fatores	Efeito da evolução do fator no ensaio	
		Tensão controlada	Deformação controlada
Viscosidade do ligante	Aumento	Aumenta	Reduz
Teor de ligante	Aumento	Aumenta	Aumenta
Granulometria	Aberta para densa	Aumenta	Reduz
Porosidade da mistura	Redução	Aumenta	Aumenta
Temperatura da mistura	Redução	Aumenta	Reduz

Fonte: Adaptado de SHRPB (1994 apud Fontes 2009)

Fontes (2009) complementa elencando outros fatores que comprometem a vida de fadiga das misturas asfálticas, sendo:

- as misturas usinadas com ligantes mais duros são menos susceptíveis às variações de temperatura e por consequência, possuem uma maior vida de fadiga;
- para teores de ligante abaixo do considerado ótimo, a vida de fadiga diminui;
- em ensaios que permite períodos de repouso, ocorre o fenômeno da auto reparação que pode ser traduzido como um ganho de vida;
- a forma dos agregados possui uma influência indireta sobre a duração da vida das misturas betuminosas, sendo a porosidade o fator mais influente;
- a percentagem de filer tem influência na rigidez da mistura, assim, para um teor ótimo de filer, a vida de fadiga é maior; logo dependendo do tipo de filer, dada a sua elevada superfície específica, a resistência à fadiga pode ser menor;
- em ensaios à deformação controlada e realizados a temperaturas de 0 °C a 25 °C, a duração da vida de fadiga aumenta com o aumento da temperatura; enquanto que em ensaios à tensão controlada, a vida diminui com o aumento de temperatura;
- a variação do módulo de rigidez das misturas está relacionado com a temperatura. Se a temperatura aumenta o módulo diminui e, nos ensaios à tensão controlada a deformação cresce ao longo do ensaio (maior aquecimento) e nos ensaios à deformação controlada a tensão diminui ao longo do ensaio (menor aquecimento);

- o efeito da frequência de aplicação de carga é semelhante ao da variação da temperatura, ou seja, com aumento da frequência aumenta a duração da vida para os ensaios à tensão controlada e uma diminuição da duração da vida para ensaios à deformação controlada.

Os ensaios laboratoriais exercem papel bastante importante na determinação dos modelos constitutivos de fadiga, estabelecidos pela relação entre o estado de tensão-deformação e o número de repetições de carregamentos até atingir a ruptura. Cujas as cargas aplicadas com diferentes níveis de tensões e deformações, devem reproduzir as condições previstas em campo para as misturas asfálticas, havendo assim uma aproximação do estado da arte para situação real (DI BENEDETTO *et al.* 2004).

Arao (2014) afirma que o tipo de carregamento que incide na estrutura de um pavimento em função do tráfego não é simples de ser reproduzido em laboratório. Fato este que conforme um veículo trafega sobre o pavimento as tensões tangenciais mudam de sentido. Em contrapartida, no laboratório, os ciclos de carga aplicados são mantidos iguais ao longo de todo o período do ensaio, embora seja possível aplicar pulsos de carga com formas variadas através do controle da tensão ou da deformação que são aplicadas em cada ciclo. Isto implica que a maioria dos carregamentos aplicados não reproduz fielmente as condições do pavimento em campo.

O critério de ruptura por fadiga nas misturas asfálticas, pode ser por parâmetros de tensão e deformação controlada (Silva, 2020 ). Cujas escolha de tratamento e adoção de método de constatação irá depender do equipamento disponível para ensaio, e da metodologia de confecção dos corpos de prova.

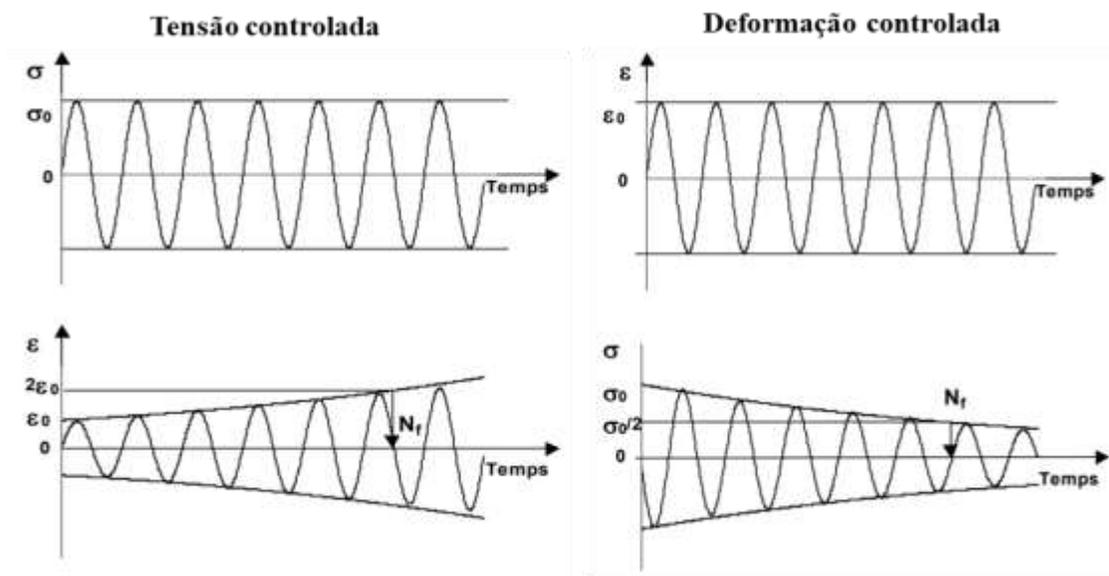
IWANAGA (2007) afirma que o ensaio a tensão controlada é mais adequado para revestimentos com espessuras superiores a 15 cm, pois a mistura asfáltica vai perdendo sua rigidez com o número de aplicações de carga e, portanto, sofrendo maiores deformações com o tempo. A deformação aumenta no início do ensaio, estabiliza-se ao decorrer, tendo um aumento lento e progressivo e nos instantes que antecedem a ruptura, ocorre um aumento elevado da deformação até a completa ruptura. Estes apresentam resultados mais dispersos e pessimistas comparados aos de deformação controlada.

A vida de fadiga por tensão controlada pode ser expressa em relação às tensões, ou com base na deformação resiliente inicial ( $\epsilon_i$ ), podendo essa deformação resiliente inicial ser calculada indiretamente em função do módulo de resiliência (MR) da mistura asfáltica, ou mensurada nos primeiros carregamentos para cada nível de tensão.

Segundo Medina (1997), ensaios de vida de fadiga por deformação controlada são mais difíceis de se executar em necessidade de ajustar a força que está sendo aplicada, em função dos desvios da deformação que está sendo medida. Esse tipo de ensaio é mais aplicável a pavimentos com revestimentos menos espessos, pois as deformações são conduzidas pelas camadas subjacentes e a diminuição no módulo de rigidez do revestimento não é considerável no dimensionamento (IWANAGA, 2007).

PINTO, 1991 apud NUNES, 2017 relatam que no ensaio por tensão controlada, a carga aplicada na amostra é mantida de modo constante e as deformações aumentam no decorrer do ensaio, sendo adotado como critério de parada do ensaio a total ruptura do CP. Já no ensaio de deformação controlada há a aplicação de cargas repetidas que produzem deformações constantes ao longo do ensaio, acarretando na diminuição da carga aplicada, assim não existe de forma clara um momento de ruína completa do corpo de prova, normalmente se encerra o ensaio quando houver uma queda pré estabelecida da rigidez inicial do corpo de prova, cujo critério de ruptura tem sido a redução em 50% da carga inicial aplicada, 50% do módulo de rigidez inicial por flexão ou 50% da tensão inicial (Pronk & Hopman, Tayebali *et al.*, 1994 e Van Dijk & Visser, 1977).

Entretanto em ambos os ensaios há uma redução da rigidez inicial do material a um nível que pode ser pré-estabelecido, no sentido de definir o fim do ensaio, ou seja, um critério de ruptura. A Figura 2.4 exemplifica a diferença entre os estados de tensão e deformação controlada no ensaio de vida de fadiga.



**Figura 2-4** Diferença entre os estados de tensão e deformação controlada no ensaio de vida de fadiga.

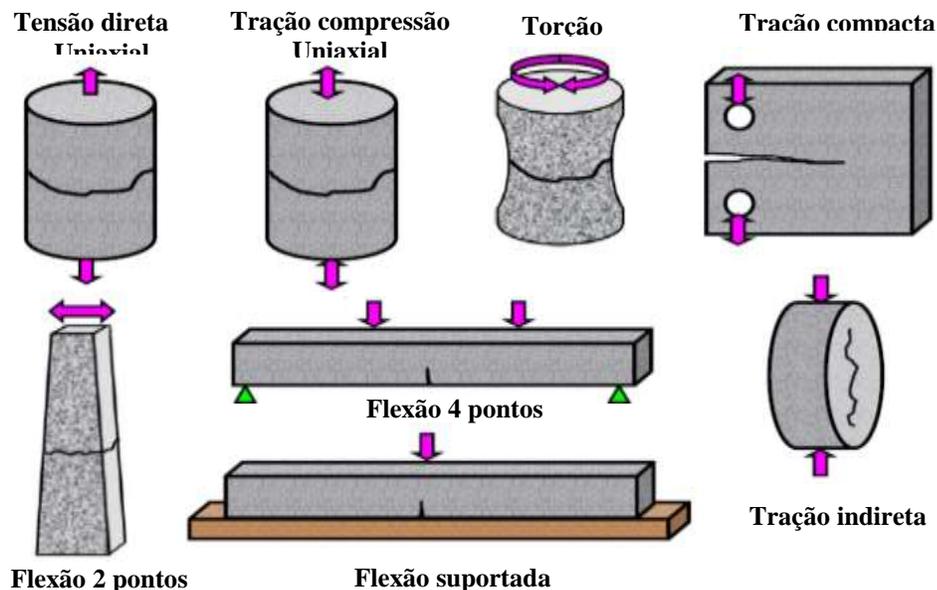
Soulliman (2012) apud Mello (2014) listam as diferenças entre os ensaios de vida de fadiga por tensão e deformação controlada, sendo estes mostrados na Tabela 2.9.

**Tabela 2-9** Diferenças entre os ensaios de vida de fadiga.

<b>Variáveis</b>	<b>Tensão controlada</b>	<b>Deformação controlada</b>
Espessura do CA	Camadas espessas	Camadas delgadas < 7,5cm
Nº de ciclos (falha)	Falha bem definida devida a fratura do CP	Arbitrária o ensaio é interrompido quando a carga é reduzida em certa proporção do valor inicial
Dispersão resultados	Maior	Menor
Nº de CP necessários	Menor quantidade	Maior quantidade
Vida de Fadiga	Geralmente menor	Geralmente maior
Variáveis da mistura	Mais sensível	Menos sensível
% de dissipação de energia	Rápida	Lenta
% de propagação de trincas	Mais rápido só que em campo	Mais representativo ao que ocorre me campo
Efeitos benéficos no repouso	Maiores efeitos	Menores efeitos

Fonte: Adaptado de Soulliman (2012 apud Melo, 2014)

Dentre o dois critérios de ruptura existente na determinação da vida de fadiga, tem-se atualmente distintos ensaios a fim de determinar a fadiga das misturas asfálticas. Podendo ser uniaxiais de tração-compressão e ensaio de tração indireta em amostras cilíndricas, ensaios em viga à flexão em amostras prismáticas, trapezoidais e retangulares, conforme Figura 2.5.

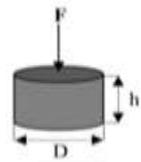
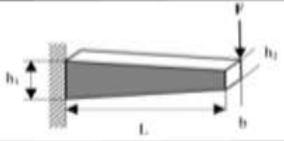
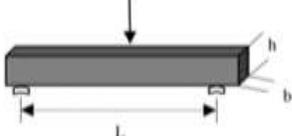
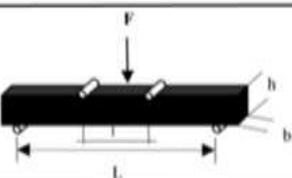
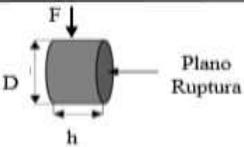


**Figura 2-5** Tipos de ensaios para determinação da vida de fadiga (Mello 2014).

Sendo o ensaio de fadiga por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, ou de tração indireta, comumente conhecido como ensaio brasileiro de fadiga bastante difundido no país, é realizado à tensão controlada, cuja a tensão  $\sigma t$  é repetidamente aplicada e induzida pela força vertical distribuída no friso da geratriz de maneira que não se altera até que o corpo de prova atinja ruptura (MEDINA, 1997).

Segundo Melo (2014), a qualidade de predição da resistência à fadiga utilizando qualquer um dos métodos de ensaio, depende do grau de precisão em que o ensaio simula o estado de carregamento, os apoios, o estado de tensão e temperatura ambiente, estando a seleção do método teste relacionado com a disponibilidade, custo e facilidade de utilização do equipamento.

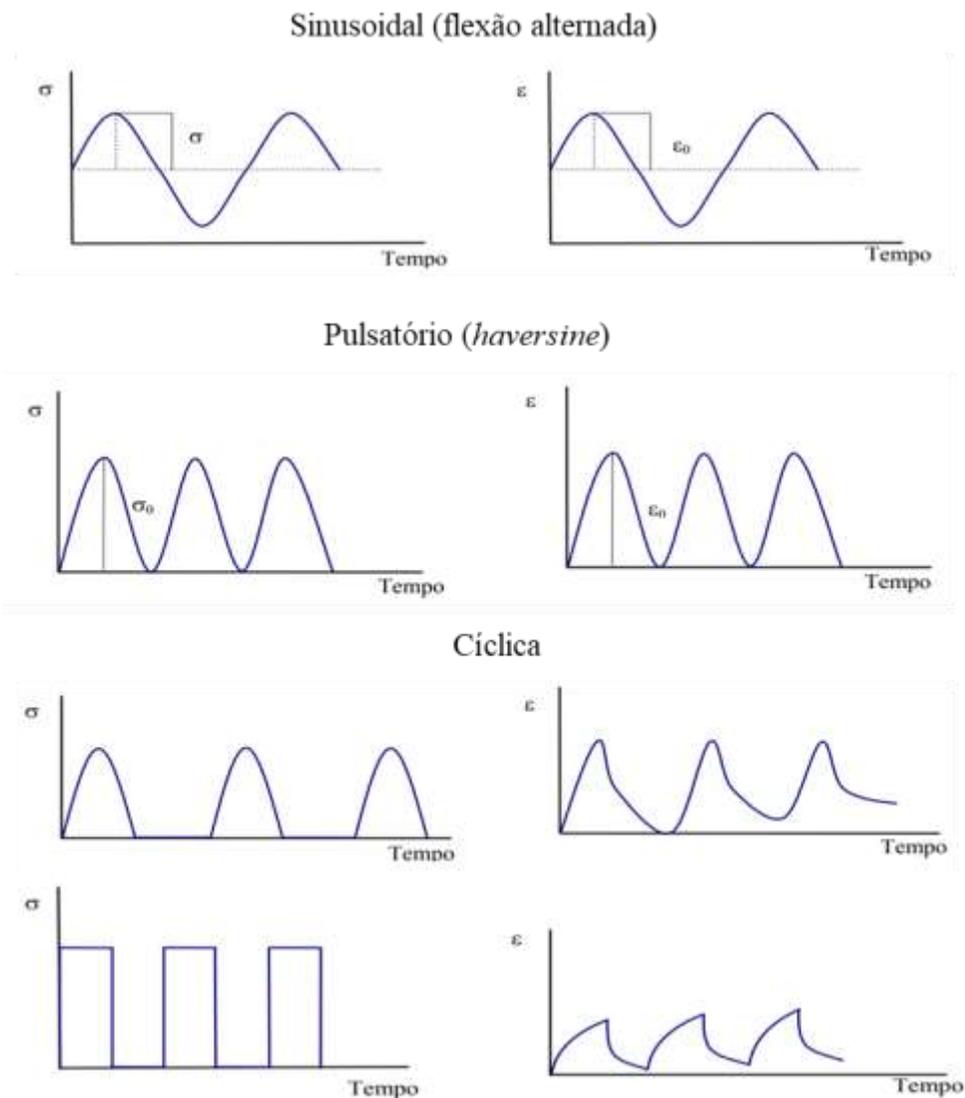
Di Benedetto *et al.* (2004) apresenta um resumo das principais características dos ensaios que foram realizados para o estudo da fadiga em misturas asfálticas. A Figura 2.6 apresenta as características dos ensaios de vida de fadiga.

Ensaio	Geometria	Carregamento
T/C		Tensão –Compressão (Uniaxial) Homogêneo
2- PB		Flexão- dois pontos Não homogêneo
3- PB		Flexão- três pontos Não homogêneo
4 -PB		Flexão- quatro pontos Não homogêneo
IDT		Tração indireta Não homogêneo

**Figura 2-6** Características dos ensaios de vida de fadiga (Nunes 2017 apud autor 2020).

O ensaio de vida de fadiga em si consiste em submeter amostras de corpo de provas de CA a um carregamento, cíclico até a ruptura. Sendo esta definida de várias formas, cujo valor adotado dependerá da forma de carregamento.

CAPITÃO, 2003 apud COLPO, (2014) afirmam que é possível analisar os módulos e as características da fadiga através de diferentes condições de carregamentos, sendo as formas de carregamentos mais recorrentes para misturas asfálticas as do tipo senoidal (sinusoidal), semi-seno-verso (haversine), cíclica e retangular. Suas configurações em relação à tensão e à deformação em função do tempo são demonstradas na Figura 2.7.



**Figura 2-7** Condições de carregamento nos ensaios de fadiga (Colpo 2014).

Colpo (2014), complementa que a forma senoidal (sinusoidal) ocorre quando o equipamento empregado nos ensaios do tipo à flexão possibilita aplicar o mesmo nível de deslocamento em sentidos opostos, ou seja para o lado inferior e superior, com amplitudes de deslocamentos constantes e alternadas com o tempo. A semi-seno-verso, ou haversine, ocorre quando o equipamento aplica a mesma amplitude de deslocamento em um único sentido, inferior ou superior.

A forma senoidal obtida nos ensaios à flexão alternada é o que mais se aproxima das condições observadas no campo durante passagem de veículos, condição essa demonstrada por Perret, com o uso de modelos elástico-lineares e viscoelástico lineares, e Séries de Fourier (PERRET, 2003 apud BARRA, 2009).

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de percentual de trincamento e ou vida de fratura ( $N_f$ ) ou vida de serviço (NS). A primeira se refere ao número total de aplicações de carga necessária à ruptura completa da amostra e a segunda ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduz o desempenho, ou rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido (BERNUCCI et al., 2008).

O modelo geral de vida de fadiga estipula que a resistência à fadiga de uma mistura asfáltica é geralmente expressa pela relação entre a tensão ou deformação inicial e o número de repetições de carga que levam a ruptura do corpo de prova. O valor obtido desta relação, que seria o número de ciclos, é determinado por meio dos ensaios de previsão de vida de fadiga (PAIS, 1999 apud FONTES, 2009).

Assim os ensaios de previsão de fadiga levaram a criação de modelos de determinação, cujos os modelos iniciais aplicados na previsão de vida de fadiga consideravam uma relação similar ao que ocorria em metais.

Medina (1997), faz análise aos modelos femológicos para determinação da vida de fadiga, conforme equações :

Para ensaios a tensão controlada;

$$N_f = K1. \left(\frac{1}{\sigma_i}\right)^{n1} \quad (2.8)$$

Para ensaios a deformação controlada;

$$N_f = K_2 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{n_2} \quad (2.8.1)$$

Sendo que  $N_f$  corresponde a vida de fadiga da mistura um critério de ruptura por tensão e ou deformação controlada (número de ciclos);

$\sigma_i$  é a tensão de tração;

$\varepsilon_i$  é a deformação de tração;

$k_i, n_i$  são coeficientes experimentais.

Entretanto por se tratar de uma abordagem com fundamentação empírica, os modelos femológicos em geral não proporcionam uma relação entre a carga e o acúmulo de danos na mistura asfáltica apenas. Bonnaure *et al.* (1980) apud Nunes (2017), propuseram a formulação conhecida como Modelo Geral, que considera que a fadiga não é dependente somente da deformação ou tensão aplicada, mas também apresenta relação com a rigidez do material, conforme equações:

Para ensaios a tensão controlada:

$$N_f = K_1 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_i}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{1}{S_0}\right)^{n_3} \quad (2.8.2)$$

Para ensaios a deformação controlada:

$$N_f = K_2 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{n_2} \cdot \left(\frac{1}{S_0}\right)^{n_3} \quad (2.8.3)$$

Sendo  $S_0$  é a rigidez inicial da mistura asfáltica e  $n_3$  coeficiente determinado experimentalmente no ensaio.

Assim CARPENTER *et al.*, 2003 apud MELO, (2014) complementam que a abordagem de determinação da vida de fadiga, também não pode ser diretamente aplicada a cenários de carregamento complexo, como os que se tem em campo, visto questões de sazonalidade carregamentos, eventualidade de passagens de veículos. Deste modo outras abordagens tem sido aplicadas na determinação da vida de fadiga, como: a mecânica do dano contínuo, a mecânica da fratura e análises por meio da energia dissipada.

Deste modo cada ensaio de determinação da vida de fadiga em misturas asfálticas, faz uma abordagem específica, em função do critério de ruptura adotado, da tipologia e forma de

carregamento e metodologia de teste.

### **2.8.1 Fadiga por flexão a 4 pontos**

O ensaio de fadiga por flexão em 4 pontos em viga prismática trata do teste em que a viga é sujeita à um nível de tensão ou deformação constante ao longo do ensaio. Cujo o equipamento aplica um carregamento composto por duas cargas verticais afastadas entre si, promovendo a flexão pura do corpo de prova prismático, em função do momento constante máximo ou mínimo, e do cortante nulo. Medindo assim a força máxima aplicada e o deslocamento máximo no meio do vão por meio de LVDT.

O ensaio é normatizado pela AASHTO T 321-07, ASTM D 7460-08 e pela norma européia EN 12697-24. Cujas normativas especificam dimensões das vigas com comprimento de  $380 \pm 6$  mm, largura de  $63 \pm 6$  mm e altura de  $50 \pm 6$  mm, com frequência de ensaio de 5 Hz a 10 Hz e temperatura de 20°C, sendo que para análises mais profundas usa frequência variável de 0,01Hz a 30Hz (BOEIRA *et al.*, 2018)

Segundo Colpo (2014), na execução do ensaio, a cada ciclo de carga, o sistema de controle e aquisição de dados deve mensurar o deslocamento no centro da viga, e sua deformação, realizando um ajuste da carga aplicada assim que o CP atingir um nível de deformação constante em cada ciclo. O sistema de aquisição de dados deve registrar os ciclos de carga, as cargas aplicadas e os deslocamentos, bem como calcular e gravar as tensões de tração máxima, deformações de tração máxima, ângulo de fase, rigidez da amostra, energia dissipada e a energia dissipada acumulada para cada ciclo de carga especificado.

### **2.8.2 Fadiga por flexão a 3 pontos**

Na fadiga por flexão em três pontos, a metodologia é similar a de quatro pontos onde as normativas definem o parâmetro de rigidez à flexão da viga como sendo a relação entre a tensão máxima de tração e a deformação máxima da viga, cuja a viga prismática é sujeita a uma tensão ou deformação constante no decorrer do ensaio

Fato que na flexão a três pontos o início da ruptura do corpo de prova pode não ocorrer na zona de tensão máxima, como seria presumido, e ao contrário do que se passa na estrutura de um

pavimento, o estado de tensão é simples, ou seja uniaxial (FONTES, 2009).

### **2.8.3 Fadiga por flexão em corpos de prova trapezoidais (2 pontos)**

Conhecido como fadiga a dois pontos, o ensaio de flexão em corpos de prova trapezoidais caracteriza-se pela aplicação de uma força na menor extremidade do corpo de prova através de um sistema que gera uma deformação constante. O critério de ruptura é definido quando a força inicial é reduzida pela metade, sendo a vida de fadiga da mistura equivalente ao número de ciclos ao final do ensaio (LOUREIRO, 2003).

Normalizado na Europa através da norma NF P 98-261-1 (1993), a amostra trata de um trapézio com dimensões de 56 mm na base maior, 25 mm na base menor, 250 mm de altura e 25 mm de espessura. Realizado normalmente por critério de deformação controlada, a frequência de 25 Hz e temperatura de 10 °C, a extremidade maior da amostra é engastada, mantendo-se estática durante todo o ensaio. Na extremidade menor é aplicado um deslocamento capaz de produzir no terço médio central uma deformação de tração constante (COLPO, 2014, ROSSATO, 2015).

### **2.8.4 Fadiga por tração-compressão direta (uniaxial)**

O ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão prescrito pela norma AASHTO TP 107-14 - Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests, consiste na aplicação de uma deformação cíclica senoidal constante em corpos de prova cilíndricos, até a completa ruptura do CP. Durante a realização do ensaio, são obtidos os dados de deformação, de carga, ângulo de fase e o módulo dinâmico (BAPTISTA, 2007).

UNDERWOOD (2012) apud Boeira *et al.*(2018), afirma que no ensaio de fadiga por tração-compressão direta é possível avaliar a evolução da rigidez do material até que ocorra a ruptura, podendo essa ser constatada pelo desenvolvimento do ângulo de fase.

O autor ainda ressalta que os resultados obtidos pelo ensaio são modelados de acordo com a mecânica do dano contínuo, ou seja por meio de um modelo viscoelástico *S-VECD Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD).

## 2.8.5 Fadiga por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta ou comumente conhecido como ensaio Lobo Carneiro, foi desenvolvido pelo engenheiro Fernando Lobo Carneiro em 1943, cuja finalidade era para determinação da resistência à tração de concretos de cimento Portland. Comumente conhecido como ensaio brasileiro, o mesmo foi adaptado para o uso de cargas repetidas e para aplicação em misturas asfálticas, sendo então determinado a vida de fadiga da mistura ARAO, 2014).

Como o próprio nome já evidencia o ensaio de fadiga a compressão diametral, é realizado de modo que há a aplicação de um carregamento de compressão no CP, havendo assim o desenvolvimento de uma tensão de tração uniforme no CP agindo paralelamente ao plano de aplicação da carga e ao plano diametral vertical. De execução bastante simplista é considerado como sendo um método eficaz para a caracterização dos materiais quanto às propriedades de módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson.

O ensaio de fadiga por compressão diametral, em execução no Brasil desde 1980, recebeu em agosto de 2018 a publicada de sua normativa DNIT 183/2018-ME, cujo procedimento estabelece utilização de corpos de prova cilíndricos que são comprimidos diametralmente, o que gera uma tensão de tração na direção horizontal da amostra. O carregamento se dá pela frequência de 60 aplicações por minuto, com um pulso de carga de 0,1s seguido de 0,9s de repouso (DNIT, 2018).

O ensaio de Fadiga por compressão diametral é realizado a tensão controlada com uma frequência de carregamento geralmente igual a 1 Hz e temperatura de 25°C, sendo que o mesmo não pode ser realizado a deformação controlada. Em função das simplificações na preparação das amostras do ensaio e de seus métodos de execução, há um maior distanciamento laboratório-campo comparado a outros métodos de ensaio para previsão da vida de fadiga, como os de flexão (COLPO, 2014).

O autor ainda afirma que no decorrer do ensaio são geradas tensões cisalhantes junto aos frisos dos pratos de apoio e do atuador, e tem-se um acúmulo de deformação em cada aplicação do carregamento, assim, o corpo de prova acaba rompendo por excesso de deformação de tração e não propriamente por fadiga.

Medina (2005) afirma que as principais vantagens do método de ensaio estão na

simplicidade e execução, na ruptura que é iniciada numa zona de tensão uniforme, e na existência de um estado biaxial de tensões que representa melhor as condições in situ. E como desvantagem o autor elenca que mesmo existindo um estado biaxial de tensão no centro do CP, torna-se de fato impossível variar a razão entre as componentes horizontal e vertical e, deste modo, simular o estado de tensão em pontos críticos num pavimento.

Pinto 1991 e HUANG 1993 afirmam que no Brasil, o ensaio de fadiga comumente utilizado é à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas. O ensaio consiste na aplicação de uma carga a uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,1 segundo de duração do carregamento repetido e 0,9 de descarregamento. Uma câmara com sistemas de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato controlam a temperatura. Onde durante a realização do ensaio é determinada para cada CP de mistura analisada, a relação entre o número de ciclos até atingir a ruptura e o nível de tensões atuante. Sendo que no decorrer do ensaio, a deformação de tração que é gerada no CP aumenta até a ruptura da amostra.

A tensão solicitante no corpo de prova no ensaio de fadiga por compressão diametral é considerada constante, fato que à medida que o carregamento é cíclico e repetido, há o desenvolvimento de danos no corpo de prova, o que acarreta a sua ruptura. Estando o limite de ruptura do concreto asfáltico no momento em que o CP começa a apresentar as primeiras microtrincas (MELO 2014).

Não são considerados o envelhecimento da mistura e da progressão do dano no material durante o ensaio, além de aspectos presentes no campo que não são simulados em laboratório, como a variação de temperatura no decorrer do dia, a sazonalidade de carregamentos e, a ocorrência de um self healing devido o fenômeno de recuperação de trincas, em razão da ausência de carregamento em alguns períodos (BALBO, 2000).

No ensaio de fadiga por compressão diametral de tração indireta sob tensão controlada, o carregamento, carregamento vertical diametral pulsante gera uma tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada que provoca a ruptura do corpo de prova ao longo da parte central do plano diametral vertical. Sendo a vida de fadiga determinada pelo número total de aplicações de carga que provoca a ruptura do corpo de prova a cada nível de tensão. Sendo que a análise estimada em laboratório é usada no dimensionamento de pavimentos asfálticos e comparada ao tráfego real para se prever o percentual de área trincada do pavimento (DNIT, 2018).

De acordo com DNIT (2018) a vida de fadiga no ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada é expressa pelo número N de solicitações necessárias para o fim do ensaio, podendo ser relacionada à tensão de tração ( $\sigma$ ) gerada inicial, à deformação de tração inicial ( $\epsilon_i$ ), à diferença de tensões no centro da amostra ( $\Delta\sigma$ ), ou à relação da tensão aplicada pela resistência a tração estática, por modelos do tipo log, dados pelas equações:

$$N = K_1 \cdot \left(\frac{1}{\sigma t}\right)^{n_1} \quad (2.8.4)$$

$$N = K_2 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{n_2} \quad (2.8.5)$$

$$N = K_3 \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n_3} \quad (2.8.6)$$

$$N = K_4 \cdot \left(\frac{\sigma t}{\sigma_r}\right)^{n_4} \quad (2.8.10)$$

Sendo o N correspondente ao número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova,  $\sigma$  é a tensão de tração aplicada,  $\epsilon_i$  é a deformação de tração inicial,  $\Delta\sigma$  é a diferença entre tensão horizontal e vertical,  $\sigma_r$  é a resistência à ruptura estática do material, e  $k_i$ ,  $n_i$  são parâmetros experimentais obtidos no ensaio.

Deste modo o método de dimensionamento mecânico empírico de pavimentos adotado no Brasil considera que a diferença das tensões máxima de compressão e de tração na face inferior da camada de revestimento ( $\Delta\sigma$ ) é o fator preponderante e desencadeador do trincamento por fadiga do revestimento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo do trabalho serão descritos os tipos de materiais e as metodologias de ensaio empregadas que serão apresentados e discutidos posteriormente. É feita uma breve descrição dos procedimentos de caracterização dos materiais, assim como dos métodos adotados para obtenção dos resultados, os procedimentos para elaboração das misturas asfálticas utilizadas e confecção dos corpos de prova.

### 3.1 MATERIAIS

Foram utilizados quatro principais materiais sendo: agregado mineral do tipo micaxisto, RAP resultante do desbaste de pavimento deteriorado, CAP 50/70, e rejuvenescedor a base de óleo de xisto.

#### 3.1.1 Material fresado

O material fresado foi disponibilizado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes) proveniente do corte e/ou desbaste da capa asfáltica realizada na BR-060 no Km 180, no mês de abril do ano de 2019. A Figura 3.1 ilustra o local em que foi realizada o serviço.



**Figura 3-1** Local de coleta do material fresado (Autor 2020).

Sabe-se que material fresado é entendido por diversos autores como sendo material proveniente do corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento. Muitas vezes esse

material é chamado de RAP, o que nem sempre é correto, pois caracteriza-se como RAP o material proveniente da fresagem da capa asfáltica, sem presença de resíduos das demais camadas granulares (Base, Sub-base ou Reforço de subleito).

Segundo informações da empresa que realizou o serviço, o material fresado aqui utilizado na pesquisa, é oriundo do desbaste apenas de camadas de revestimentos asfálticos já deterioradas, e o produto final desde desbaste trata de um material granular composta por agregado graúdo, miúdo, fíler e ligante oxidado, que aqui será chamado de RAP ou simplesmente fresado.

### **3.1.2. Rejuvenecedor**

O agente rejuvenecedor utilizado na pesquisa foi o Cyclopav 100, fornecido pela Betunel, que consiste em um agente a base de óleo de xisto, se enquadrando como um AR-5.

A caracterização do agente rejuvenecedor baseou-se nos requisitos estabelecidos na especificação brasileira regulamentada pela Portaria nº 44 de 29/09/1997 (DNC nº 04/97). Cujos ensaios realizados no rejuvenecedor foram basicamente densidade, viscosidade, ponto de fulgor e combustão, e simulação do envelhecimento em curto prazo (RTFOT), além de uma análise de varredura de viscosidade rotacional (ASTM D 4402/15) .

### **3.1.3 Agregado mineral**

O agregado utilizado para as dosagens e recomposição granulométrica foi o Micaxisto, presente também no RAP. Esse material é característico da região do Centro-Oeste, constituído por quartzo e mica com alto grau de xistosidade, ou seja, alto grau de metamorfismo, apresentando plano de foliação bem definido, vistos a olho nu. Foram fornecidos pela por uma pedreira particular, localizada na região de Aparecida de Goiânia, sendo coletados, as graduações pertinentes a: brita 1, brita 0, areia e pó de pedra.

### **3.1.4. Ligante asfáltico**

Quanto ao ligante, foi utilizado o CAP 50-70, comum nos projetos regionais para misturas asfálticas a quente. O material foi fornecido por uma distribuidora particular, situada em Brasília-DF, e proveniente da Centro-Oeste Asfaltos, e foi incorporado às misturas com RAP.

### 3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental estabelecido nesta pesquisa foi definido considerando os ensaios necessários para determinação da vida de fadiga em misturas asfálticas recicladas a quente. Assim, nesta seção será apresentada a metodologia de ensaios que foram realizados no decorrer da pesquisa, que seguiu o fluxograma evidenciado na Figura 3.2.

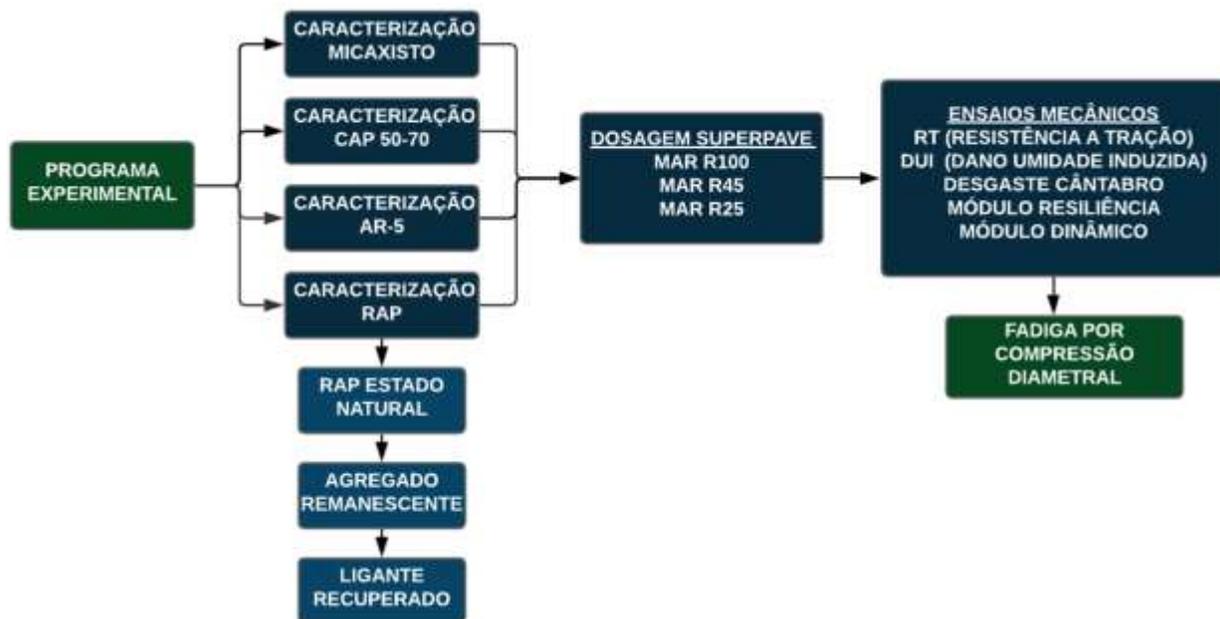


Figura 3-2 Fluxograma do programa experimental (Autor 2020).

Cabendo ressaltar que constava como análise no programa experimental, além da fadiga por compressão diametral (tensão controlada), a determinação da vida de fadiga por deformação controlada a partir do ensaio de flexão em 4 pontos em vigas prismáticas, e a execução de uma mistura de referência (convencional) para comparação dos parâmetros obtidos em ensaios laboratoriais.

Sendo assim não foi possível realizar essas determinações em função de tempo, e em decorrência da pandemia pelo COVID-19. Assim foi determinado a vida de fadiga apenas por tensão controlada, e a mistura de referência foi apoiada na realizada por Barroso (2018) que trabalhou com os mesmos materiais convencionais utilizados na presente pesquisa.

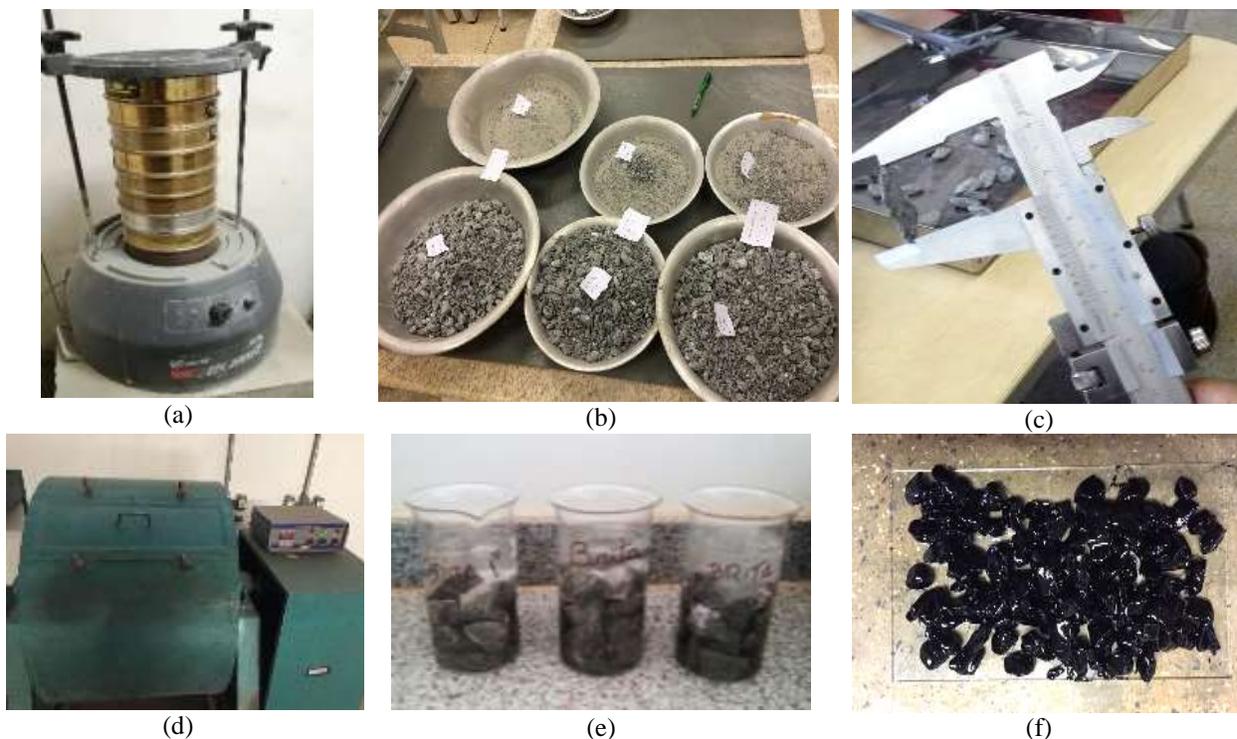
### 3.2.1 Caracterização do agregado mineral

Na caracterização dos agregados foram adotados procedimentos normalizados e preconizados pelo DNIT além de especificações internacionais de acordo com preconizações da AASTHO e ASTM.

Para concepção das misturas optou-se trabalhar com misturas do tipo concreto asfáltico convencional cuja granulometria da composição se enquadra dentro da faixa C do DNIT. Esta granulometria se caracteriza pela distribuição de forma contínua, sendo os agregado de graduação densa ou bem graduada, cuja densidade está próxima da máxima (Bernucci *et al.* 2008).

Em função de especificações brasileiras, para caracterização dos agregados graúdos a serem usados nas misturas, foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento (DNIT ME 412/19), Índice de forma (NBR 7809/19), Abrasão *Los Angeles* (DNER ME 035/98), Durabilidade (DNER ME 089/94) e Adesividade (DNER ME 078/94).

Os procedimentos bem como andamento dos ensaios são ilustrados pela Figura 3.3.



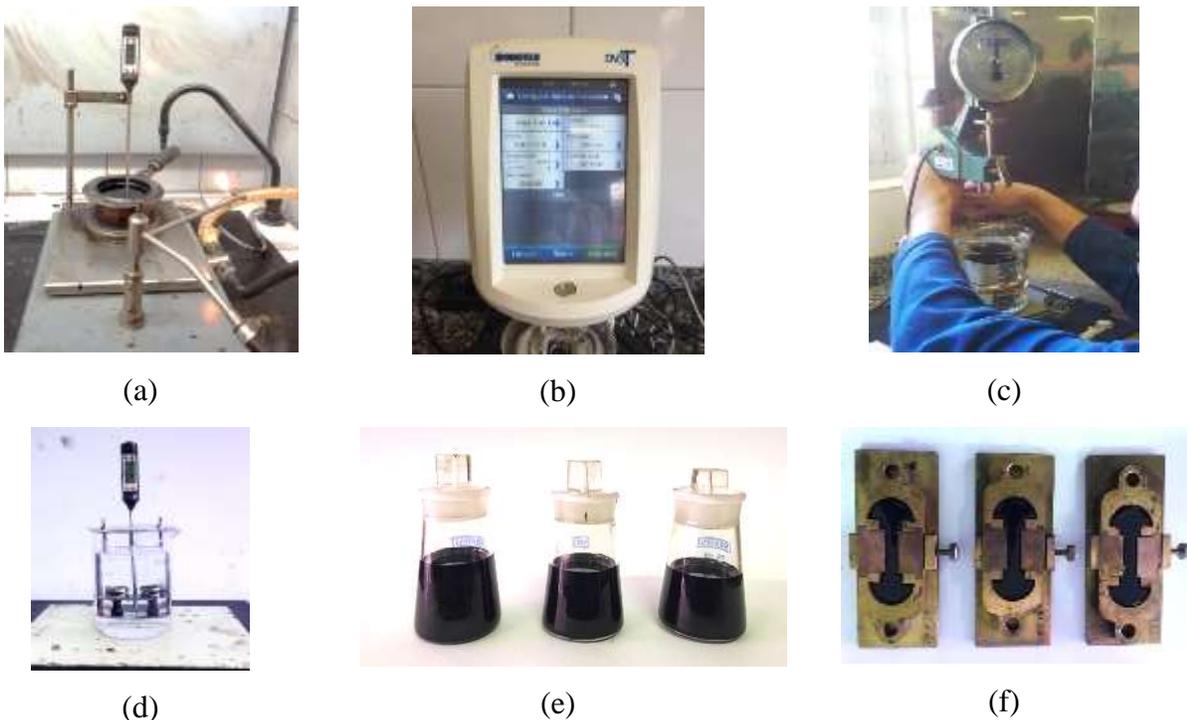
**Figura 3-3** Caracterização do agregado mineral (a) Peneiramento; (b) detalhe das frações granulométricas (c) Índice de forma; (d) Abrasão Los Angeles; (e) Durabilidade; (f) Adesividade (Autor 2020).

Quanto aos agregados miúdos estes foram submetidos aos ensaios de granulometria por peneiramento (DNIT ME 412/19), descrito no item acima, e densidade específica, relativa e absorção (DNIT ME 411/19).

### 3.2.2 Caracterização dos ligantes asfálticos

Na dosagem dos corpos de prova foi utilizado como ligante asfáltico o CAP 50-70 fornecido pela Centro Oeste Asfaltos, empresa sediada no Distrito Federal, onde em primeira instância foram realizados ensaios de caracterização do ligante.

Os ensaios realizados foram respectivamente, ponto de fulgor (ABNT NBR 1341/15), viscosidade rotacional (ASTM D 4402/15), penetração (DNIT-ME 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT ME 131/10), densidade (DNER ME 193/96), ductilidade (DNER ME 163/98), e recuperação elástica (DNIT ME 130/10). A Figura 3.4 mostra as realização destes ensaios.



**Figura 3-4** Caracterização do ligante asfáltico (a) ponto de fulgor; (b) viscosidade; (c) penetração; (d) ponto de amolecimento; (e) densidade; (f) recuperação elástica e ductilidade (Autor 2020)..

Além dos ensaios de caracterização realizados no ligante asfáltico virgem, o CAP 50-70 foi submetido ao ensaio *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), no intuito e prever a perda de massa

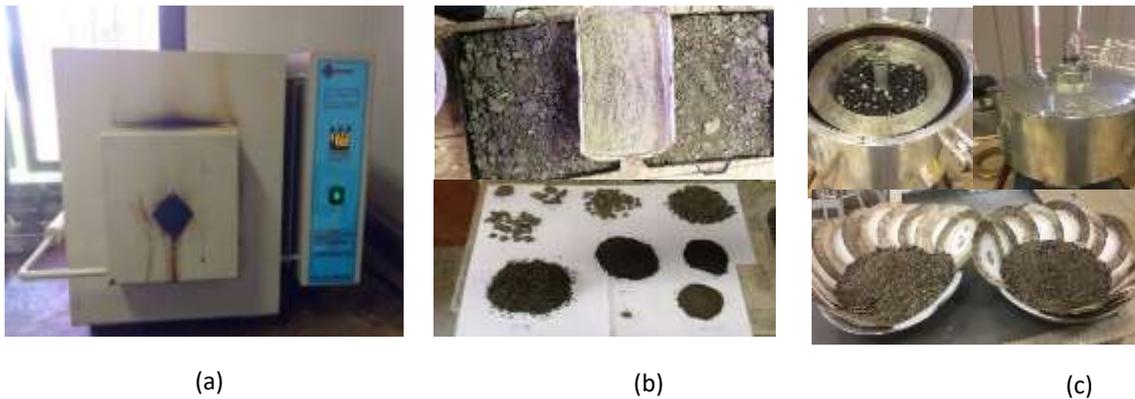
quando submetido ao envelhecimento a curto prazo.

### 3.2.3 Caracterização do RAP

A caracterização do RAP se deu por meio de três etapas, abrangendo a caracterização do material em estado natural, caracterização do agregado remanescente e do ligante oxidado.

Os agregados que compõem o material fresado, aqui denominado RAP, são de origem da rocha tipo micaxisto, material de grande abundância e disponibilidade na região de Goiás onde foi realizado o desbaste da camada de rolamento.

A Figura 3.5 mostra como se deu o processo de obtenção e caracterização do agregado do RAP, onde foi realizado um destorroamento do material, determinação do teor de ligante no material por meio da metodologia de queima por ignição em forno mufla (ASTM D 6307/05). para posterior retirada do ligante residual no agregado pelo método do extrator rotarex (ABNT NBR 16208/13).

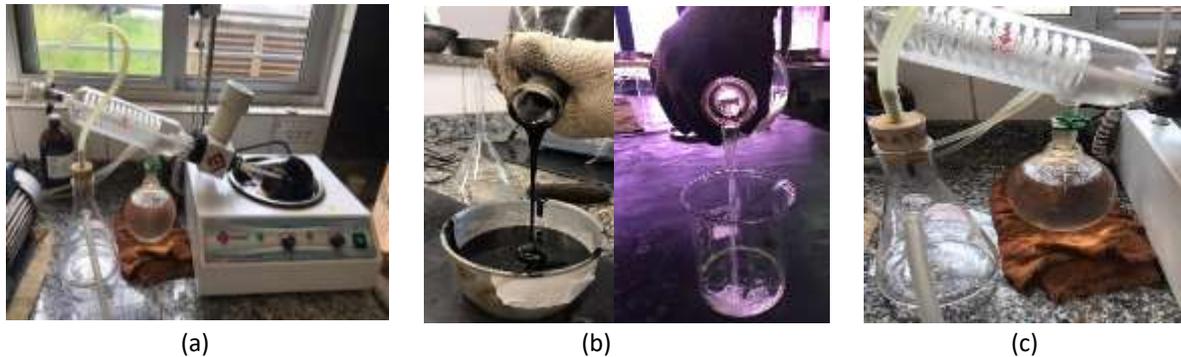


**Figura 3-5** Processo de obtenção e caracterização do agregado fresado; (a) mufla; (b) destorroamento; (c) rotarex (Autor 2020).

Para extração foi utilizado como solvente o tricloroetileno, onde após extraído o ligante residual do RAP, foram obtidos os agregados e realizados os ensaios de granulometria por peneiramento (DNIT ME 412/18), índice de forma (NBR 7809/19), e abrasão mediante o método de desgaste por impacto devido ao choque no aparelho trenton (DNER ME 399/99), fato este devido a material fresado ser de fração fina e não se enquadrar nos grupos estabelecidos na norma de desgaste por abrasão *Los Angeles*. É importante ressaltar que a granulometria por peneiramento foi feita para duas condições: RAP com o CAP oxidado e para o fresado sem o CAP.

O processo de extração do ligante do RAP foi realizado de duas formas: pelo método de

ensaio rotarex e por queima na mufla. Para obtenção e caracterização do ligante oxidado, foi realizada a extração por centrifugação pelo método rotarex (NBR 16208/13), e posteriormente a solução foi filtrada e submetida ao processo de rotaevaporação (ASTM D 5404/17), para completa extração do tricloroetileno (solvente) e obtenção do CAP envelhecido, conforme mostrado na Figura 3.6.



**Figura 3-6** Procedimento de rotaevaporação da solução tricloroetileno e CAP oxidado (Autor 2020).

Assim, após extraído o ligante oxidado, o mesmo foi caracterizado em função dos ensaios de ponto de fulgor (ABNT NBR 1341/15), viscosidade rotacional (ASTM D 4402/15), penetração (DNIT-ME 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT ME 131/10), densidade (DNER ME 193/96), ductilidade (DNER ME 163/98), e recuperação elástica (DNIT ME 130/10).

Quanto ao agente rejuvenescedor, o mesmo foi caracterizado de acordo com especificação fabricante seguindo prescrições da DNC nº 04/97, cujos ensaios realizados foram ponto de fulgor (NBR 11341), densidade (NBR 6296) e viscosidade (ASTM D2171).

### 3.3 DOSAGEM DAS MISTURAS RECICLADAS

A dosagem das misturas foi realizada baseada na metodologia Superpave, cujo processo de compactação das misturas estudadas se deu por meio do compactador giratório TROXLER Modelo 5850 do INFRALAB-UnB, e pelo compactador do LabAsfalto -UFG modelo IPC – Servopac, ambos ilustrados na Figura 3.7.

Os compactadores giratórios utilizados foram configurados e calibrados de acordo com manual do fabricante e em atendimento à especificação (DNIT PRO 178/2018) com seguintes parâmetros: rotação de  $30 \pm 0,5$  rpm, ângulo de giro externo de  $1,25 \pm 2^\circ$ , interno de  $1,16^\circ$ , e pressão vertical aplicada em condicionamento dos giros de 0,6 Mpa, sendo que no compactador

TROXLER o atuador que aplica a pressão age na base e no IPC no topo.



**Figura 3-7** Compactadores giratórios Superpave. (a) TROXLER-UnB; (b) IPC-UFG (Autor 2020).

A presente pesquisa trabalhou com três tipos de misturas, estando todas elas com incorporação de RAP. Sendo:

- a) Mistura 1: 100% de RAP e incorporação de agente rejuvenescedor, aqui chamada de MAR-R100;
- b) Mistura 2: 45% de RAP e 55% de materiais novos (agregados, ligante CAP 50-70 e agente rejuvenescedor), nomeada MAR-R45;
- c) Mistura 3: chamada de MAR-R25, contendo 25% de RAP e 75% de materiais novos (agregados, ligante CAP 50-70 e rejuvenescedor).

Assim buscou-se utilizar nessa pesquisa os percentuais de 25, 45 e 100% de RAP, com inserção de 20% de agente rejuvenescedor em relação ao teor de CAP oxidado presente no material fresado, e em função do percentual de material fresado na mistura. Percentual esse de AR, adotado de acordo com Silva (2018), que em suas análises realizadas para o mesmo tipo de material, constatou resultados melhores para um percentual de 20% de AR, cujo rejuvenescedor utilizado trata de um AR-% conhecido comercialmente com CYCLOPAV 100.

A mistura contendo 100% de RAP por já conter uma certa proporcionalidade de ligante não necessitou de encontrar o teor ótimo por meio de estudo de dosagem. Desta forma, foi realizada apenas a inserção de agente rejuvenescedor em função da percentagem de betume

existente no RAP, percentual este equivalente a 20% do teor ótimo de ligante presente na mistura. Para misturas com 100% de RAP esse teor, corresponde ao teor residual.

Quanto as misturas com 45% e 25% de RAP, também foi incorporado um percentual de 20% de rejuvenescedor em relação ao teor de ligante oxidado presente no material, e assim foram feitas as correções granulométricas mediante a metodologia FAD e BAILEY com agregado convencional.

Na definição do teor ótimo das misturas, foi definido um teor de 4,6% de ligante para misturas com 45% de RAP e 4,9% para misturas com 25% de RAP, os quais os demais teores testados variaram segundo a recomendação Superpave que preconiza variações de teores em  $T\% \pm 0,5$  e  $T\% + 1,0$ , em razão de um percentual de 4% de vazios inicial respectivamente.

Na definição do teor ótimo foram produzidos 4 corpos de prova para cada teor analisado, utilizando-se o compactador IPC-SERVOPAC (UFG), compactados em moldes de 100mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, que podem ser vistos na Figura 3.8.



(a)



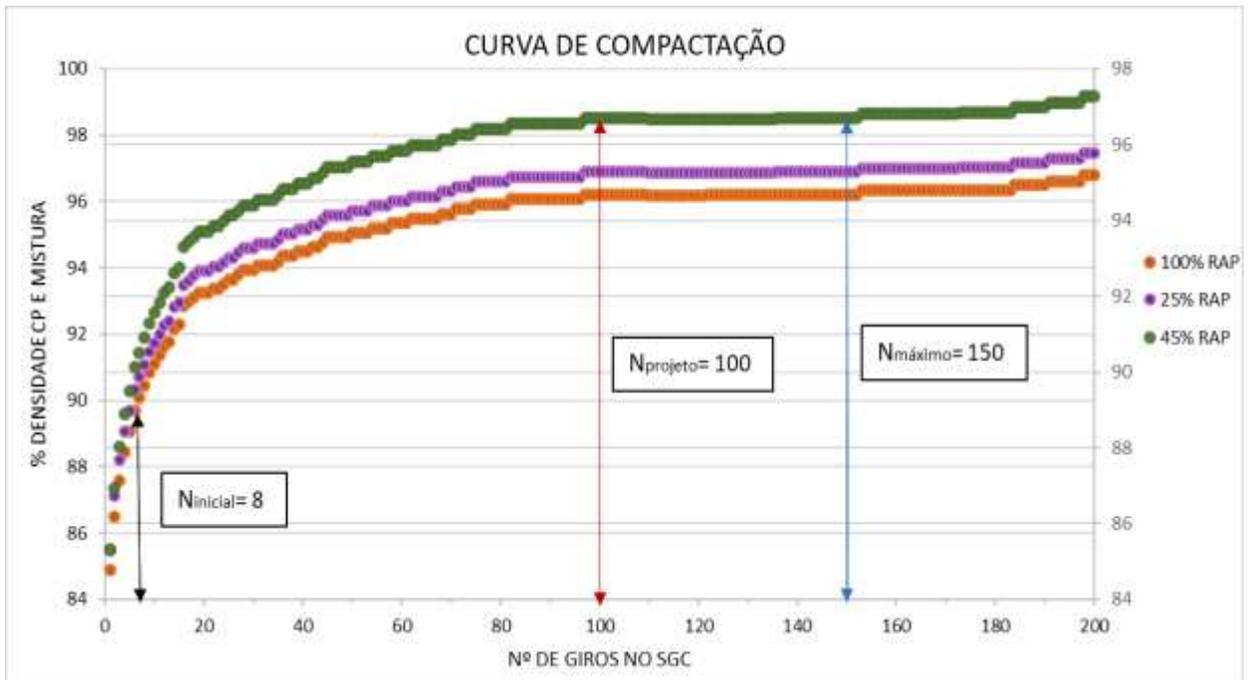
(b)

**Figura 3-8** Corpos de prova produzidos pela metodologia Superpave, 100 mm de diâmetro, compactador giratório (Autor 2020).

Após produção dos corpos de prova, foi realizada aferição dos parâmetros volumétricos dos mesmos, a fim de verificar a acurácia do volume de vazios presumido, sendo o processo realizado segundo a AASHTO T166 para a determinação da densidade aparente.

Ainda no processo de compactação, porém após a determinação do teor ótimo de ligante, foi feita realização de plotagem do gráfico da curva de compactação dos corpos de prova, cuja porcentagem(%) de compactação está relacionada com a densidade aparente do corpo de prova a cada giro, e com a densidade máxima medida da mistura. Tudo isso foi realizado no intuito de averiguar se a porcentagem de compactação de  $N_{projeto}$  seria menor que 98% em relação ao  $N_{máximo}$ ,

o que é preconizado pela metodologia Superpave, como mostrado na Figura 3.9.

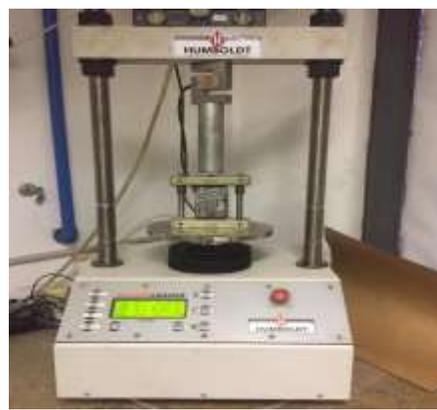


**Figura 3-9** Curva de compactação dos CP's em função da densidade e N° giros (Autor 2020).

Findada esta etapa, e sendo ela favorável, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência a tração na prensa Marshall, para posterior determinação da densidade máxima medida (*Rice Test*) método ASTM D2041, para os corpos de prova produzidos, conforme pode ser visto na Figura 3.9.



(a)



(b)

**Figura 3-10** Densidade das misturas (a) Rice Test das misturas dosadas; (b) Resistência a tração (Autor 2020).

### 3.4 MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS

A Tabela 3.1 representa a composição de cada uma das misturas recicladas produzidas neste trabalho, sendo adotadas as siglas, MAR-R100, MAR-R45 e MAR-R25.

**Tabela 3-1** Composição das misturas asfálticas recicladas produzidas.

Sigla da mistura	RAP (%)	Percentual de material em 100% de massa do CP		
		Agregado virgem Micaxisto (%)	Teor de AR-5 (%)	Teor de CAP 50/70 (%)
MAR-R100	100	0	20	0
MAR-R45	45	55	20	4,6
MAR-R25	25	75	20	4,9

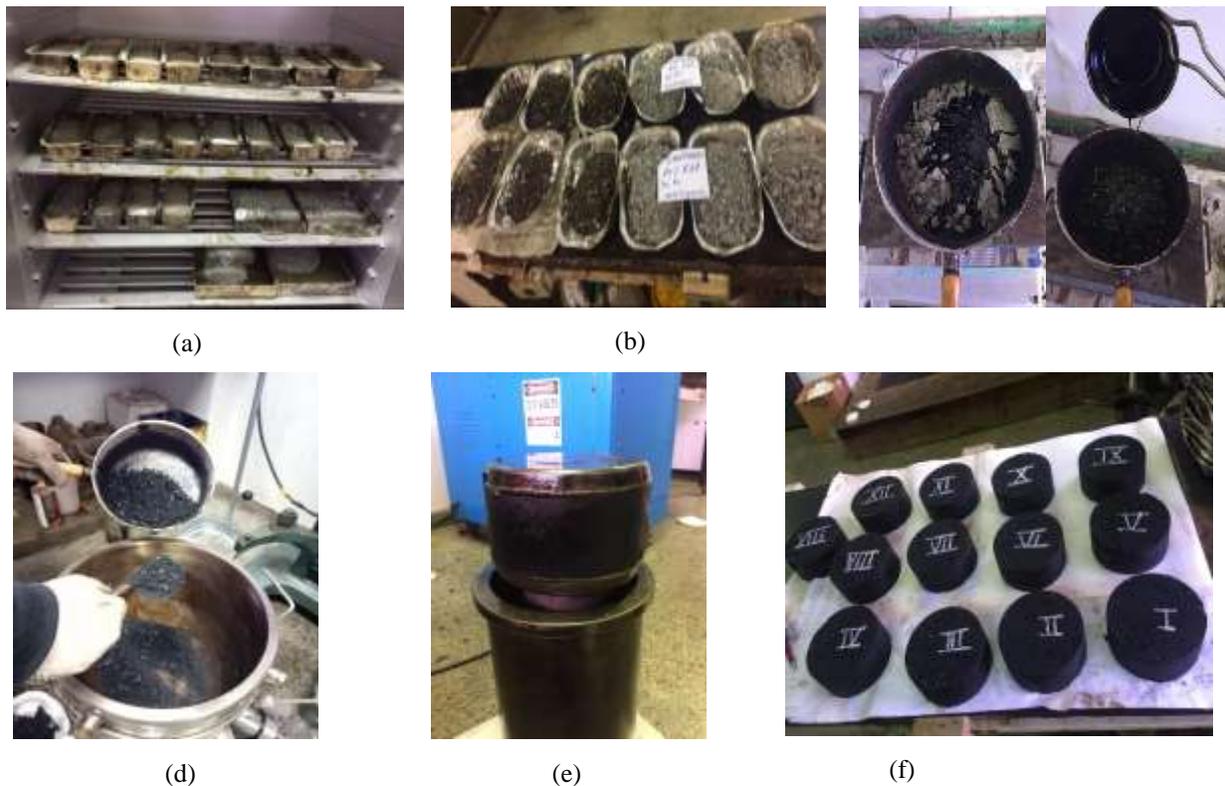
É importante ressaltar que a porcentagem de 20% de agente rejuvenescedor adicionada à mistura foi sempre calculado em função da porcentagem de ligante asfáltico residual presente no RAP.

As temperaturas de mistura e compactação seguiram as recomendações bibliográficas, além de especificações de fabricantes de ligante asfáltico e de rejuvenescedores que compuseram a mistura, onde estes sempre enfatizam necessidade de se ter um cuidado maior na relação temperatura e viscosidade do material.

Assim, durante a campanha experimental utilizando ligante tipo CAP 50-70 e rejuvenescedor AR-5 Cyclopav 100, as temperaturas para mistura variaram entre 140 e 150°C para o ligante asfáltico, 110 e 120°C para o rejuvenescedor, e na compactação, a temperatura da mistura variou entre 150 e 160°C.

Deste modo para dosagem das misturas foi realizada de forma separada, cujas misturas com percentuais de incorporação em 25 e 45% foi-se realizado primeiramente a usinagem das misturas com materiais virgens (agregados e ligante), temperatura do ligante em 150 °C, temperatura do agregado virgem 160 °C e temperatura de mistura 160 °C. Para posterior usinagem com RAP, o AR foi aquecido a 120°C o RAP a 140°C e a usinagem em si foi realizada a 150°C. Assim foi realizada a homogeneização dos dois materiais em misturador aquecido na temperatura de usinagem superior, e esta seguiu critério estabelecido na dosagem superpave de envelhecimento por duas horas, cuja temperatura adotada na compactação foi de 160 °C. Quanto a usinagem apenas com RAP, o AR foi aquecido a 120°C o RAP a 140°C e a usinagem em si e o processo de

compactação foi realizado a temperatura de 150°C, como mostrado na Figura 3.11.



**Figura 3-11** Usinagem e compactação das misturas recicladas (a) material em estufa; (b) frações; (c) usinagem; (d) homogeneização; (e) compactação; (f) CP's moldados (Autor 2020).

Assim, os corpos de prova cilíndricos foram dosados mediante a metodologia Superpave e compactados no equipamento giratório, sendo que ao final do processo de compactação, foi possível presumir o percentual de compactação da massa em função do número e giros adotado em projeto, sendo esse N alto, destinado a tráfego elevado, conforme mostra Figura 3.11.

### 3.5 COMPACTAÇÃO DOS CORPO DE PROVA PRISMÁTICOS

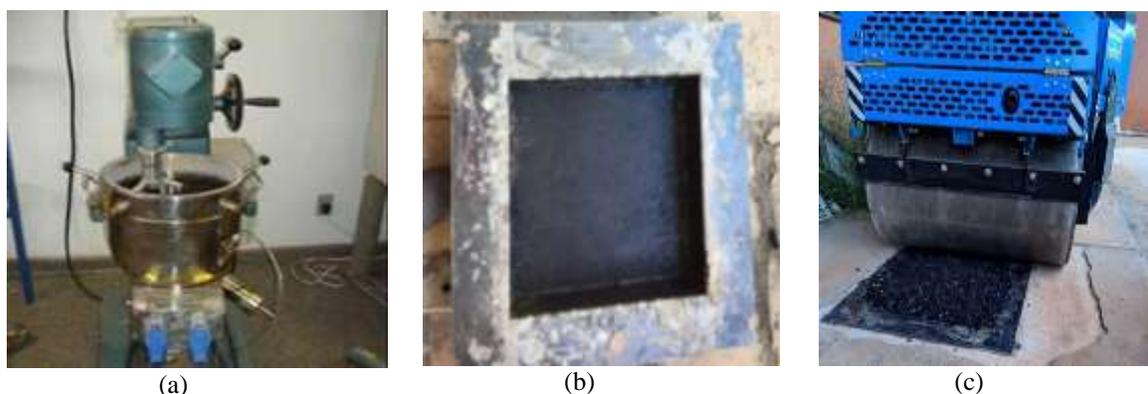
Além da compactação por meio do compactador giratório Superpave para obtenção dos corpos de prova cilíndricos, também foram realizadas compactações das mesmas misturas asfálticas MAR-R100, MAR-R45 e MAR-R25 em formato de placas para posterior corte, de modo a obter corpos de prova prismáticos. Esse processo de compactação foi realizado por meio de rolo compactador mecânico da WEBER MT modelo RCW 900, conforme ilustra a Figura 3.12.



**Figura 3-12** Rolo compactador mecânico da WEBER MT modelo RCW 900 (Autor 2020).

O processo para concepção das placas para se obter os corpos de provas prismáticos, foi realizado após definida a curva granulométrica de trabalho, bem como enquadramento da mesma na faixa C do DNIT, e realizadas as correções de acordo com a metodologia FAD e BAILEY do agregado virgem do tipo micaxisto, e definido o teor ótimo de ligante e de rejuvenescedor, ou seja, esse processo seguiu rigorosamente o mesmo procedimento adotado para produção das misturas em laboratório usando o compactador giratório, na confecção dos CP's cilíndricos.

A metodologia adotada para confecção das placas seguiu os mesmos procedimentos e observações e desenvolvidos por Nunes (2017), que também usou o mesmo equipamento e aparato disponível no INFRALAB-UnB, ou seja, misturador mecânico o molde metálico para placas e rolo compactador, mostrados na Figura 3.13.



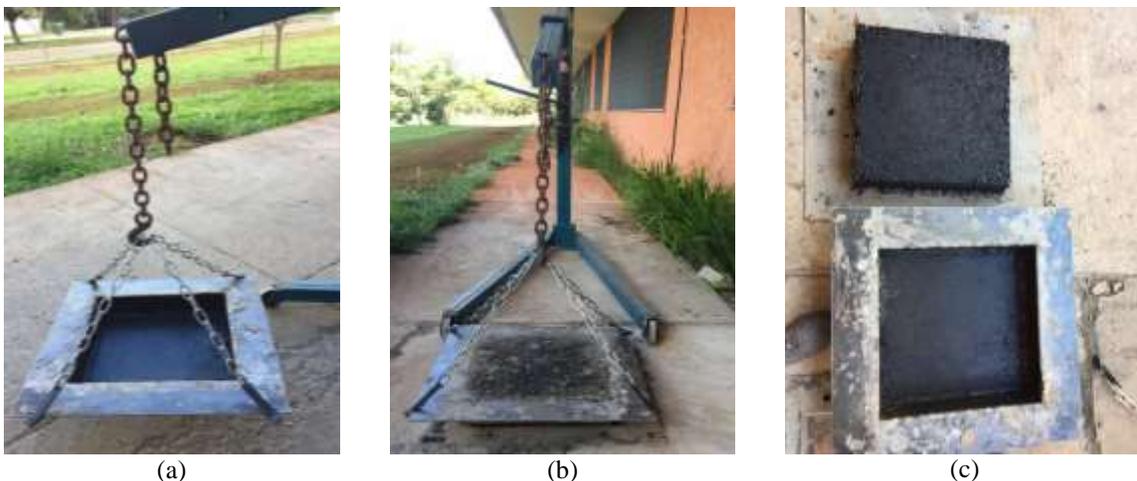
**Figura 3-13** Processo de compactação das amostras em placas (a) misturador mecânico; (b) molde metálico; (c) compactador rolo chapa (Autor 2020).

O molde metálico utilizado é do tipo retangular de dimensões 440 x 450 x 100 mm, que é acoplado em um outro molde fixo no piso de concreto de cimento Portland, localizado na área externa do INFRALAB, ficando este em mesmo nível do piso, e a compactação foi realizada por meio do rolo compactador mecânico.

Para garantia do controle de temperatura, o molde metálico permaneceu em estufa por 4 horas com temperatura de 30° acima da temperatura de compactação, uma vez que por se tratar de uma área externa há grande perda de temperatura no processo de compactação, sendo a mesma aferida nos momentos de passadas do rolo compactador, por meio de um termômetro digital do tipo pistola à laser marca OEM com faixa de leitura de -50 °C a 380 °C / -58 °F a 716 °F , e precisão de 0,1 °C/ °F.

O controle do grau de compactação foi presumido em função do número de passadas e ou passadas do rolo compactador tipo chapa utilizado, sendo esse número de passadas calculado em função da geometria e peso do tambor, buscando assim equiparar aos mesmos critérios de pressão que se tem no CGS e número de giros para moldagem dos corpos de clíndrico, tendo como aparato um grau de compactação acima de 95%.

Após o processo de compactação, o conjunto placa compactada e molde foi retirado do suporte fixo por meio de uma girafa mecânica, que içava o molde e a mistura com correntes acopladas no molde, como ilustra Figura 3.14.



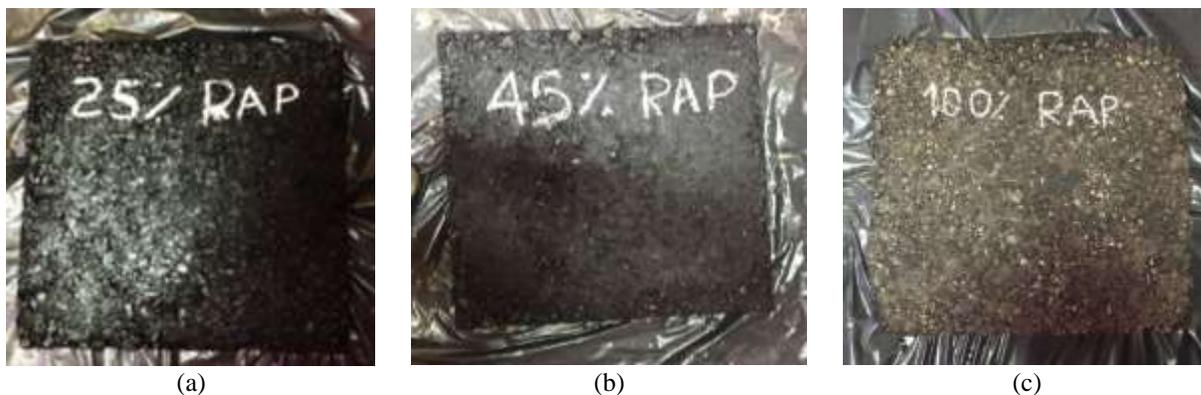
**Figura 3-14** Protótipo para confecção e desmolde das placas (a) Conjunto de molde metálico e girafa mecânica com aparatos para içagem; (b) conjunto molde, girafa e aparatos; (c) detalhe da placa desmoldada (Autor 2020).

Após retirado, o conjunto ficava resfriando por no mínimo 12 horas, em local nivelado sob influência de temperatura ambiente para então as placas serem desmoldadas. É importante ressaltar

que foi seguido na íntegra as observações de Nunes (2017), que sugere uma maneira mais fácil de realizar a desmoldagem das placas, por meio da aplicação de um procedimento desmoldante antes do processo de compactação.

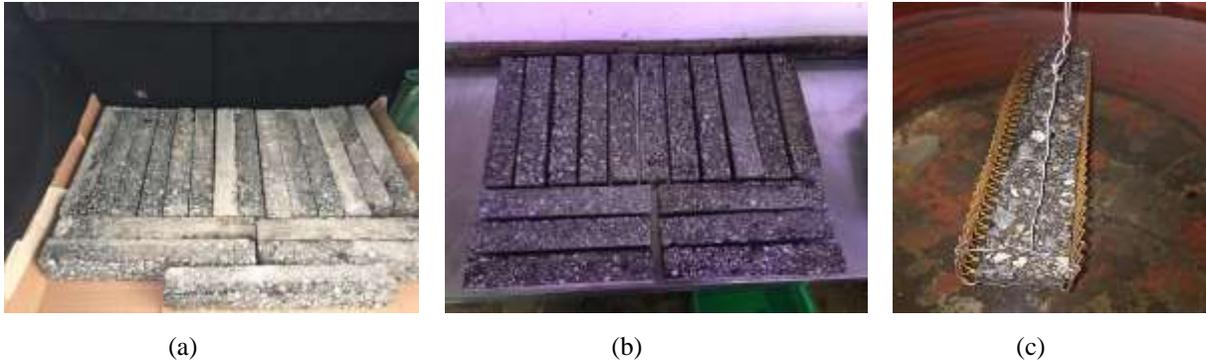
O desmoldante utilizado baseou-se no óleo mineral lubrificante 20W50 da marca LUBRAX, por ter um alta viscosidade em elevadas temperaturas (a 100 °C corresponde a uma viscosidade de 50 poise) o lubrificante derivado de petróleo não ocasiona nenhuma alteração quanto as propriedades químicas e mecânicas da mistura e proporciona uma completa desmoldagem, facilitando assim a retirada da placa após resfriamento.

Passado esse período, a placa era devidamente identificada para posterior corte e extração dos corpos de prova prismáticos, envolvidas em plástico filme e acomodadas em local com temperatura a 25°C, como mostra a Figura 3.15.



**Figura 3-15** Placas produzidas pela compactação com rolo chapa, nas proporções de 25%,45% e 100% de RAP (Autor 2020).

Após acomodação, as placas foram levadas ao processo de corte linear para confecção dos corpos de provas prismáticos tipo vigas, onde de acordo com especificação da norma AASHTO T321/07, as dimensões das vigas finais foram de 50mm de altura, 63mm de largura e 380 mm de comprimento, conforme Figura 3.16. Dimensões essas padrão para realizar ensaios nas vigas de concreto asfáltico.



**Figura 3-16** Vigas prismáticas produzidas (a) CP's prismáticos após processo de corte; (b) CP's após volumetria; (c) CP em imersão (Autor 2020).

Em função do processo de compactação ter sido realizado com o rolo compactador, onde não se tinha controle exato da energia de compactação que era realizada pelo equipamento dado um número de fechas, e por buscar representar de maneira mais concisa possível o que ocorre no laboratório, foram feitos os cálculos de energia de compactação em função da geometria e peso próprio do tambor conforme mencionado anteriormente, e para aferição do grau de compactação foi atestado os requisitos volumétricos das vigas após o processo de corte e laminagem, conforme mostrado na Figura 3.16. Cujos resultados foram favoráveis ao que fora compactado no CGS.

### 3.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos têm por finalidade verificar o desempenho das misturas produzidas em laboratório de forma a simular a situação existente em campo. O tratamento e compilação dos dados obtidos a partir dos ensaios em laboratório, são de extrema importância, uma vez que a partir dos mesmos que serão feitas as designações de desempenho da mistura.

Assim, é importante que esses dados sejam devidamente avaliados e comparados em triplice amostragem na execução dos ensaios de laboratório. Os ensaios mecânicos realizados na presente pesquisa buscaram avaliar parâmetros recorrentes ao comportamento das misturas dados parâmetros funcionais e operacionais, descritos na Tabela 3.2.

**Tabela 3-2** Ensaios mecânicos realizados e normativas.

<b>Ensaios mecânicos</b>	<b>Normativa de ensaio</b>
Resistência à tração por compressão diametral (RT)	DNIT-ME 136/17
Dano por umidade induzida	DNIT-ME 180/18
Desgaste cântabro	ABNT NBR 15140/14
Módulo de resiliência (MR)	DNIT-ME 135/18
Módulo Dinâmico (MD)	EN 12967-26
Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	DNIT-ME 183/18

Cada normativa em si dentro do método de ensaio que preconiza estabelece os parâmetros e procedimentos para execução dos ensaios e tratamento dos dados, cujos parâmetros estabelecidos por estas normativas se pautam no número de amostras necessárias para execução do ensaios e obtenção de dados concisos. Deste modo, a Tabela 3.3 mostra a quantidade de corpos de prova e/ou amostras utilizadas na execução da pesquisa.

**Tabela 3-3** Corpos de prova utilizados na pesquisa.

<b>Ensaios</b>	<b>Quantidade de corpos de prova por mistura</b>		
	<b>25% de RAP</b>	<b>45% de RAP</b>	<b>100% de RAP</b>
Resistência à tração por compressão diametral	3	3	3
Dano por umidade induzida **	9	9	9
Desgaste Cântabro	3	3	3
Módulo de resiliência	15	15	15
Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	15	15	15
Módulo dinâmico	15	15	15
Total por mistura	72	72	72
Total da pesquisa		216	

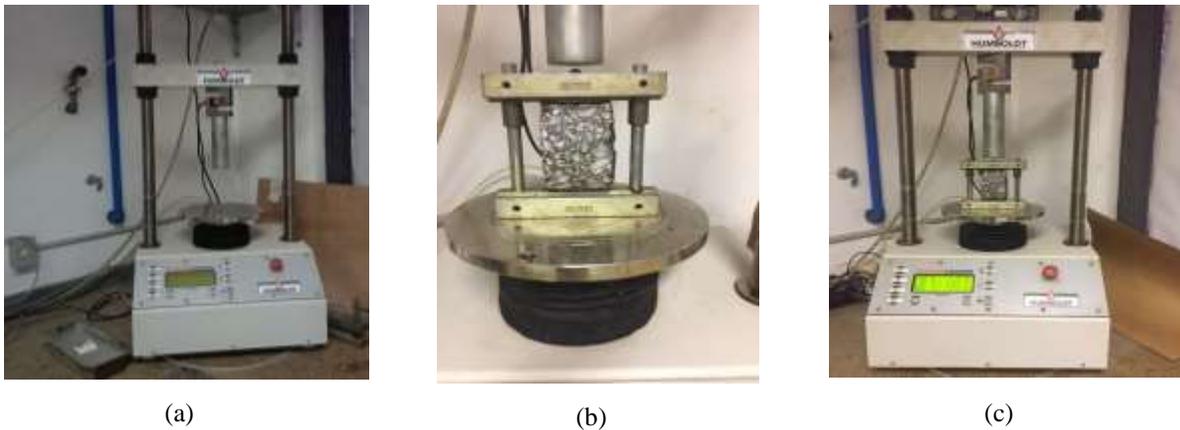
\*\* Baixa e alta severidade

### 3.6.1 Resistência a tração por compressão diametral

Preconizado pela normativa DNIT-ME 136/17, o ensaio tem por finalidade determinar a resistência à tração indireta de corpo de prova cilíndrico de mistura asfáltica, por meio da compressão diametral, aplicando um carregamento estático crescente até a ruptura do corpo de

prova.

O procedimento foi realizado no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária-Infralab da UnB, com execução no triaxial modelo/marca HUMBOLDT. Os corpos de prova ficaram em sala climatizada 25°C pelo período de 24h para que o ensaio pudesse ser iniciado. O ensaio ocorreu com funcionamento do triaxial onde este promove a elevação do prato a uma velocidade de 0,8mm/s e se finda com a ruptura do CP, conforme mostrado na Figura 3.17.



**Figura 3-17 Ensaio** de RT (a) Triaxial Humboldt; (b) Amostra no equipamento; (c) Ensaio em execução (Autor 2020).

A partir do momento em que se teve a ruptura do CP, foi então realizada a leitura do carregamento (F), e foram realizadas três medições para cada mistura. A resistência a tração foi obtida pela equação 3.6.1.

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (3.6.1)$$

Onde:

$\sigma_r$  = resistência a tração, em MPa;

F = carga de ruptura, em N;

D = média de quatro medidas de diâmetro do corpo de prova, em mm;

H = média de quatro medidas de altura do corpo de prova, em mm.

### 3.6.2 Determinação do dano por umidade Induzida

O ensaio de determinação do dano por umidade induzida em misturas asfálticas, é preconizado pela normativa DNIT ME 180/18, conhecido também como *Lottman* modificado e tem como objetivo verificar a sensibilidade à água de corpos de prova de misturas asfálticas, avaliando a adesividade agregado-ligante e a coesão da mistura em condições de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água. O dano por umidade induzida é então obtido pela relação entre a resistência à tração das amostras condicionadas e a resistência à tração das amostras em condições normais.

O processo de condicionamento pode ser realizado de duas maneiras, podendo ser de baixa e alta severidade, sendo adotado como critério de ensaio que os CP's apresentem um volume de vazios de +/- 7%, e seguindo as mesmas dimensões geométricas estabelecidas no RT, diâmetro de 100mm e altura variando de 50 até 70mm, e um número de 6 CP's por mistura analisada. Na presente pesquisa, o ensaio foi realizado com corpos de prova cuja altura era de 63,5mm, diâmetro de 100mm, e volume de vazios estabelecido por norma.

Foi adotado na pesquisa análise para os dois tipos de condicionamento:

- a) a opção por baixa severidade, pautada na representatividade da situação existente na região,
- b) alta severidade: foi realizada para fins de comparação e também para agregar informações ao banco de dados da pesquisa.

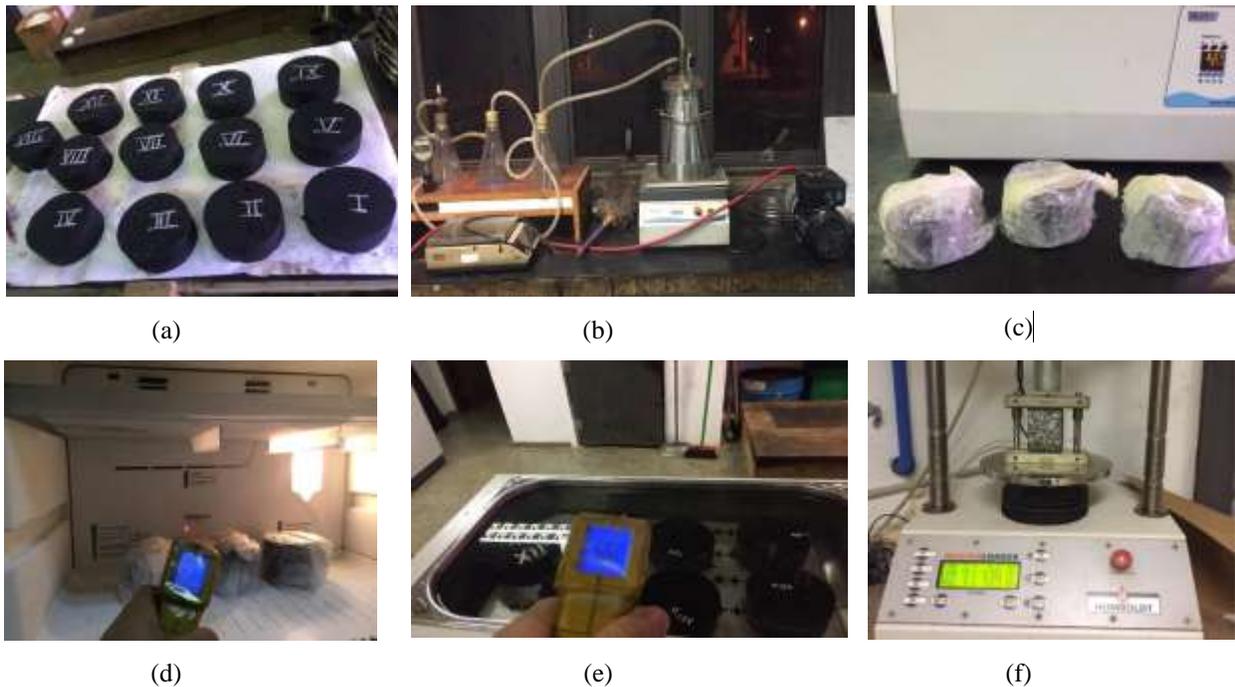
O ensaio iniciou-se com o cálculo da percentagem de vazios preenchido com ar dos CP's, posteriormente foi-se estabelecido o cálculo do volume de vazios da amostra e assim escolhidos 3 CP's dos 6 para passar pelo condicionamento.

O condicionamento em alta severidade se deu com submersão do CP em água e posterior aplicação de vácuo na faixa de 13 a 67 Kpa por 5 a 10 minutos. Decorrido o tempo, foi retirado o excesso de umidade da amostra com pano umedecido e calculado o volume de água absorvida e obtido percentual de saturação. Como o percentual de saturação enquadrou entre 55 a 80%, seguiu-se com o condicionamento realizando o embalamento do CP em filme plástico e colocando o mesmo em saco plástico com 10ml de água e este foi levado para o congelamento em temperatura de -18°C por 16h.

Decorrido o período de congelamento, o conjunto foi levado para banho maria a 60°C por 24h e depois foi colocado em outro banho maria a 25°C por mais 3 horas, onde findado este condicionamento, os CP's foram levados à prensa para determinação da resistência a tração por

compreensão diametral, juntamente com os outros 3 CP's restantes conforme descrito no item 3.6.

O processo de condicionamento a baixa severidade seguiu os mesmos parâmetros do condicionamento de alta severidade, entretanto a fase de congelamento foi suprimida. As etapas do ensaio realizado é mostrado na Figura 3.18.



**Figura 3-18** Ensaio de DUI (a) CP's para ensaio; (b) CP's em saturação a vácuo; (c) CP's em embalados com 10 ml de água; (d) CP's fase de congelamento; (e) CP's em banho 60 °C; (f) CP em ensaio de RT (Autor 2020).

A determinação do dano por umidade induzida foi dado pela razão entre a resistência a tração das amostras condicionadas pelas não condicionadas, multiplicado por 100, conforme equação 3.6.2.

$$RRT = \frac{RTc}{RT} \times 100\% \quad (3.6.2)$$

Onde:

RTc = média do RT dos três corpos de prova que sofreram condicionamento, em MPa;

RT = média do RT três corpos de prova que não sofreram condicionamento, em MPa.

### 3.6.3 Desgaste Cântabro- determinação da perda de massa por abrasão

O ensaio preconizado pela normativa ABNT NBR 15140/14, estabelece o percentual de desgaste e ou perda de massa de corpos de prova cilíndricos, devida abrasão cântabro. Realizado no laboratório de Infraestrutura Rodoviária da UnB-INFRALAB, no equipamento abrasão Los Angeles, o método estabelece o quantitativo de três corpos de prova para cada mistura avaliada, cujo procedimento de ensaio requer que os CP's estejam à temperatura de 25°C para execução do ensaio.

O ensaio, mostrado na Figura 3.19, ocorreu com a inserção de um corpo de prova por vez no tambor do equipamento, sem as esferas, sendo este tambor fechado e realizado um total de 300 revoluções, a uma velocidade de 30 rpm (a normativa estabelece um intervalo de 30 a 33 rpm).



**Figura 3-19** Ensaio de desgaste cântabro (a) Equipamento Los Angeles; (b) CP's antes do ensaio; (c) CP no tambor; (d) CP's 100% RAP após desgaste cântabro; (e) CP's 25% RAP após desgaste cântabro; (f) CP's 45% RAP após desgaste cântabro (Autor 2020).

A determinação do desgaste por abrasão se deu com a mensuração da massa do corpo de prova antes das revoluções, e após realização dos ensaios, cuja porcentagem de desgaste é obtida de acordo com a equação 3.6.3. É importante ressaltar que o resultado obtido é baseado na média aritmética dos 3 corpos de prova ensaiados para cada mistura.

$$A = \frac{m - m'}{m} * 100 \quad (3.6.3)$$

Onde:

A = porcentagem de perda de massa, sem condicionamento;

m = massa do corpo de prova antes de ser ensaiado, sem condicionamento, em g;

m' = massa do corpo de prova após ser ensaiado, em g.

### 3.6.4 Determinação Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é preconizado pela normativa DNIT ME 135/2018, cujo módulo determinado estabelece a relação entre a tensão horizontal gerada no CP em função de uma carga vertical cíclica aplicada, e da deformação horizontal desenvolvida pelo deslocamento horizontal resiliente, que é recuperável.

Para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas é necessário ter posse de dados oriundos da resistência a tração por compressão diametral das misturas avaliadas, devido ser adotado como parâmetro de entrada para cálculo do percentual de carregamento a ser aplicado no ensaio.

Assim, a normativa prescreve um percentual entre 5 e 25% da resistência a tração obtida, cujo valor adotado no ensaio, contempla a situação mais crítica, sendo utilizado carregamento com percentual de 25% do RT.

O ensaio foi realizado no laboratório de Infraestrutura Rodoviária da UnB-INFRALAB, em equipamento de carga cíclica, cujo carregamento aplicado na amostra é realizado diametralmente. O equipamento utilizado foi a prensa cíclica triaxial dinâmica modelo ELE *International*, que possui em seu domínio o software que realiza as análises prescritas nos padrões de determinação de módulo resiliente segundo a ASTM D 4123, conforme Figura 3.20.



(a)



(b)



(c)

**Figura 3-20** Ensaio de MR (a) Triaxial ELE International; (b) CP posicionado no equipamento; (c) ensaio em fase de execução (Autor 2020).

Deste modo, o MR obtido pelas interações matemáticas e apresentado na tela do software não remete aos calculados pelos padrões da norma brasileira. Assim, foi considerado como dado do ensaio apenas o deslocamento horizontal em mm, mensurado pelo LVDT, para então ser calculado individualmente o valor do MR tomando como base a prescrição da normativa DNIT ME 135/2018.

É importante ressaltar que todas as prescrições impostas no método, descritas na norma foram devidamente atendidas, com ciclo de carregamento em 0,1 segundos de pulso de carga e período de repouso em 0,9 segundos de período de repouso, à uma temperatura de 25°C +- 0,5°C.

Com o equilíbrio térmico do CP, o ensaio se deu com a aplicação de 50 ciclos de carregamento destinado ao condicionamento do corpo de prova, e 15 ciclos restantes destinados à mensuração dos deslocamentos, cujo os 5 últimos ciclos aplicados foram utilizados como dados para obtenção do MR, sendo este calculado a partir da Equação 3.6.4.

$$MR (MPa) = \frac{P}{|\Delta H| * t} * (0,2692 + 0,9976 * \mu) \quad (3.6.4)$$

Onde:

P = carga cíclica, em N;

$\Delta H$  = deslocamento horizontal (elástico ou resiliente), em mm;

t = média de quatro medidas da altura do corpo de prova, em mm;

$\mu$  = coeficiente de Poisson, adotado como 0,3 (ensaio da 25°C).

A normativa prescreve que a determinação do módulo resiliente seja efetuado no mínimo em 3 corpos de prova de cada mistura avaliada. Entretanto foi realizada a determinação em 15 CP's por mistura, dos quais 12 desses foram utilizados para determinação a vida de fadiga por compressão diametral tensão controlada, cujo valor do MR foi obtido em função da média dos 15 CP's analisados.

### **3.6.5 Determinação da fadiga por compressão diametral a tensão controlada**

Preconizado pela normativa DNIT-ME 183/2018, o ensaio visa determinar o comportamento das misturas asfálticas quanto à vida de fadiga, em função de um carregamento cíclico à tensão controlada (constante), por meio da compressão diametral do corpo de prova (tensão indireta). O carregamento é constante atuando como uma carga vertical aplicada

diametralmente no corpo de prova, desenvolvendo uma tensão horizontal que ocasiona na ruptura da amostra.

O ensaio foi realizado no INFRALAB, cujo equipamento utilizado foi o mesmo para o ensaio de módulo resiliente, a prensa cíclica triaxial dinâmica modelo ELE International, entretanto sem o uso de LVDT's.

As designações de tempo de carregamento e descarregamento seguem as mesmas impostas no MR, cujo carregamento é composto por um período de 0,1 segundos de carga aplicada em pulsos, e descarregamento de 0,9 segundos, a frequência de 1 Hz, ou seja 60 ciclos por minuto, e temperatura de ensaio a 25°C.

Para realização do ensaio foram selecionados 15 corpos de prova por mistura, onde 12 amostras foram testadas. Foram definidos 4 níveis de tensão para análise, variando em um percentual de 5 a 40% do RT em kPa, respectivamente 200, 300, 400 e 500 kPa para cada uma das misturas avaliadas

A escolha dos níveis de tensão enquadra-se nos percentuais estipulados pela norma, entretanto, foi necessária aplicação de percentual maior que 500kPa na amostra para representar os 40% do RT e considerar a situação mais crítica. É importante mencionar que o equipamento utilizado na determinação da vida de fadiga chegava no nível máximo de aplicação de tensão o equivalente a 560 kPa. A carga aplicada (F) para gerar essas tensões é dada pela equação 3.6.5.

$$F (kN) = \frac{\pi * D * H}{2} * \sigma_t \quad (3.6.5)$$

Onde:

D = média de quatro medidas de diâmetro do corpo de prova, em metros;

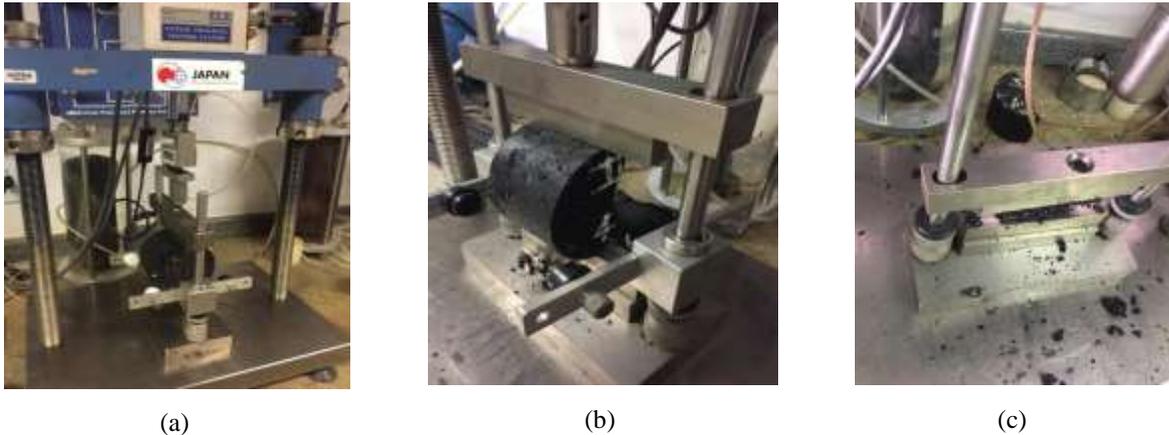
H = média de quatro medidas de altura do corpo de prova, em metros;

$\sigma_t$  = tensão aplicada no ensaio, em kPa.

A norma descreve que deve ser mensurado e obtido o MR dos CP's das devidas misturas na etapa inicial do ensaio de determinação da vida de fadiga. Contudo, devido a prensa utilizada não permitir essa etapa de pré-condicionamento com MR, a única maneira de executar o ensaio foi adotar como dados de entrada no início do ensaio, o valor do MR encontrado no ensaio próprio para determinação do módulo de resiliência em misturas asfálticas abordado no item 3.1.4.

Após iniciado o condicionamento do corpo de prova, o ensaio foi considerado finalizado

somente com a completa ruptura da amostra. A determinação da vida de fadiga se deu em função do número de ciclos que o CP resistiu até atingir a ruptura (N), sendo este definido pelo volume de tráfego, dado o eixo padrão, e resistência do revestimento ao trincamento. O ensaio é mostrado na Figura 3.21.



**Figura 3-21** Ensaio de fadiga por compressão diametral (a) Equipamento ELE International; (b) CP após ruptura por fadiga; (c) CP rompido (Autor 2020).

O resultado foi determinado por meio da plotagem de gráficos logarítmicos, cujas análises foram da vida de fadiga *versus* diferença de tensões ( $N \times \Delta\sigma$ ), e vida de fadiga *versus* deformação específica resiliente ( $N \times \varepsilon_r$ ). Os parâmetros  $\Delta\sigma$  (diferença entre a tensão horizontal e a tensão vertical), e  $\varepsilon_r$  foram calculados de acordo com as equações 3.6.6 e 3.6.7.

$$\Delta\sigma \text{ (kPa)} = \frac{2 * F \text{ (kN)}}{\pi * D \text{ (m)} * H \text{ (m)}} \quad (3.6.6)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_t \text{ (kPa)}}{MR \text{ (kPa)}} \quad (3.6.7)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em kPa.

### 3.6.6 Determinação do módulo dinâmico

Prescrito pela normativa DNIT- ME 416/2019, o método de ensaio estabelece as diretrizes quanto a determinação do módulo complexo (relação entre a tensão e a deformação) em materiais

cujo comportamento é viscoelástico linear, e do módulo dinâmico que trata do valor absoluto do módulo complexo, cujo cálculo é realizado pela razão entre a amplitude de tensão (pico a pico) e a amplitude de deformação axial (pico a pico), para um material sob o carregamento de compressão do tipo senoidal (haversine).

Contudo, para a presente pesquisa foi adotado para determinação do módulo dinâmico em misturas asfálticas as etapas prescritas na normativa europeia EN 12967-26. Essa metodologia também foi utilizada por Nunes (2017), uma vez que o equipamento que realiza o presente ensaio é o mesmo que realiza o ensaio de fadiga por flexão em 4 pontos, ou 4PB por deformação controlada em amostras prismáticas, e que se encontra disponível no laboratório de Infraestrutura Rodoviária da UnB- INFRALAB.

O equipamento utilizado para execução do ensaio e determinação do módulo foi a prensa pneumática de fadiga em viga por flexão a quatro pontos, ou 4PB, da marca IPC Global, cujo aparato atende perfeitamente os requisitos estabelecidos na normativa EN 12967-26.

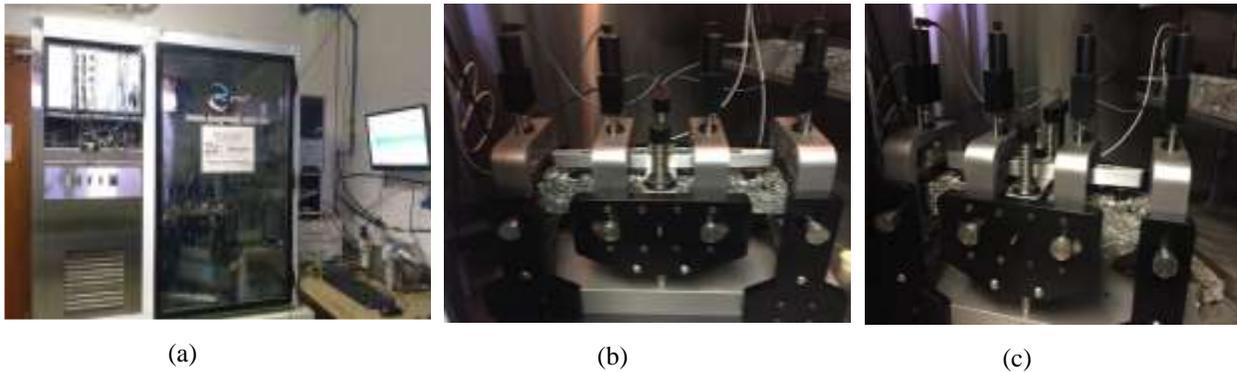
O equipamento trabalha com dois *softwares*, UTS015 e UTS018. Entretanto, para ensaios de módulo dinâmico e ângulo de fase das misturas asfálticas foi utilizado o *software* UTS018, cujo *software* configura as especificações das normas europeias para ensaios de módulo dinâmico EN 12967-26, e também de fadiga EN 12967-24.

Para determinação do módulo foi feita uma varredura de frequência com valor da deformação e número de ciclos, por meio de um pré-teste configurado no início do ensaio que não ocasiona um dano prematuro do CP, ou seja, antes de entrar no ensaio de fadiga o mesmo é encerrado.

Assim, para obtenção do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e determinação do ângulo de fase ( $\varphi$ ) foram realizadas varreduras em três amostras diferentes para cada temperatura e para cada mistura específica analisada. As frequências das varreduras realizadas foram respectivamente 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 25 Hz e temperaturas de 5, 15, 25 e 35°C, com deformação aplicada às amostras de 50 $\mu\epsilon$  afim de se evitar o dano prematuro com modo de pulso senoidal e realizadas 200 repetições por ciclo de carregamento, conforme prescrito na normativa.

A normativa brasileira recomenda que para misturas rígidas sejam realizadas varreduras à uma temperatura de 54°C, entretanto, foram realizadas algumas tentativas, porém os resultados não foram satisfatórios devido à dificuldade de leitura das frequências e da deformação acelerada do CP antes mesmo de ser ensaiado. A Figura 3.22 mostra o equipamento utilizado e o ensaio em

execução.



**Figura 3-22** Ensaio de MD em vigas prismáticas (a) Equipamento IPC global (fadiga por flexão a 4 pontos); (b) CP posicionado no equipamento com LVTD's; (c) Ensaio em execução (Autor 2020).

O ensaio se deu com a varredura e leituras dos ciclos, dada aplicação de carregamento senoidal ou *haversine* em diferentes frequências e modo, controlando a taxa de deformação. Como não foi avaliada a vida de fadiga nesse ensaio, foi então adotada uma deformação mínima afim de não ocasionar nenhum dano a amostra. O ensaio se dava por encerrado após varredura das frequências requeridas em cada amostra e assim o módulo de elasticidade pôde ser calculado utilizando a Equação 3.6.8;

$$Eel = \left( \frac{Fs . Le}{\delta s . b . h} \right) . \left( \frac{(3 . Le^2 - 4 . Li^2)}{4 . h^2} \right) + k . (1 + \nu) \quad (3.6.8)$$

Onde:

$Eel$  = módulo de elasticidade;

$k$  = variável que leva em consideração a tensão cisalhante (considerada 1,5);

$\nu$  = coeficiente de Poisson;

$Li$  = comprimento da vigota entre os apoios internos do aparato 4PB;

$\delta s$  = deslocamento exercido pelo equipamento;

$Le$  = comprimento da amostra entre os apoios externos;

$Fs$  = força exercida pelo equipamento;

$h$  = altura média;

$b$  = largura média da amostra.

E o ângulo de fase bem como a energia dissipada no sistema foram calculados pelas equações 3.6.9 e 3.6.10.

$$\varphi = 360 \cdot f \cdot s \quad (3.6.9)$$

$$w = \pi \cdot \sigma t \cdot \varepsilon t \cdot \sin(\varphi) \quad (3.6.10)$$

Onde:

$\varphi$  = ângulo de fase;

$f$  = frequência de aplicação do carregamento;

$s$  = tempo de defasagem entre a aplicação da carga  $F_s$  e o deslocamento;

$w$  = energia dissipada.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas e realizadas as devidas análises dos resultados provenientes dos ensaios laboratoriais realizados para os ligantes, agregados, RAP e para as misturas asfálticas produzidas.

Na primeira fase da pesquisa foi realizada toda a caracterização física do material, agregados minerais virgens, CAP 50-70 virgem e RAP (ligante envelhecido e agregado remanescente), com execução dos ensaios tradicionalmente preconizados para ligantes e agregados.

Para as misturas asfálticas produzidas em laboratório, determinou-se os parâmetros volumétricos para os corpos de prova cilíndricos e em seguida para os mesmos CP's foram realizadas análises de resistência a tração, dano por umidade induzida, desgaste por abrasão e módulo resiliente. Posteriormente, foram obtidos dados da vida de fadiga por compressão diametral por meio dos gráficos de vida de fadiga, construídos por meio da diferença de tensões e vida de fadiga por deformação resiliente. Todas essas análises foram realizadas para as três misturas asfálticas recicladas a quente, cuja granulometria é densa.

Ainda para as misturas asfálticas, apresentam-se também dados para as amostras prismáticas (vigotas), onde foram comprovados todos os parâmetros volumétricos em razão do método de produção das mesmas, e estes parâmetros foram comparados aos obtidos nas amostras cilíndricas, como parâmetro de acurácia de projeto. Assim, as amostras cilíndricas foram produzidas das três misturas distintas seguindo a mesma nomenclatura, cujas amostras foram usadas para obtenção do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) descrito no item 3.7.2 do Capítulo 3.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS VIRGENS

Os agregados minerais virgens utilizados na pesquisa para composição das misturas asfálticas recicladas, são de origem da rocha micaxisto, cuja fração utilizada foram Brita 1, Brita 0 e pó de pedra, material esse oriundo da pedreira Goiás, localizada em Aparecida de Goiânia/GO.

A Tabela 4.1 traz os resultados obtidos a partir da caracterização dos agregados virgens, mencionados no item 3.2 do capítulo 3.

**Tabela 4-1** Caracterização do micaxisto.

<b>Parâmetros</b>	<b>Método</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Pó de pedra</b>
Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT ME 413/19 DNIT ME 411/19	2,78	2,79	2,81
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT ME 413/19 DNIT ME 411/19	2,74	2,73	2,78
Absorção (%)	DNIT ME 413/19 DNIT ME 411/219	0,62	0,74	2,08
Adesividade	DNER ME 078/94	satisfatória		-
Índice de forma	NBR 7809/19	0,81	0,71	-
Abrasão <i>Los Angeles</i>	DNER ME 035/98	31,44%		-
Durabilidade	DNER ME 089/94	satisfatória		-

Conforme resultados apresentados na Tabela 4.1 nota-se que a fração graúda apresentou índices satisfatórios quanto a durabilidade e adesividade do agregado, além dos valores obtidos nos ensaios de índice de forma e Abrasão Los Angeles se enquadrarem dentro dos limites recomendados pela normativa e por bibliografias aqui consultadas, cujos valores foram de 0,8 e 31%, percentual este abaixo de 40% que é o mais considerado como apto para uso em misturas asfálticas.

Quanto a massa específica aparente (não incluindo o volume de vazios) e densidade real dos grãos, tanto para fração graúda e miúda, tem-se índices adequados, além da absorção que é maior conforme se tem maiores superfícies específicas, ou seja, conforme temos uma maior quantidade de material fino na composição. Os dados obtidos são bastante similares aos atingidos por Barroso (2018) que trabalhou com o mesmo agregado mineral, que apresenta boa aplicação nos estudos de dosagem e produção de misturas asfálticas.

As amostras de agregados passaram por peneiramento conforme prescrito na normativa

DNIT ME 412/19 para obtenção das curvas granulométricas, sendo o peneiramento realizado em três amostras de cada fração (Brita 1 , Brita zero, Pó de pedra, e Areia britada), cujos resultados são apresentados na Figura 4.1.

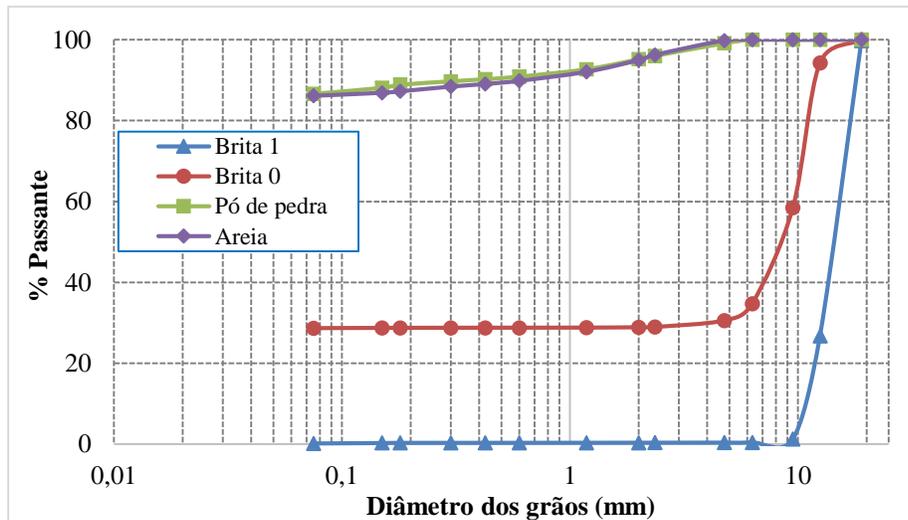


Figura 4-1 Curva granulométrica micaxisto (Autor 2020).

De acordo com a Figura 4.1 pode-se observar por meio das que as curvas do agregado mineral dada fração graúda, miúda e material de enchimento, que a Brita 1 apresenta uma grande quantidade de material retido na peneira de abertura 12,5mm, seguindo da Brita com grande percentual de material retido nas peneiras de abertura 12,7 9,5 e 6,3 mm, já o Pó de pedra e Areia apresentaram comportamento sobreposto com mínima variabilidade comprovando que ambos podem ser utilizadas como material de enchimento na composição granulométrica das misturas recicladas da presente pesquisa.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE VIRGEM

O ligante virgem utilizado para fabricação das misturas foi o CAP 50-70 sem aditivos, fornecido por uma distribuidora de Asfaltos da cidade de Brasília-DF, conforme descrito no item 3.3. A caracterização foi realizada a partir da penetração e viscosidade, além da realização de demais ensaios tradicionalmente preconizados para ligantes, bem como a realização do ensaio com ligante que passou pela etapa de envelhecimento a curto prazo na estufa RTFOT. Os resultados e descrição dos mesmos são mostrados na Tabela 4.2.

**Tabela 4-2** Caracterização do CAP 50/70.

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Limites 095/06 DNIT</b>	<b>CAP 50-70</b>
Penetração (mm)	DNER ME 003/09	50-70	53,7 mm
Ponto de amolecimento (°C)	DNIT ME 131/10	mín. 46 °C	48,3 °C
Ponto de Fulgor (°C)	DNER ME 148/94	mín. 235 °C	302,4 °C
Viscosidade rotacional Brookfield (cP)	ASTM D 4402/15	135°C	mín. 274 cP
		150°C	mín. 112 cP
		177°C	mín. 57 cP
Índice de susceptibilidade	-	(-1,5) a 0,7	-1,47
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	DNER ME 193/96	-	1,0117 g/cm <sup>3</sup>
Ductilidade (cm)	DNER ME 163/98	mín. 60 cm	> 100 cm
Recuperação elástica (%)	DNER ME 130/10	-	10%
RTFOT à 163°C e 85 minutos ASTM D2872	ASTM D113	Variação em massa (%)	máx. 0,5 %
	ASTM D5	Penetração retida (%)	mín. 55 %
	ASTM D36	Ponto amolecimento (°C)	máx. 8 °C
			0,287%
			59,96% (32,2 mm)
			2,6 °C (50,9 °C)

De acordo com a Tabela 4.2 nota-se que os valores obtidos nos ensaios de caracterização foram satisfatórios, estando ambos enquadrados dentro dos limites estabelecidos pela especificação do DNIT 095/06, cuja análise de recuperação elástica recomendada para ligantes modificados, foi feita na presente pesquisa a título de curiosidade.

Quanto as análise de envelhecimento a curto prazo, realizado por meio do ensaio RTFOT, os dados obtidos com o ligante que passou pelo envelhecimento foram satisfatórios, ambos enquadrando dentro dos limites especificados, cuja penetração retida correspondeu a um índice inferior a 35,6% do obtido no CAP 50-70 sem passar pelo processo de envelhecimento a curto prazo.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO RAP

A caracterização do RAP ocorreu em três etapas: uma consistindo na caracterização do material fresado em si, outra do ligante oxidado e envelhecido e por fim com a caracterização do agregado remanescente.

Na primeira etapa foi realizada a caracterização do RAP quanto a sua condição natural, onde foram obtidos dados como massa específica máxima medida (Gmm), teor de ligante oxidado presente no material e a granulometria (com e sem CAP). As Gmm's foram determinadas conforme a AASHTO T 209 (2012) e os valores são apresentados na Tabela 4.3 e 4.4, cuja primeira tabela

traz dados referente a densidade do material na condição natural e em estado solto, já a Tabela 4.4 evidencia os dados de densidade determinados por análise de peso hidrostático na condição solta.

**Tabela 4-3** Massa específica medida estado solto do RAP.

<b>Gmm</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,346	1,35	1,351
Média	1,349		

**Tabela 4-4** Massa específica do RAP.

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	<b>RAP natural</b>
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT 413/19	2,57
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT 411/19	2,28
Absorção		1,43

De acordo com a Tabela 4.3 nota-se que o material apresenta valores de densidade em estado solto inferiores ao do agregado virgem, cujos valores da densidade do agregado virgem corresponde a mais de 50% do obtido no RAP, resultado este explicado pelo fato do material ser caracterizado como um agregado negro, ou seja composto por agregado e ligante remanescente, onde o agregado em si está envolvido por uma película de ligante oxidado podendo este também ser composto por grumos de material (agregados+ ligante + material de enchimento).

A extração do ligante remanescente foi realizada de duas maneiras para determinação do teor de ligante presente na amostra, sendo as extrações feitas por centrifugação pelo método Rotarex (NBR 16208/13), e por ignição em forno mufla (ASTM D 6307/05), conforme resultados dos teores evidenciados na Tabela 4.5.

**Tabela 4-5** Dados de extração de ligante do RAP.

<b>Método</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>
Rotarex (%)	6,09%	5,95%	6,05%
Forno mufla (%)	5,86%	5,83%	5,64%

Nota-se que há uma certa diferença nos teores extraídos pelos dois métodos, sendo que o método rotarex obteve-se valor de teor de 6,03% de ligante, e pela queima por ignição em forno mufla teor foi de 5,78%, valor este correspondente a uma diferença de 4,15% sob o maior teor atestado. Situação essa explicada em função do método Rotarex permitir a saída de fino no processo de extração do ligante, onde devido o processo funcionar com mecanismo de uma centrifugação juntamente com a solução (tricloroetileno + ligante) há a saída de material fino, o que pode ser

atestado quando realiza a filtração da solução para fazer a recuperação do ligante.

Entretanto, para fins de dosagem foi adotado o valor do teor de ligante no RAP, o percentual obtido na queima por ignição em forno mufla. Mas devido a necessidade de posterior extração do ligante oxidado para devidas análises, foi adotado como padrão de extração recuperável, o método do rotarex, pois a solução obtida no processo de extração seguiu para técnica de rotaevaporação seguindo as prescrições da ASTM D 5404/17.

Onde o ligante remanescente recuperado foi caracterizado seguindo os mesmos ensaios e análises do CAP virgem mencionado no capítulo 3. Os resultados da caracterização constam na Tabela 4.6.

**Tabela 4-6** Caracterização do CAP remanescente.

Ensaio	Método	CAP remanescente	
Penetração (mm)	DNER ME 003/09	29,4 mm	
Ponto de amolecimento (°C)	DNIT ME 131/10	64,1 °C	
Ponto de Fulgor (°C)	DNER ME 148/94	194,6 °C	
Viscosidade rotacional Brookfield (cP)	ASTM D 4402/15	135°C	600 cP
		150°C	528 cP
		177°C	417 cP
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	DNER ME 193/96	1,14 g/cm <sup>3</sup>	
Ductilidade (cm)	DNER ME 163/98	18,6 cm	
Recuperação elástica (%)	DNER ME 130/10	0,193	

De acordo com Tabela 4.6, tem-se que o ligante remanescente que foi recuperado, por estar oxidado perdeu suas propriedades originais, fato este pode ser observado pela penetração, cujo obtido foi de 29,4mm, correspondendo a um índice inferior a 41,2% obtido no CAP 50/70 em estado virgem. O ponto de amolecimento de 64,1°C caracteriza o material como sendo mais viscoso, o que é confirmado pela viscosidade que foi muito superior ao de um ligante da mesma especificação virgem, cuja viscosidade para temperatura de 135°C foi 75% superior da obtida no ligante virgem, além da superioridade nos parâmetros de densidade.

Estando apenas a ductilidade, recuperação elástica e ponto de fulgor com valores inferiores ao do CAP 50-70 virgem. O ponto de fulgor, cuja temperatura atestada foi de 194,6°C pode ser explicado por armazenar gases oriundos do processo de recuperação. Quanto a ductilidade, o material chegou ao limite máximo de 18,6 cm de extensão o que se esperava, dada a elevada densidade e viscosidade. Foi realizada a recuperação elástica em aspecto de curiosidade cujo valor obtido foi 98,07% inferior ao de um ligante virgem.

Após todo o processo de extração do ligante, foi obtido o agregado cinza e com isso foi possível estimar parâmetros como densidade real, massa específica aparente e absorção do agregado em frações, obtidas pela separação em graúdo, miúdo e material de enchimento, conforme resultados da Tabela 4.7, além do desgaste por abrasão e a forma destes agregados, conforme Tabela 4.8.

**Tabela 4-7** Densidade, massa específica e absorção do agregado do RAP.

<b>Parâmetros</b>	<b>Graúdo</b>	<b>Miúdo</b>	<b>Fíller</b>
Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )	2,751	2,764	2,692
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,725	2,631	-
Absorção (%)	0,52	0,605	-

Em análise a Tabela 4.7 nota-se que os dados que mesma descreve são do agregado cinza, ou seja o agregado obtido após a extração do ligante, cujos valores de densidade real e massa específica bem como absorção ficaram próximos ao do agregado virgem, estando o agregado virgem com valores minimamente superiores, indicando a aplicabilidade do agregado do RAP na concepção de novas misturas de concreto asfáltico.

Quanto a absorção do filler do RAP essa não foi satisfatória, em razão do processo de determinação requerer a massa da amostra na condição saturada de superfície seca no ar, o que impossibilitou de realizar devido fíller conter um teor de ligante residual elevado mesmo tendo sido efetuado o processo de extração do ligante remanescente.

**Tabela 4-8** Desgaste e forma dos agregados do RAP.

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>
Desgaste por impacto Marshall (%)	16,19	15,82	16,12
Índice de forma		0,645	

Analisando os dados da Tabela 4.8, nota-se que material que originou o RAP estudado, passou por um processo de desbaste cuja fresagem ocasionou em um material com granulometria mais fina, onde o índice de forma dos agregados do RAP foi de 0,6 correspondente a 14% inferior ao da brita 0 do agregado virgem utilizado na mistura.

Em função da granulometria do RAP não enquadrar em nenhum dos grupos de análise prescritos pelo ensaio de Abrasão Los Angeles, foi realizada Abrasão por meio do método de desgaste Treton, cujo valor obtido foi de 16%, abrasividade essa 49% menor se comparada a abrasividade do agregado virgem, fato este podendo ser explicado em função do agregado

proveniente do RAP ter maior capacidade de armazenar energia em função de já ter passado por um processo de usinagem e ter sido envolvido por uma película de ligante.

As amostras de RAP passaram por peneiramento conforme prescrito pela normativa DNIT ME 412/19 para obtenção das curvas granulométricas, sendo o peneiramento realizado com amostras de RAP com CAP e RAP sem CAP, cujos resultados são apresentados na Figura 4.2.

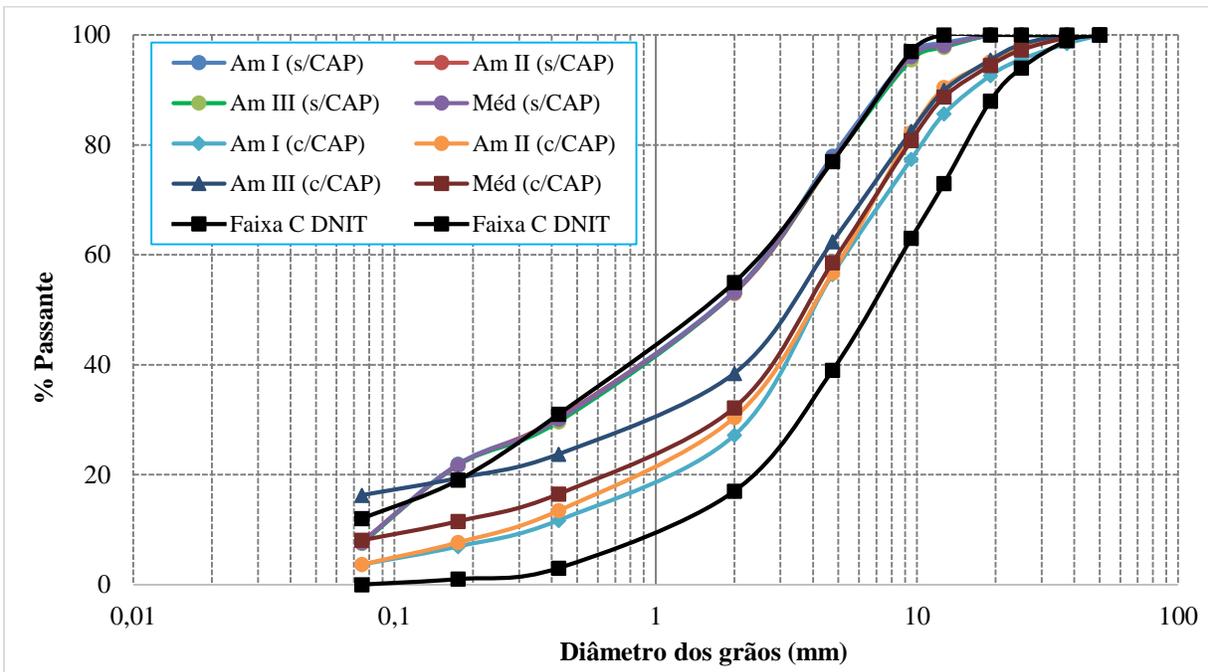


Figura 4-2 Curva granulométrica do RAP (Autor 2020).

A partir das curvas granulométricas apresentadas na Figura 4.2, observa-se que o material com CAP apresenta curvas mais dispersas para as três amostras analisadas, fato este que as frações passantes em cada peneira são formadas por grumos de material (agregado+ material de enchimento+ ligante), o que não representa de fato a quantidade de material graúdo e miúdo existente na amostra, comportando-se como uma matriz mais aberta e descontínua. Por outro lado, analisando os dados das amostras sem CAP, nota-se que as mesmas mantiveram a mesma orientação em todas as amostras e suas curvas ficaram sobrepostas com menor dispersão entre si.

Ao comparar a curva média com CAP com a curva média sem CAP, nota-se que a curva sem CAP mostrou-se com maior percentual passante no peneiramento grosso, abrangendo um comportamento de matriz granulométrica mais densa, com melhor enquadramento dentro da Faixa C do DNIT, que foi a faixa de trabalho adotada na presente pesquisa. Isso indica não ter ocorrido

uma quebra considerável dos agregados durante o processo de desbaste da estrutura, o que causaria no aumento potencial do teor de finos.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DO AGENTE REJUVENESCEDOR

Conforme mencionado no item 3.1.2 do capítulo 3, o agente rejuvenecedor utilizado na pesquisa foi o Cyclopav 100 fornecido pela Betunel, cuja caracterização do agente rejuvenecedor enquadra-se como um AR-5, conforme requisitos estabelecidos na especificação brasileira DNC nº 04/97, estando os resultados dos ensaios de caracterização realizados, mostrados na Tabela 4.9.

**Tabela 4-9** Caracterização do rejuvenecedor.

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Limites</b>		<b>AR-5</b>
Ponto de Fulgor (°C)	NBR 11341	mín. 218 °C		318,6 °C
Viscosidade rotacional Brookfield (cP)	ASTM D 4402/15	135°C	-	41,96 cP
		150°C	-	19,92 cP
		177°C	-	10,5 cP
	ASTM D 2171	60°C	176-900 cP	409,78 cP
Densidade 20/4°C (g/cm³)	NBR 6296		-	1,1826 g/cm³

Observa-se que o rejuvenecedor utilizado na pesquisa atende ao prescrito pela especificação enquadrando nos limites estabelecidos, cujo ponto de fulgor é superior ao do CAP 50-70, além dos valores de densidade serem superiores ao do ligante virgem e oxidado, e de apresentar uma viscosidade considerável a 60°C, fato que a viscosidade do AR nas temperaturas de ensaio feitas em ligante convencional, os valores são bem baixos o que que comprova que o material tem bastante facilidade em escoar, ou seja trata de um material pouco viscoso.

#### 4.5 DOSAGEM SUPERPAVE

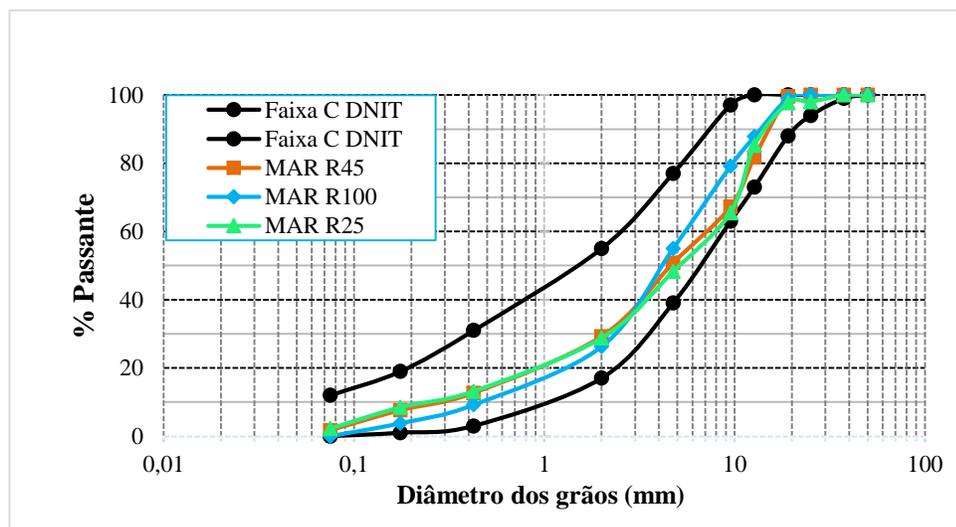
A matriz granulométrica das misturas recicladas enquadrou nos limites da faixa C do DNIT (DNIT 112/09), caracterizando como uma mistura densa. Devido ao fato do RAP possuir bastante material fino, foi realizada uma correção granulométrica com agregado virgem para as misturas com 25 e 45% de RAP, cujas percentagens de material passante em cada mistura constam na Tabela 4.10, bem como ilustrados na Figura 4.3.

**Tabela 4-10** Distribuição granulométrica das misturas e faixa limite DNIT.

Malha das peneiras		Porcentagem passando (%)				
ASTM	(mm)	DNIT	MAR R100	MAR R45	MAR R25	
2"	50,1	100	100	100	100	100
1.1/2"	37,5	100	100	100	100	100
1"	25,1	100	100	100	100	98
3/4"	19,1	100	100	99	100	98
1/2"	12,7	73	100	88	82	85
3/8"	9,5	63	97	79	67	65
N° 4	4,75	39	77	55	51	48
N° 10	2	17	55	26	29	29
N° 40	0,425	3	31	9	13	13
N° 80	0,175	1	19	4	8	8
N° 200	0,075	0	12	0	2	2

A partir dos resultados da Tabela 4.10 que evidencia a distribuição granulométrica das misturas, e em detrimento a metodologia SuperPave, tem-se que a composição granulométrica da mistura MAR-R100 apresenta tamanho máximo nominal (TMN) de 9,5 mm e dimensão máxima de 12,5 mm, já para as misturas MAR-45 e MAR-25 tem se como TMN de 12,5mm e dimensão máxima de 19,1mm, fato este devido das misturas terem maior composição de agregado virgem, o que contribuiu para correção da curva granulométrica das misturas.

Assim, a metodologia SuperPave estabelece que a peneira de tamanho máximo nominal trata de uma peneira cujo tamanho é imediatamente acima da primeira peneira que reter mais de 10% do agregado combinado, e a dimensão máxima corresponde um tamanho acima da peneira de tamanho máximo nominal.



**Figura 2** Curva granulométrica das misturas recicladas, enquadradas na faixa C DNIT (Autor 2020).

Logo, de acordo com a Figura 4.3 pode-se notar que ambas misturas enquadraram dentro da faixa C do DNIT respeitando a zona restrição de prescrita na metodologia SuperPave, dados os pontos de controle, cuja curva granulométrica da mistura MAR-R100 contém maior percentual de material de fração fina, e as misturas MAR- R45 e MAR-R25 seguiram a mesmo fracionamento com as devidas correções.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados provenientes da dosagem das misturas asfálticas recicladas produzidas para as amostras cilíndricas, compactadas no Compactador Giratório Superpave (CGS). Na Tabela 4.12 é possível observar os resultados de dosagem para confecção das placas, compactadas com rolo compactador RCW 900, cujo valores dos parâmetros volumétricos de volume de vazios (Vv), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV), densidade aparente e densidade medida são evidenciados.

**Tabela 4-4** Dados de dosagem das misturas recicladas (CP's cilíndricos).

<b>Mistura</b>	<b>Teor de CAP virgem (%)</b>	<b>Teor de rejuvenescedor (%)</b>	<b>Gmb (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gmm (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>RBV (%)</b>
MAR-R100	0	20	2,332	2,454	4,2	16,25	75,38
MAR-R45	4,6	20	2,361	2,461	4,05	17,31	76,81
MAR-R25	4,9	20	2,36	2,469	4,1	16,71	76,06

A tabela 4.11 traz dados oriundos da dosagem das misturas compactadas em laboratório, cujo teor de AR é o mesmo para todos, estando o percentual de inserção 20%, correspondente ao teor de ligante remanescente no RAP equivalente ao quantitativo correspondente em massa. sendo que para Mistura MAR-R45 o teor de ligante virgem é menor em razão de ter uma maior incorporação RAP na mistura, assim há uma maior inserção de AR.

O volume de vazios seguiu ao preconizado pela metodologia onde de acordo com análises volumétricas, a mistura MAR-100 apresentou maior número de vazios, podendo isso ser explicado pela não ativação do ligante remanescente.

Quanto a densidade da mistura, as misturas com maiores teores tenderam a apresentar menores densidades, fato este justificado pelo maior número de vazios.

Estando o volume de agregado mineral enaquadrado dentro dos limites especificados, ou seja maior que 11% e a relação betume vazios de acordo ao que se tem preconizado pela metodologia SuperPave e ao previsto em projeto pelo fator de equivalência de cargas ao tráfego

que se destina ESALs.

**Tabela 4-5** Dados de dosagem das misturas recicladas (placas).

Mistura	Teor de CAP virgem (%)	Teor de rejuvenecedor (%)	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
MAR-R100	0	20	2,33	2,457	4,45%	16,15	75,23
MAR-R45	4,6	20	2,317	2,46	4,38%	17,34	76,93
MAR-R25	4,9	20	2,359	2,472	4,36%	17,30	76,87

Para mistura compactada com rolo compactador, os dados seguiram o mesmo comportamento das que foram compactadas em laboratório no compactador giratório, visto a importância e necessidade da aproximação dos resultados, onde as misturas apresentaram valores de volume de vazios meramente superiores, fato este podendo ser explicado pela dificuldade de controle do grau de compactação na confecção das placas.

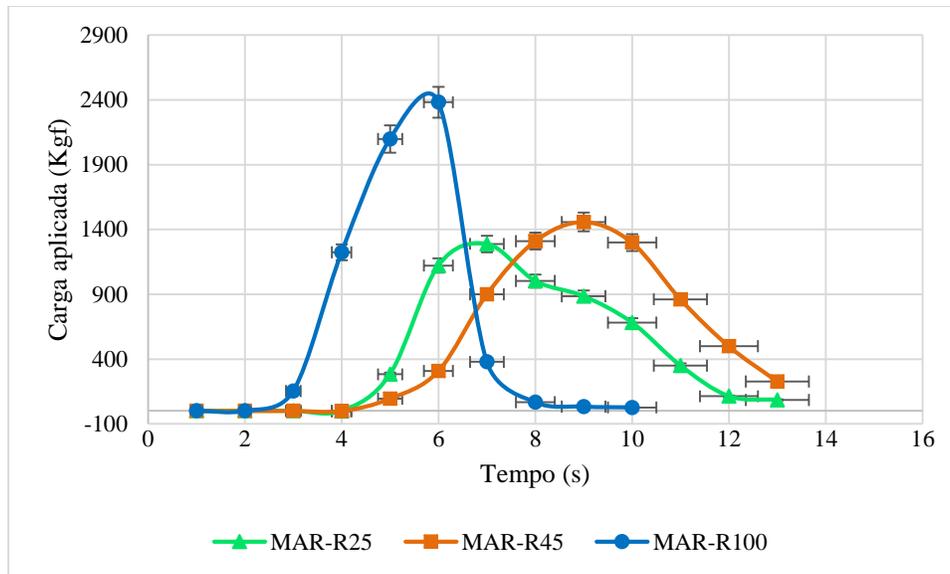
## 4.6 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS RECICLADAS

### 4.6.1 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) foi realizado de acordo com a normativa que preconiza o método de ensaio, onde foram ensaiados 3 corpos de prova para cada teor de incorporação de RAP, com aplicação de carregamento vertical constante nos CP's por meio da prensa triaxial Humboldt, até a ruptura do plano vertical da amostra. Os resultados da resistência a tração estão apresentados na Tabela 4.13 e Figura 4.4.

**Tabela 4-6** Dados de RT das misturas recicladas.

Mistura	Teor de CAP virgem (%)	Teor de rejuvenecedor (%)	Vv (%)	RTm (MPa)
MAR-R100	0	20	4,2	2,3134
MAR-R45	4,6	20	4,05	1,5782
MAR-R25	4,9	20	4,1	1,1442



**Figura 3** Gráfico das curvas de RT para misturas recicladas (Autor 2020).

Em função da normativa não estabelecer valores mínimos aceitáveis da resistência a tração por compressão diametral para as misturas, foi então utilizado como parâmetro norteador, os valores obtidos por pesquisas já então realizadas com misturas asfálticas recicladas à quente, buscando fazer uma equiparação.

Deste modo, os valores de RT obtidos na presente pesquisa estão em conformidade aos então apresentados por Suzuki (2019), Bohn (2017) e Centofante (2016), sendo que em ambas pesquisas constatou-se que conforme aumentamos o percentual de incorporação de RAP na mistura, tem-se um aumento significativo do valor do RT, sendo este superior à de uma mistura convencional.

Foram então observados, conforme Figura 4.4, que as misturas com maior percentual de incorporação de RAP possuem valores superiores de RT, e apresentam uma queda brusca após a ruptura, fato este devido a elevada rigidez da mistura. Isso também foi observado na execução do ensaio, em que as amostras com maiores teores de RAP rompem por completo, bruscamente, enquanto amostras com menores teores de incorporação apresentam uma curva mais suave e com maior dissipação do carregamento.

Assim como os valores de RT apresentados pelos autores em pesquisas já realizadas, o RT obtido na presente pesquisa foi superior a 2,2 MPa para a mistura com maior percentual de incorporação de RAP (MAR-R100). Além disso, todas as misturas estudadas nesta pesquisa superaram o valor mínimo de 0,65MPa, preconizado pela norma DNIT (031/2016), e ainda dentro de valores recorrentes médios entre 0,5 e 2,0MPa, segundo afirmação de Bernucci *et al.* (2006).

#### 4.6.2 Dano por umidade induzida (DUI)

O dano por umidade induzida é caracterizado como sendo a razão da resistência a tração por compressão diametral dos corpos de prova que passaram pelo condicionamento em função dos não condicionados, sendo que o valor mínimo da relação (RRT) é atribuído em projeto.

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), a avaliação do dano é de extrema importância, pois está relacionada ao desempenho dos pavimentos, evidenciando os possíveis problemas de adesividade do agregado com o ligante asfáltico.

A metodologia Superpave traz valores de referência para RRT, cujos valores são acima de 80%. Bohn (2016) *apud* Hicks (1991), afirmam que grande parte dos departamentos estaduais de transportes norte-americanos utilizam o limite de 70%.

Entretanto, Bohn (2016) relata que a relação RRT não deve ser inferior a 30%, ou seja, deve-se ter uma perda máxima de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados da mistura de 0,7, cuja perda pode ser em função da perda de adesão ou a perda de coesão.

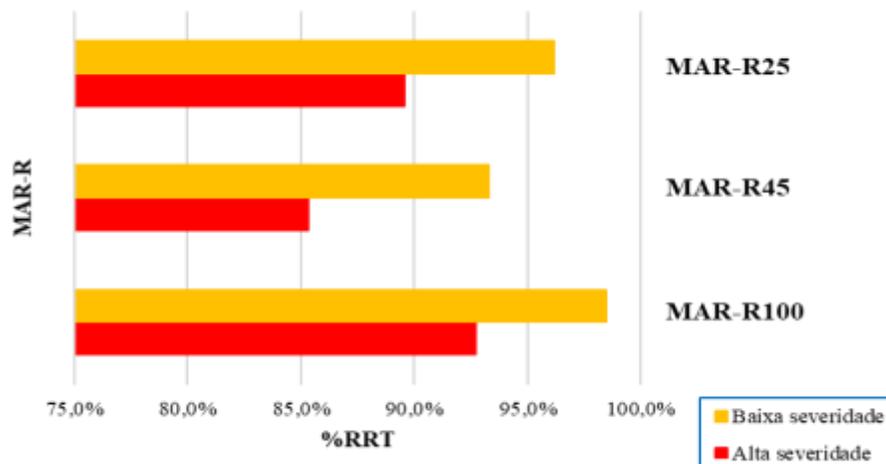
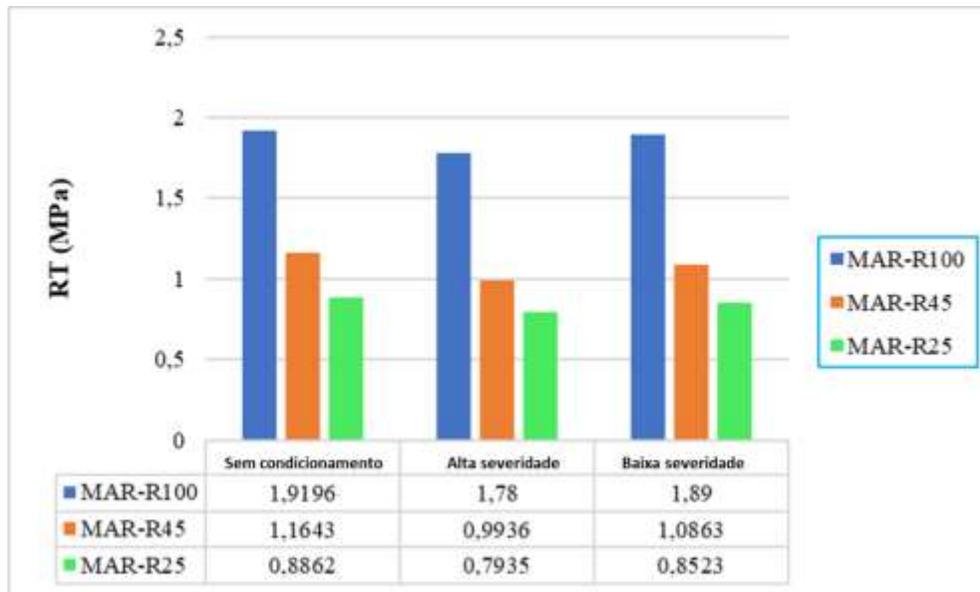
Contudo, como no dano por umidade induzida é possível ter uma combinação de ambas perdas, Specht (2006) comenta que a perda de adesão é devido à percolação de água entre o ligante e o agregado ocasionando o descolamento da película de ligante; e a perda de coesão é decorrente da redução de rigidez do ligante e a redução das ligações ligante e agregado.

O método de ensaio do dano por umidade induzida e ou Lottman modificado avaliou a propriedade de adesividade nas misturas asfálticas recicladas a quente com 25%, 45% e 100% de RAP da presente pesquisa, considerando o efeito da água.

Conforme descrito no capítulo 3, foram realizadas análises de dano na mistura em dois condicionamentos, ou seja em alta e baixa severidade, cujo os dados dos danos podem ser vistos na Tabela 4.14 e Figura 4.5.

**Tabela 4-14** Dados de RRT das misturas recicladas.

Mistura	V <sub>v</sub> (%)	RT <sub>m</sub> (MPa)	RT <sub>c</sub> (MPa)	RT <sub>c</sub> (MPa)	RRT (%)	RRT (%)
			alta severidade	baixa severidade	alta severidade	baixa severidade
MAR-R100	6,14	1,9196	1,78	1,89	92,7%	98,5%
MAR-R45	6,09	1,1643	0,9936	1,0863	85,3%	93,3%
MAR-R25	6,15	0,8862	0,7935	0,8523	89,5%	96,2%



**Figura 4-5** Gráfico de RRT para misturas recicladas (Autor 2020).

Analisando os valores encontrados a partir do ensaio, pode-se afirmar que há uma paridade entre as misturas avaliadas, sendo que para baixa severidade o valor da relação RRT ficou acima de 85%, e para alta severidade o valor da relação ficou acima de 93% em todas as misturas avaliadas.

Nota-se que para mistura de 100% RAP o RRT foi superior às demais misturas, fato este devido a mistura não conter agregados virgens e nem incorporação de ligante virgem, apenas agente rejuvenescedor. Contudo, a adesividade atestada como satisfatória é comprovada em função das misturas com 45% e 25% apresentarem valores da relação RRT próximos de 1.

Observa-se ainda que para análise em baixa severidade, que melhor representa a realidade

no Centro Oeste, a relação de dano das misturas avaliadas variou entre 2,3% a 5,2%. Sendo que conforme houve aumento da quantidade de material fresado incorporado nas misturas, houve também uma melhora no percentual de dano das mesmas, onde para a mistura MAR-R100, o percentual de dano deletério devido a água foi de 2,3%.

Bohn (2016) comenta que há uma melhoria aos danos com aumento do percentual de incorporação de RAP nas misturas, onde acordo com a autora, nas misturas avaliadas com CAP 50-70, houve melhora de 4% para as incorporações de 25% RAP e de 7% para as incorporações com 50% de RAP, se comparadas a mistura convencional.

Arshad *et al.* (2016) avaliaram o dano em misturas recicladas à quente com teores de 15, 25 e 35% de RAP, e obtiveram valores que enquadraram dentro da especificação brasileira e da norte-americana, e notaram uma proporcionalidade entre os percentuais de incorporação e o valor do RRT.

Já Suzuki (2019), encontrou valores de RRT de 86% para suas misturas com 25% de incorporação e com AR e 87% para misturas com 50% de incorporação. Também foi avaliado RRT para mistura de 65% de RAP, entretanto esta não conteve agente rejuvenescedor em sua composição.

Luzzi (2019) avaliou misturas com 10, 20 e 30% de incorporação de RAP, e em suas análises de RRT, notou que as misturas com 10 e 30% de RAP apresentaram um comportamento semelhante, com resistência a tração retida superior a de uma mistura convencional. Entretanto as misturas com 20% apresentaram um percentual maior se comparada as demais.

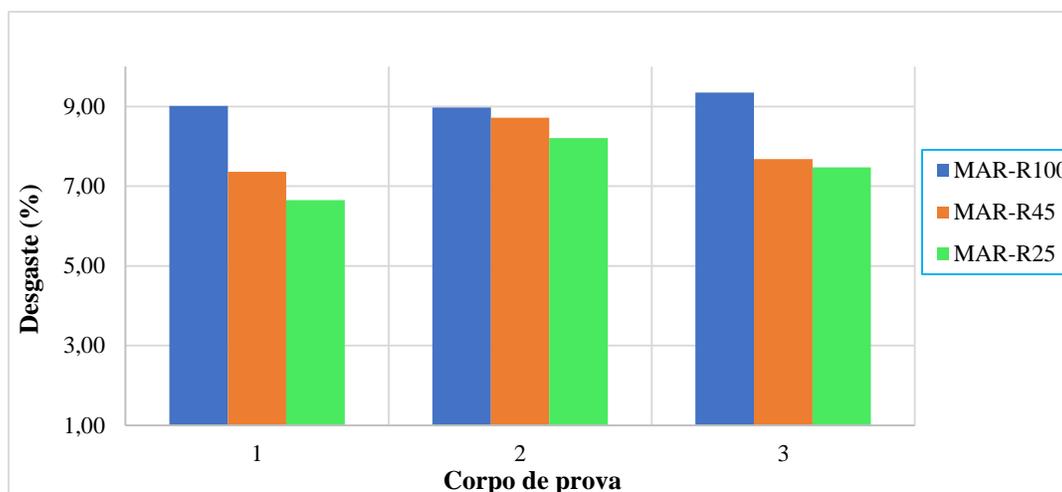
Logo, é possível afirmar que as misturas da presente pesquisa apresentam valores semelhantes ao descrito na literatura, onde a incorporação do RAP aumentou a propriedade de melhoria ao dano por umidade induzida e conseqüentemente a adesividade das misturas asfálticas.

#### **4.6.3 Desgaste Cântabro**

De acordo com a normativa, para que o ensaio seja válido, os valores de desgaste cântabro não podem diferir mais de 20% de uma amostra em relação a média das amostras analisadas. Atendendo a prescrição da normativa, todas as amostras atenderam ao quesito estabelecido, cujos valores das médias dos desgastes estão apresentados na Tabela 4.15 e Figura 4.6.

**Tabela 4-15** Dados de desgaste cântabro das misturas recicladas.

Mistura	Vv (%)	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Desgaste (%)
MAR-R100	4,2	2,435	2,328	9,11
MAR-R45	4,05	2,461	2,358	8,58
MAR-R25	4,1	2,469	2,366	7,44



**Figura 4-6** Gráfico de desgaste cântabro para misturas recicladas (Autor 2020).

Avaliando os valores de desgaste apresentados na Tabela 4.14, nota-se que as misturas com maior percentual de incorporação de RAP apresentaram um maior desgaste em relação àquelas com menores teores, valores estes mínimos, cuja variação se deu em 1,67 % superior para mistura com 100% de RAP, comparada a de 25% de incorporação de RAP.

Isso traz a ideia de que as misturas com maiores teores apresentam desempenho inferior ao atrito pneu-pavimento, podendo esta se desagregar com maior facilidade, fato este relacionado a perda de coesão da mistura e a redução das ligações ligante e agregado.

Conforme dados da bibliografia, Bohn, (2017) constatou que as misturas dosadas com CAP 50/70 com menores teores de RAP apresentam um desgaste menor comparado as de maiores teores, em comparação a uma mistura de referência convencional, com uma variabilidade de desgaste 3,68% superior a mistura de 50% comparada a de 25% de RAP.

Centofante (2016) notou que conforme aumentamos os teores de RAP nas misturas, é então observado um aumento do desgaste, onde nas misturas avaliadas com teores de 10%, 20% e 30% a autora obteve uma perda de massa de 6,35% para misturas com 10% e 8,11% para as com 30% de RAP. A autora ainda notou que o desgaste aumenta para misturas em que o teor de ligante remanescente no RAP são maiores, e ocorre o inverso quando se tem a incorporação de maiores

quantidades de ligante virgem na mistura, confirmando assim, o que ocorre na presente pesquisa e mostrado pela Figura 4.6.

Ainda nesse sentido, Luzzi (2019) avaliou misturas com teores 10%, 20% e 30% de incorporação de RAP, e constatou que conforme se aumenta os teores, observa-se um aumento de desgaste, cujo valor de desgaste entre a mistura com 10% e 30% apresentou uma variação de 0,54%, valor este próximo ao obtido na presente pesquisa.

#### 4.6.4 Módulo Resiliência

Conforme descrito no capítulo 3, para o ensaio de módulo de resiliência foram feitas análises em 12 corpos de prova para cada mistura estudada, seguindo as prescrições da normativa DNIT-ME 135/2018, com carregamento aplicado de 25% do obtido no ensaio de resistência a tração.

O valor do módulo foi obtido em função do valor do deslocamento horizontal obtido no ensaio, e os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.16. Sendo que em função de ter sido realizado análise para 12 corpos de prova, foi feito um tratamento estatístico dos dados mediante software excel, por meio da distribuição T, além da mensuração de média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados obtidos.

**Tabela 4-16** Dados de MR das misturas recicladas.

<b>Mistura</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>D. Padrão (%)</b>	<b>MR/RT (MPa)</b>
MAR-R100	2,3134	11441,33	1106,43	9,67	4945,67
MAR-R45	1,5782	5360,40	490,06	9,14	3396,52
MAR-R25	1,1442	4224,29	246,03	5,82	3691,91

É possível observar que a mistura MAR-R100 ou seja, com 100% de teor de RAP apresentou módulo mais elevado se comparado as misturas com 25 e 45% de RAP. Isso se deve ao fato de que as misturas recicladas com altos teores apresentarem uma maior rigidez em detrimento daquelas com teores inferiores. Nota-se que a mistura com 100% RAP apresentou um valor de módulo resiliente médio de 11.441 MPa, a de 45% um valor de 5.360 MPa e a de 25% o valor correspondente de 4.224 MPa, estando a de 100% RAP com maior desempenho na situação avaliada.

Centofante (2016) avaliou misturas recicladas à quente com teores de RAP nos percentuais de 10, 20 e 30%, cujo ligante remanescente presente no RAP e o ligante virgem inserido na mistura

era o CAP 50-70, sendo o mesmo utilizado na presente pesquisa. Os valores de MR encontrados pela autora estavam entre 5.000 a 7.500 MPA, sendo o maior valor para mistura de 30% de RAP.

Nas misturas avaliadas por Bohn (2017), cujos teores foram de 25 e 50 % de RAP, os valores de MR obtidos para amostras dosadas com CAP 50/70 foram de 9.500 a 13.000MPa e para os dosados com CAP 60-85 modificado por polímero enquadraram na faixa de 9.900 a 14.200 MPa. Na presente pesquisa, isso também foi observado, ou seja, misturas com maiores teores de incorporação de RAP apresentaram os maiores valores MR.

El-Maaty *et al* (2015) avaliaram misturas com teores de incorporação de 25, 50, 75 e 100% de RAP, cujos resultados de MR seguiram o mesmo comportamento das demais pesquisas aqui mencionadas, e a mistura com 100% de RAP apresentou um valor de MR acrescido de três vezes o valor encontrado numa mistura convencional de CA, dado que os autores avaliaram as misturas para um tempo de condicionamento de 7 dias.

Por outro lado, Luzzi (2019) analisou misturas com percentual de incorporação de 10, 20 e 30% de RAP, sendo que os valores de MR foram acrescidos conforme aumentava-se o teor de RAP, estando os valores observados, numa faixa de 9.266 a 11.020 MPa, estando a mistura com 20% de RAP com o maior MR obtido.

Suzuki (2019) avaliou misturas com teores de 10, 20, 35, 50 e 65% sem incorporação de AR, e teores de 25 e 50% com adição de AR. Em suas observações, as misturas seguiram o mesmo comportamento que foram listados pelos outros autores, sendo que para misturas sem agente rejuvenescedor os valores de MR obtidos foram na faixa de 5.075 a 8.656 MPa para maior teor incorporado, e para aquelas que tiveram inserção de AR, os valores variaram de 6.692 a 6.397 MPa. Entretanto, o MR da mistura convencional observado pela autora foi de 7.316 MPa, dado volume de vazios da mistura em torno de 4%.

Assim, nota-se que os valores obtidos na presente pesquisa seguem o mesmo comportamento listado pela literatura.

Por meio da relação do módulo de resiliência com a resistência a tração, é possível estabelecer uma expectativa do desempenho a fadiga das misturas, em função das misturas mais rígidas apresentarem valores elevados na relação, presume-se que estas não apresentem um bom comportamento a vida de fadiga. Entretanto essa relação não substitui a determinação por meio de ensaios específicos, cujo desempenho a fadiga dessas misturas foi avaliado por meio da determinação por tensão controlada através do ensaio de fadiga por compressão diametral, cujos

resultados estão abordados mais a frente.

#### 4.6.5 Módulo Dinâmico

A caracterização viscoelástica das misturas recicladas a quente, foi realizada para três corpos de prova (prismáticos) de cada teor, cuja varredura de frequência foi efetuada nos valores de 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 25 Hz e temperaturas de 5, 15, 25 e 35°C para então obtenção do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e do ângulo de fase ( $\phi$ ). A deformação aplicada nos CP's foi de 50 $\mu\epsilon$  a fim de se evitar o dano precoce, com 200 repetições por ciclo de carregamento, e pulso senoidal conforme descrito no capítulo 3.

A curva mestra para as misturas asfálticas recicladas foi obtida segundo a Equação 2.7 e por meio de simplificações no software Excel. A metodologia de apoio utilizada foi a mesma adotada por Mello (2008) *apud* Nunes (2017), sendo que os resultados encontrados se deram por meio da execução dos ensaios na prensa IPC global, por meio do uso do software UTS018 em consonância a normativa EN12967/26. Após essa etapa, os resultados foram migrados para uma planilha do Excel que calcula as variáveis necessárias, estabelecendo uma referência da função sigmoidal que melhor representa os valores obtidos na execução ensaio, conforme realizado por Nunes (2017).

Os valores obtidos durante a execução do ensaio de módulo dinâmico são exibidos nas Tabelas 4.17, 4.18 e 4.19.

**Tabela 4-17** Dados de MD para mistura reciclada MAR-R100.

<b>MAR - R100</b>							
<b>Temp.</b> (°C)	<b>Freq.</b> (Hz)	<b> E*  (MPa)</b>			<b>Ângulo de fase ( ° )</b>		
		<b>Amostra I</b>	<b>Amostra II</b>	<b>Amostra III</b>	<b>Amostra I</b>	<b>Amostra II</b>	<b>Amostra III</b>
5	25	6,45E+03	6,47E+03	5,83E+03	7,4	8,6	8,3
5	20	6,39E+03	6,43E+03	5,85E+03	7,2	8,4	8,2
5	10	6,23E+03	6,16E+03	5,54E+03	7,5	8,5	8,4
5	5	5,84E+03	5,84E+03	5,29E+03	8,1	9,1	9,1
5	2	5,09E+03	5,32E+03	4,92E+03	9,3	10,3	10,3
5	1	4,86E+03	4,94E+03	4,51E+03	10,6	11,3	11,3
5	0,5	4,47E+03	4,52E+03	4,10E+03	11,8	12,5	12,5
5	0,2	4,01E+03	4,01E+03	3,65E+03	13,5	14,3	14,1
5	0,1	3,61E+03	3,64E+03	3,23E+03	14,7	15,7	15,5
15	25	3,87E+03	4,12E+03	3,49E+03	15,2	15,4	14,6
15	20	3,85E+03	4,12E+03	3,54E+03	14,3	14,3	14,3
15	10	3,63E+03	3,96E+03	3,33E+03	14,7	14,5	14,6
15	5	3,39E+03	3,82E+03	3,21E+03	15,6	17	15,7
15	2	2,80E+03	3,31E+03	2,76E+03	17,5	18,6	17,2
15	1	2,57E+03	2,76E+03	2,36E+03	19,1	20,1	18,6
15	0,5	2,25E+03	2,45E+03	2,09E+03	20,5	21,6	20,1
15	0,2	1,89E+03	2,12E+03	1,68E+03	22,5	23,7	21,9
15	0,1	1,65E+03	1,87E+03	1,46E+03	23,8	25,4	23,2
25	25	2,03E+03	2,12E+03	2,04E+03	25,5	23,7	24
25	20	2,01E+03	2,22E+03	2,14E+03	23,7	22,3	22,9
25	10	1,85E+03	1,98E+03	1,94E+03	23,4	22,1	22,7
25	5	1,75E+03	1,85E+03	1,89E+03	25	23,2	24,1
25	2	1,30E+03	1,45E+03	1,41E+03	26,9	25,5	26,2
25	1	1,09E+03	1,23E+03	1,15E+03	28,4	26,9	28,2
25	0,5	9,32E+02	1,07E+03	9,95E+02	29,6	28,2	29,4
25	0,2	7,67E+02	8,72E+02	7,73E+02	30,6	29,5	30,6
25	0,1	6,70E+02	7,46E+02	6,86E+02	31	30,2	31,6
35	25	8,27E+02	9,26E+02	8,34E+02	47,3	43,1	46,4
35	20	8,07E+02	9,65E+02	8,13E+02	39,7	37,4	40,1
35	10	7,33E+02	8,90E+02	8,12E+02	34,2	33,3	35,6
35	5	6,39E+02	7,34E+02	6,72E+02	33,2	33	35,4
35	2	4,67E+02	6,03E+02	5,01E+02	32,7	32,6	35,4
35	1	4,25E+02	4,78E+02	4,27E+02	32	32,2	35
35	0,5	3,45E+02	4,07E+02	3,55E+02	30,9	31,5	34,4
35	0,2	2,96E+02	3,34E+02	3,04E+02	29,3	29,7	33,5
35	0,1	2,82E+02	3,31E+02	2,40E+02	27,9	28,2	32,7

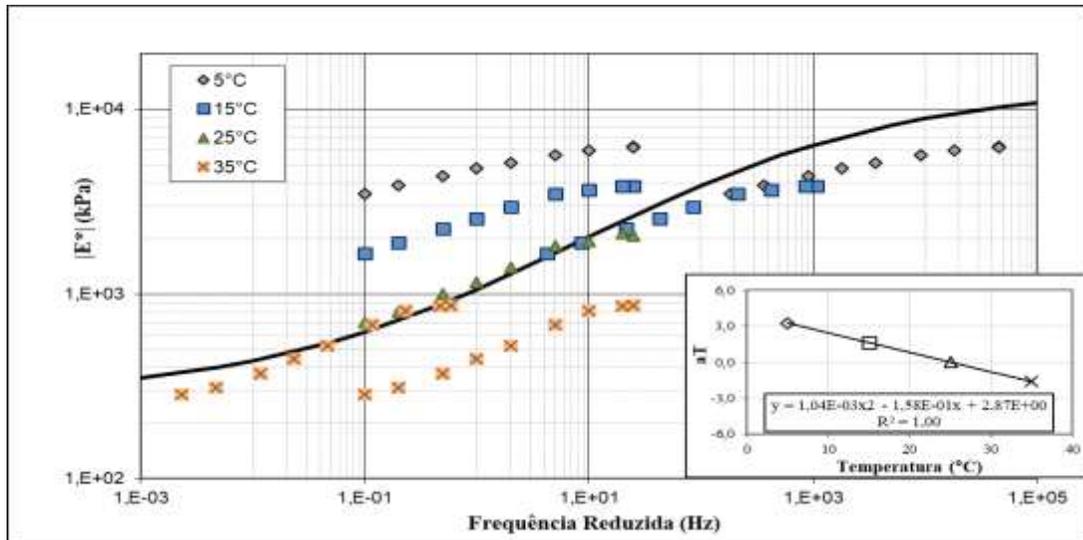
**Tabela 4-18** Dados de MD para mistura reciclada MAR-R45.

MAR-R45							
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	[E*] (MPa)			Ângulo de fase (°)		
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Amostra I	Amostra II	Amostra III
5	25	6,74E+03	9,00E+03	8,41E+03	9,9	7,6	8,1
5	20	6,67E+03	8,91E+03	8,34E+03	9,8	7,6	8
5	10	6,35E+03	8,45E+03	7,93E+03	10,1	7,9	8,4
5	5	5,90E+03	7,97E+03	7,34E+03	10,8	8,8	9,1
5	2	5,10E+03	6,82E+03	6,73E+03	12,8	10,2	10,6
5	1	4,71E+03	6,57E+03	6,15E+03	14,3	11,6	11,8
5	0,5	4,17E+03	5,97E+03	5,56E+03	16,1	13,2	13,2
5	0,2	3,54E+03	5,23E+03	4,78E+03	18,5	15,5	15,2
5	0,1	3,11E+03	4,52E+03	4,31E+03	20,5	17,2	16,7
15	25	3,99E+03	5,91E+03	5,39E+03	17,7	14,7	14,1
15	20	3,99E+03	5,84E+03	5,41E+03	17,3	14,6	13,7
15	10	3,69E+03	5,43E+03	5,02E+03	18,1	15,4	14,4
15	5	3,55E+03	5,04E+03	4,56E+03	19,6	16,7	15,1
15	2	2,74E+03	4,07E+03	3,95E+03	22,2	19,3	18,5
15	1	2,30E+03	3,63E+03	3,33E+03	24,3	21,5	20,4
15	0,5	1,95E+03	3,15E+03	2,92E+03	26,4	23,6	22,4
15	0,2	1,54E+03	2,58E+03	2,34E+03	29,1	26,3	25
15	0,1	1,31E+03	2,17E+03	2,02E+03	30,9	28,4	26,7
25	25	1,89E+03	3,02E+03	2,85E+03	31,4	26,5	26,5
25	20	2,01E+03	2,95E+03	2,88E+03	29,5	25,7	25,3
25	10	1,66E+03	2,58E+03	2,47E+03	29,2	26,4	25,8
25	5	1,45E+03	2,26E+03	2,35E+03	30,3	28,3	27,6
25	2	1,10E+03	1,81E+03	1,72E+03	32,6	31	30,3
25	1	8,97E+02	1,47E+03	1,43E+03	34,1	32,9	32,2
25	0,5	7,58E+02	1,23E+03	1,17E+03	35,1	34,3	33,6
25	0,2	6,13E+02	9,47E+02	9,40E+02	35,2	35,5	34,5
25	0,1	5,08E+02	8,25E+02	8,00E+02	34,8	35,6	34,5
35	25	5,87E+02	1,02E+03	1,01E+03	67	52	49,8
35	20	5,73E+02	9,66E+02	9,89E+02	53	45,9	43,7
35	10	5,72E+02	8,86E+02	8,06E+02	42,7	41,1	38,7
35	5	4,42E+02	6,88E+02	6,93E+02	39,5	40	37,5
35	2	3,85E+02	5,10E+02	5,43E+02	36,8	39,2	36,2
35	1	2,79E+02	4,39E+02	4,67E+02	34,6	37,9	34,9
35	0,5	2,37E+02	3,84E+02	3,78E+02	32	36,2	33,3
35	0,2	2,28E+02	3,22E+02	3,24E+02	28,8	33,2	30,5
35	0,1	2,16E+02	2,90E+02	3,00E+02	28,3	31,3	29,3

**Tabela 4-19** Dados de MD para mistura reciclada MAR-R25.

MAR-R25							
Temp. (°C)	Freq. (Hz)	E*  (MPa)			Ângulo de fase (°)		
		Amostra I	Amostra II	Amostra III	Amostra I	Amostra II	Amostra III
5	25	6,18E+03	7,71E+03	7,42E+03	10,8	9,9	9,2
5	20	6,06E+03	7,65E+03	7,40E+03	10,5	9,9	8,9
5	10	5,84E+03	7,15E+03	7,01E+03	11,2	10,4	9,3
5	5	5,41E+03	6,65E+03	6,55E+03	12,1	11,4	10,2
5	2	5,03E+03	5,76E+03	5,83E+03	13,8	13	11,8
5	1	4,34E+03	5,40E+03	5,30E+03	15,4	14,4	13,2
5	0,5	3,87E+03	4,81E+03	4,85E+03	17	16	14,8
5	0,2	3,26E+03	4,04E+03	4,08E+03	19,2	18,1	16,9
5	0,1	2,96E+03	3,66E+03	3,74E+03	21	19,8	18,6
15	25	3,68E+03	4,81E+03	4,71E+03	18,4	17,4	16,1
15	20	3,68E+03	4,76E+03	4,67E+03	18	17	15,7
15	10	3,33E+03	4,32E+03	4,31E+03	18,8	17,9	16,5
15	5	3,20E+03	3,97E+03	3,96E+03	20	19,1	17,5
15	2	2,61E+03	3,35E+03	3,21E+03	22,7	21,9	20,4
15	1	2,19E+03	2,79E+03	2,82E+03	24,7	23,9	22,4
15	0,5	1,82E+03	2,37E+03	2,43E+03	26,7	25,8	24,5
15	0,2	1,45E+03	1,86E+03	1,95E+03	29,1	28,3	27,2
15	0,1	1,27E+03	1,56E+03	1,69E+03	30,8	29,8	29
25	25	1,82E+03	2,32E+03	2,39E+03	32,1	30	27,8
25	20	1,84E+03	2,35E+03	2,43E+03	30,3	28,6	26,7
25	10	1,60E+03	2,00E+03	2,09E+03	30	28,8	27
25	5	1,29E+03	1,73E+03	1,96E+03	31,3	30,3	28,6
25	2	1,07E+03	1,35E+03	1,41E+03	33,7	32,9	31
25	1	8,65E+02	1,11E+03	1,17E+03	35,2	34,5	32,6
25	0,5	7,04E+02	8,99E+02	9,76E+02	36	35,6	33,9
25	0,2	5,65E+02	6,88E+02	7,59E+02	36,8	36,5	35
25	0,1	5,00E+02	6,28E+02	6,64E+02	36,4	37,4	35,1
35	25	6,91E+02	7,49E+02	8,63E+02	62,7	55,7	51
35	20	6,19E+02	7,86E+02	8,72E+02	51,2	47,6	44,6
35	10	5,83E+02	6,73E+02	7,65E+02	42,3	41	39,8
35	5	4,64E+02	5,75E+02	6,45E+02	39,9	39	38,9
35	2	3,70E+02	4,03E+02	4,86E+02	37,7	37,3	37,9
35	1	2,96E+02	3,69E+02	3,85E+02	35,5	35,8	37,1
35	0,5	2,62E+02	3,22E+02	3,52E+02	33,3	33,6	35,2
35	0,2	2,48E+02	2,43E+02	2,71E+02	30,3	30,6	32,9
35	0,1	2,21E+02	2,18E+02	2,56E+02	30,1	28,3	30,9

Em análise a Tabela 4.17, para mistura MAR-R100 com incorporação de 100% de RAP, nota-se que conforme tem um aumento da temperatura de ensaio, se tem uma queda no valor do módulo dinâmico para o mesmo valor de frequência. E quando se reduz temperatura aplicada, observa-se que as frequências mais elevadas resultam em módulos mais elevados, conforma evidenciado na Figura 4.8 que mostra a curva mestra do módulo dinâmico para a mistura MAR-R100 e a relação entre o fator de translação com a temperatura de ensaio.



**Figura 4-8** Curva mestra para mistura MAR-R100 (Autor 2020).

Quanto ao ângulo de fase, de acordo com Nunes (2017) torna-se de fato corriqueiro observar o aumento dos valores conforme se tem um aumento de temperatura, fato este devido as misturas asfálticas quando sujeitas a temperaturas mais elevadas, perderem suas características elásticas, fazendo com que se apresente mais próximo de um material cujo comportamento é viscoso. A Figura 4.9 mostra essa situação de variabilidade do ângulo de fase conforme se reduz a frequência de ensaio, para os ensaios realizados nessa pesquisa.

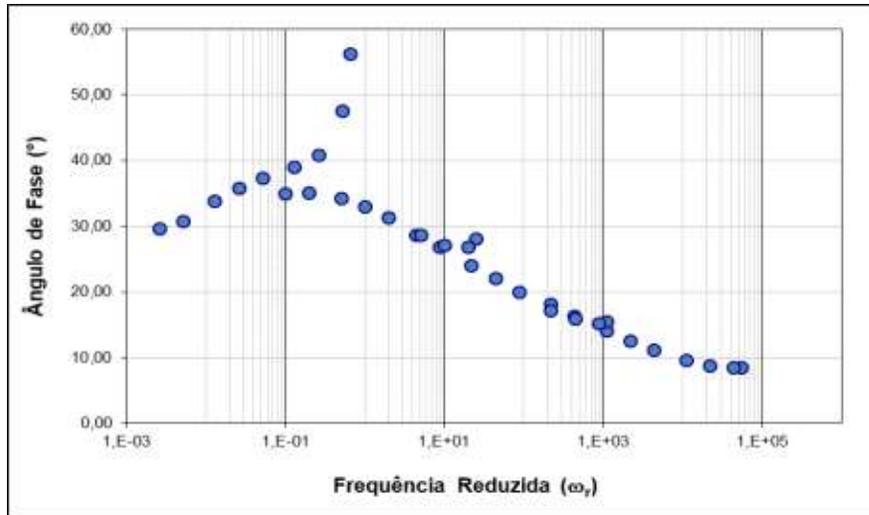


Figura 4-9 Variabilidade do ângulo de fase da mistura MAR-R100 (Autor 2020).

Para a mistura MAR-R45, correspondente a 45% de teor de RAP incorporado em massa, nota-se que esta apresentou o mesmo comportamento da mistura MAR-R 100. Houve um decréscimo do módulo dinâmico quando se tem o aumento da temperatura e conforme se diminui a frequência, bem como aumento do ângulo de fase para as temperaturas mais elevadas, mostrado nas Figuras 4.10 e 4.11.

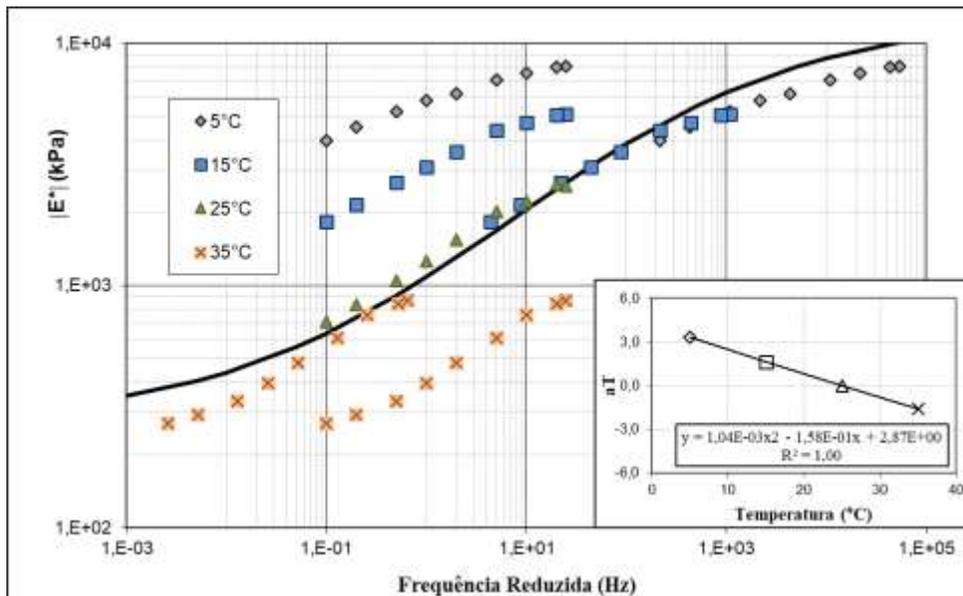
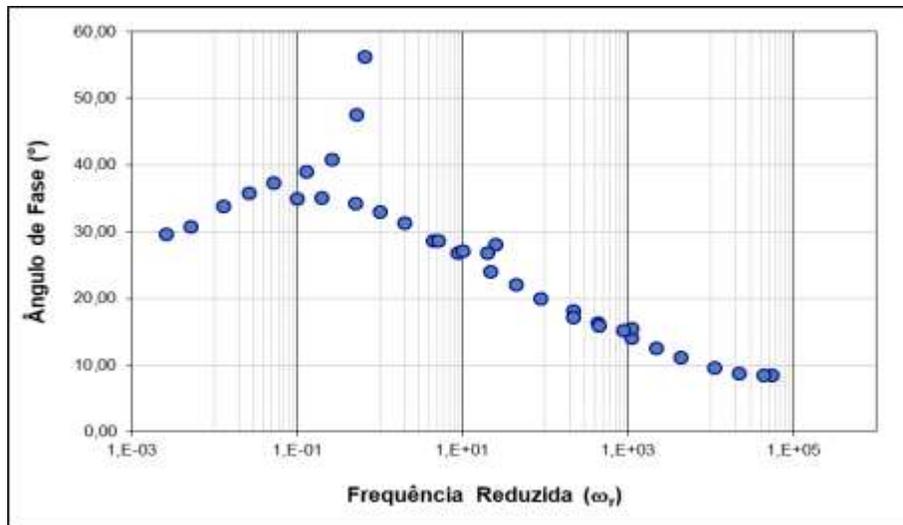
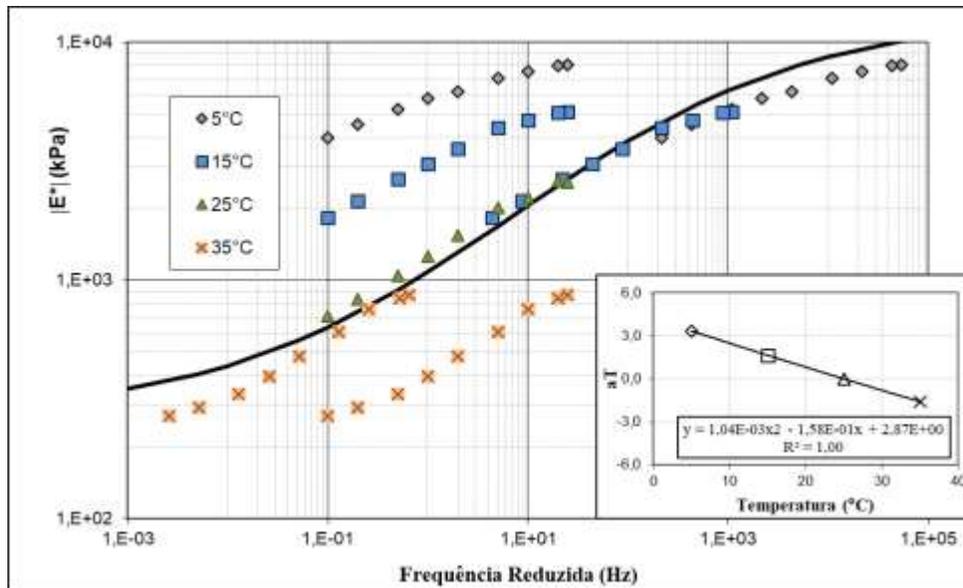


Figura 4-10 Curva mestra para mistura MAR-R45 (Autor 2020).

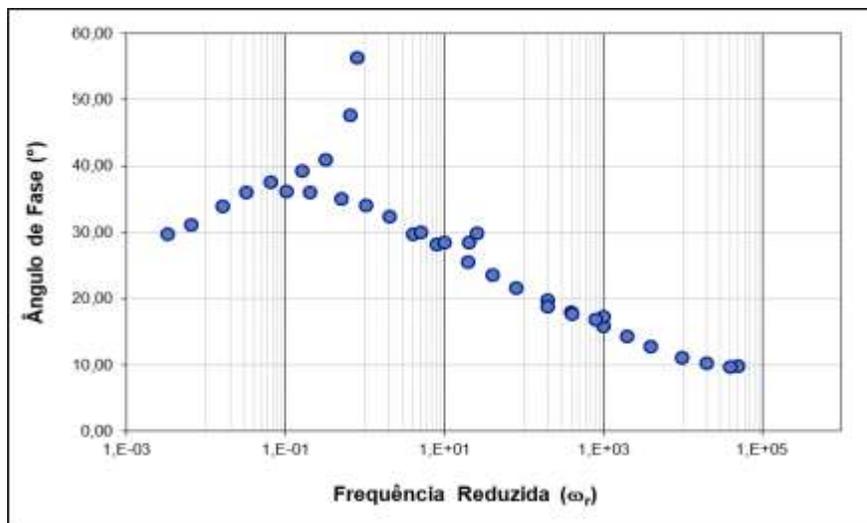


**Figura 4-11** Variabilidade do ângulo de fase da mistura MAR-R45 (Autor 2020).

A mistura com 25% de RAP, MAR-R25 apresentou módulos, bastante semelhantes aos obtidos na mistura MAR-R45, seguindo mesmo comportamento das demais misturas, com aumento do ângulo de fase conforme tem-se um acréscimo de temperatura, e diminuição do módulo de elasticidade com diminuição da frequência aplicada e aumento da temperatura. Essa mistura apresentou menor rigidez se comparada as de teores mais elevados, o que é comprovado pelo módulo resiliente realizado para as mesmas. A Figura 4.12 traz a curva mestra do módulo dinâmico para mistura MAR-25, e a Figura 4.13 mostra o comportamento do material devido ao aumento da temperatura, resultando em ângulos maiores.



**Figura 4-12** Curva mestra para mistura MAR-R25 (Autor 2020).



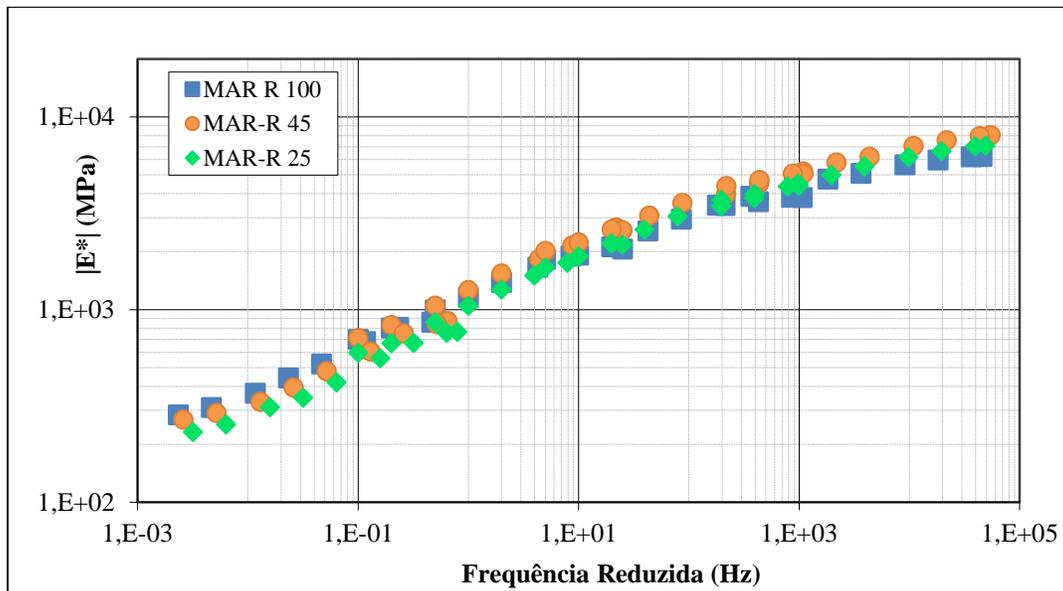
**Figura 4-13** Variabilidade do ângulo de fase da mistura MAR-R25 (Autor 2020).

De acordo com Suzuki (2019), a parcela de rigidez de uma mistura reciclada está relacionada a alguns fatores, sendo que o aumento da rigidez de uma mistura com incorporação de RAP, pode estar relacionado ao aumento da viscosidade do ligante oxidado remanescente, associado à ativação deste ligante, e também no modo como o material foi condicionado antes do processo de dosagem e compactação, que contribui para o aumento dos módulos.

Sendo assim, misturas mais rígidas podem ser favoráveis a resistência à deformação permanente considerando temperaturas mais altas, enquanto as com menor rigidez podem apresentar um melhor desempenho em temperaturas amenas e mais baixas, podendo ter assim, um

melhor desempenho quanto na vida de fadiga.

A Figura 4.14, traz as curvas mestras superpostas das três misturas recicladas, para as 4 temperaturas avaliadas e frequências aplicadas.



**Figura 4-14** Curva mestra do MD das misturas recicladas (Autor 2020).

Analisando a Figura 4.14, observa-se que as curvas mestras do módulo dinâmico das três misturas avaliadas apresentam uma similaridade de comportamento, com valores de módulos bem próximos. Nota-se também que entre os módulos obtidos, as misturas com 25% e 45% de RAP apresentaram paridade ao longo de toda superposição da curva, para as 4 temperaturas avaliadas e as frequências aplicadas, podendo notar também que a mistura de 45% RAP apresentou os maiores módulos entre as três misturas avaliadas, cujo volume de vazios da mistura foi de 4,38%.

Pode-se observar também que a mistura com maior percentual de agente rejuvenescedor e de RAP, apresentou valores de módulos um pouco inferiores em uma pequena zona de frequência e elevada temperatura, se comparada as que possuem um menor percentual de AR na sua composição, sendo que isto pode ser explicado pelo baixo desempenho de ativação do ligante remanescente presente no RAP. Em contrapartida, as misturas que receberam ligante virgem apresentaram módulos maiores, trazendo então, a percepção de que a ativação do ligante está diretamente ligada ao desempenho da mistura, e também devido a mistura apresentar um maior número de vazios se comparada as demais, o que afeta na parcela de rigidez e mais uma vez comprova que o ligante remanescente não foi ativado, podendo isso ser explicado pelo modo como

as placas foram compactadas.

Comparando os dados obtidos na presente pesquisa com a bibliografia, observa-se que Suzuki (2019) em sua pesquisa constatou que as misturas com menores teores de incorporação (25%) apresentou módulos similares a de uma mistura convencional de CA com CAP 50-70, enquanto as com teores maiores (50%), apresentaram módulos mais elevados e com menor volume de vazios, fato este também observado na presente pesquisa, quando se analisa a mistura com 25 e 45% de RAP.

Luzzi (2019) em sua pesquisa obteve dados superiores de MD conforme aumentava-se o percentual de incorporação de fresado, seguindo o mesmo comportamento de Suzuki (2019), entretanto a mistura convencional de referência apresentou módulo mais elevado se comparado as recicladas.

Nas misturas asfálticas estudadas por Bohn (2017), foram avaliadas misturas com 25 e 50% de incorporação de RAP, com uso do ligante convencional CAP 50/70 e modificado com CAP 60-85, cujos dados obtidos em ambas misturas seguiram mesmo comportamento das demais pesquisas, com maiores valores de módulos para menores temperaturas e maiores frequências.

A autora ainda observou que para misturas dosadas com CAP 50-70, o aumento dos valores de módulos foram proporcionais ao aumento do teor de RAP, enquanto para mistura dosada com o ligante modificado houve um comportamento diferente. Sendo que a mistura com 25% de RAP apresentou módulos maiores se comparada à mistura de referência e a com 50% de RAP.

Bohn (2017) constatou ainda que nas misturas com CAP 60-85 conforme se aumentava o percentual de fresado, houve a diminuição do ângulo de fase, deduzindo assim a importância do ligante modificado na obtenção da parcela elástica.

Basueny (2016), avaliaram misturas com até 40% de RAP, e obteve resultados com comportamento similar ao desta pesquisa. A mistura com maior teor de RAP apresentou módulos menores que as com menores teores, fato este explicado pelos autores, devido o ligante remanescente oriundo do RAP estar oxidado e não ter sido ativado, resultando na formação de microfissuras, o que também foi notado por Suzuki (2019).

Centofante (2016) verificou em suas análises que a mistura com 10% de RAP possuía maior rigidez comparada a de 20%, e constatou que as misturas com maiores teores apresentaram ângulo de fase com valores maiores, inferindo que a parcela mais relevante seria a viscosa.

Deste modo, percebe-se uma certa tendência em se ter o aumento do módulo complexo

em função de um aumento do teor de RAP. Entretanto, observa-se uma certa disparidade quanto os percentuais de incorporação, dado que o volume de vazios da mistura relacionado a ativação do ligante asfáltico remanescente (parcela de viscosidade) afeta diretamente na obtenção do módulo.

#### 4.6.6 Comportamento à fadiga por compressão diametral das misturas recicladas

O comportamento à fadiga das misturas recicladas a quente seguiu os parâmetros do ensaio de determinação da fadiga por tensão controlada seguindo as recomendações da metodologia do ensaio de fadiga por compressão diametral (ensaio brasileiro) cuja temperatura de ensaio foi de 25°C.

Foram realizadas análises para 4 níveis de carregamento (tensão aplicada entre 5 e 40% do obtido no RT), sendo que para cada nível de tensão foram ensaiados 3 corpos de prova, para as misturas de 25, 45 e 100% de RAP, buscando assim determinar a relação de vida de fadiga por diferença de tensão ( $N \times \Delta\sigma$ ) mostrado na Figura 4.15, e vida de fadiga por deformação resiliente ( $N \times \epsilon_r$ ) conforme ilustrado na Figura 4.16.

As curvas de fadiga foram plotadas mediante uma linha de tendência do tipo potencial, buscando-se obter o maior  $R^2$ , que representa o ajuste da linha em relação aos pontos, sendo que valores próximos de 1 representam menores dispersões dos pontos, e de acordo com a normativa é requerido q este valor seja superior a 0,8.

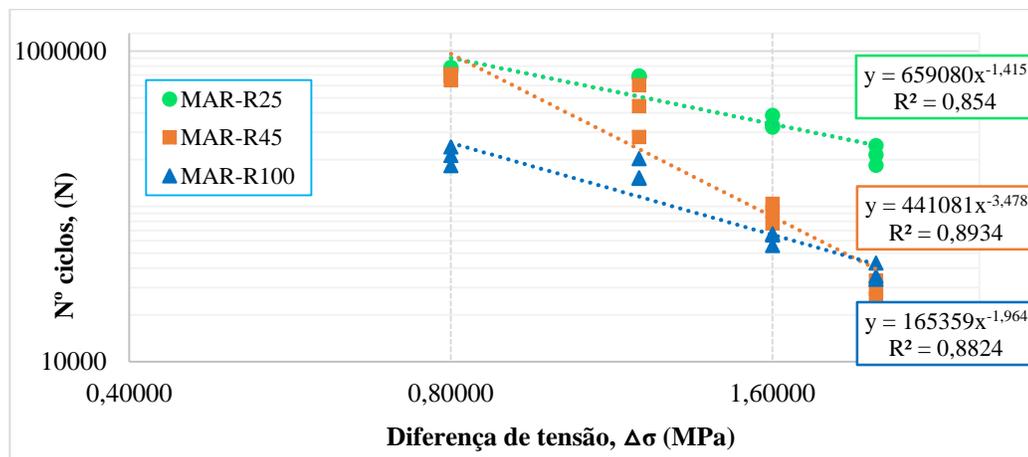
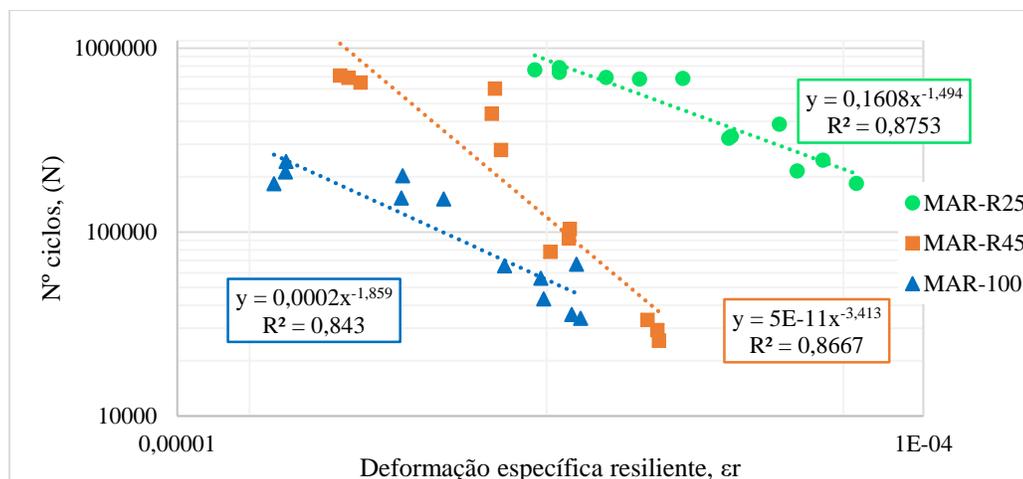


Figura 4-15 Vida de fadiga por diferença de tensão das misturas recicladas (Autor 2020).



**Figura 4-16** Vida de fadiga por deformação resiliente das misturas recicladas (Autor 2020).

Analisando a Figura 4.16, que ilustra a vida de fadiga pela deformação resiliente das misturas, nota-se que a mistura com menor rigidez apresentou um melhor desempenho ao trincamento por fadiga se comparada as demais. Observa-se que a mistura com 45% de RAP apresentou os dados mais críticos devida pontual queda da curva (linha de tendência), o que indica que o material, se aplicado em campo, apresentaria um trincamento brusco da camada de revestimento, estando essa então com uma baixa vida de fadiga.

Assim, é possível notar que a vida de fadiga de uma mistura está relacionada com a rigidez da mesma, fato este observado na mistura com 25% de RAP que obteve os menores valores de rigidez e conseqüentemente apresentou melhor desempenho a vida de fadiga com menor taxa de trincamento. A Tabela 4.20, apresenta a rigidez média inicial, juntamente com os coeficientes K0 e K1 das misturas recicladas analisadas.

**Tabela 4-20** Rigidez das misturas recicladas.

Mistura	Nº de CP's	Coeficientes de regressão		R <sup>2</sup>	Rigidez média (MPa)
		K <sub>0</sub>	K <sub>1</sub>		
MAR -R100	12	0,002	-1,494	0,843	1,14E+04
MAR- R45	12	5,00E-11	-3,413	0,8667	5,66E+03
MAR- R25	12	0,1608	-1,859	0,8753	4,24E+03

Luzzi (2019) avaliou misturas com 10, 20 e 30% de RAP além de uma mistura convencional de referência, e na determinação da vida de fadiga foi adotado o método de tração-compressão (ensaio uniaxial cíclico) por meio do modelo S-VECD, como as curvas características de dano (C

vs S) e envoltórias de ruptura do critério de falha GR.

O autor constatou que para mistura com 30% de incorporação tinha-se um maior dano acumulado se comparada as demais, enquanto a convencional apresentava o menor dano, fato este devido a elevada parcela de rigidez das misturas recicladas. Entretanto, as 4 misturas estudadas pelo autor romperam no intervalo de 0,3 e 0,5 de integridade de material, e a mistura de 20% de incorporação apresentou melhores resultados a fadiga.

Suzuki (2019) analisou a vida de fadiga por deformação controlada para as misturas com 25% e 50% de RAP com e sem incorporação de AR, e constatou que a mistura com 25%, apresentou uma vida de fadiga baixa com trincamento precoce se comparado à mistura de referência. Os resultados também mostraram que o agente rejuvenescedor melhorou a vida de fadiga da mistura reciclada, análise essa constatada pela diminuição da inclinação da curva de fadiga de uma mistura com AR comparada com a de uma mistura que não recebeu AR.

Por outro lado, para a mistura com 50% de incorporação de RAP sem AR, a situação foi contrária, estando o comportamento a fadiga bem próximo da mistura de referência, indicando uma boa resistência ao trincamento dessa mistura. Isso pode ser explicado pela ativação do ligante modificado quando aquecido no processo de usinagem. Para mistura com 50% de RAP e com AR, a curva de fadiga da mistura reciclada ultrapassou a da mistura de referência, sendo que a mistura apresentou a menor rigidez comparada as demais.

Silva (2018) avaliou a vida de fadiga em misturas recicladas com 100% de RAP, rejuvenescidas com diferentes teores de AR (15, 20 e 25%) para diferentes tipologias, e em uma mistura de referência convencional com material virgem. Em suas conclusões, observou que a vida de fadiga de ambas misturas apresentou comportamento similar.

Embora os resultados laboratoriais da presente pesquisa indiquem um bom comportamento das misturas com RAP para baixos teores, deve-se realizar análises por meio de outros métodos de ensaio de determinação da vida de fadiga, a fim de avaliar o desempenho das misturas recicladas para teores mais elevados, visto a grande eficácia do material fresado tanto em seu desempenho mecânico quanto no aspecto sustentável. Sendo assim foram moldados corpos de prova prismáticos para os três teores avaliados na presente pesquisa, contudo em função do tempo não foi possível realizar a análise da fadiga por meio da metodologia de deformação controlada através do ensaio de fadiga por flexão em 4 pontos.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas no decorrer da pesquisa, embasada nos parâmetros de dosagens e dos ensaios de caracterização e desempenho mecânico das misturas asfálticas recicladas a quente analisadas, bem como apresenta algumas sugestões de trabalhos futuro.

### **5.1 CONCLUSÕES**

A fadiga é uma das patologias mais recorrentes presentes nos pavimentos flexíveis. Com desenvolvimento de pesquisas de órgãos regulamentadores em parceria com centros de pesquisa, são desenvolvidas novas técnicas de dimensionamento de pavimentos asfálticos e metodologias de dosagem de revestimentos, buscando assim, conceber pavimentos que apresentem maiores vida de fadiga.

A utilização de materiais alternativos, a modificação de aglomerantes, bem como utilização de agentes rejuvenescedores e correções granulométricas, têm sido parâmetros avaliados por centros de pesquisas para concepção de pavimentos mais duráveis e funcionais, garantindo uma melhora significativa no desempenho da infraestrutura ao trincamento por fadiga e a deformação permanente.

Diversos tipos de materiais têm sido estudados e avaliados como componentes de misturas asfálticas, com objetivo de elevar o desempenho das mesmas, e dentre estes materiais o RAP tem ganhado cada vez mais espaço no cenário na pavimentação, devido ao fato de se tratar de um material nobre, cujas propriedades são equiparadas ou até superiores às de uma mistura convencional.

Além disso, o RAP pode apresentar como um material cuja aplicabilidade é economicamente sustentável, pois o material que antes era destinado ao descarte, passa a compor a matriz granulométrica de novas misturas, com menores índices de exploração de jazidas naturais e menor deposição de resíduos sólidos, tendo este, aplicabilidade tanto para misturas frias, mornas e ou quentes, e com distintos teores de incorporação em massa. Tudo isso faz com que o material tenha impacto econômico, devido à redução de custos logísticos de DMT, usinagem e operacionalidade em alguns canteiros de obra.

Assim, a presente pesquisa buscou avaliar o desempenho à fadiga por tensão controlada de

misturas recicladas a quente na região de Goiás, cuja matriz rodoviária tem papel bastante importante no que tange aos deslocamentos e ligações logísticas do país e da região. Com duas grandes rodovias Federais, BR 153 e GO 060, além das estaduais, as mesmas ligam o norte e sudeste do país, proporcionando condições estratégicas para o transporte de cargas e passageiros.

O material estudado nesta pesquisa foi oriundo da GO 060, no KM 180, rodovia essa que liga a capital do estado de Goiás à capital Federal. Foram produzidas misturas recicladas com incorporação de 25, 45 e 100% de RAP, percentuais estes escolhidos em consonância com recomendações da literatura, cujo enfoque se deu na previsão da vida de fadiga.

Foi observado que as misturas estudadas se enquadraram dentro dos limites mínimos e máximos recomendados por normativas e manuais técnicos, preconizados pelo DNIT e também pela metodologia SuperPave, onde parâmetros de volume de vazios, densidade medida e aparente foram satisfatórias e até superiores aos de misturas recicladas e convencionais observados na literatura consultada.

Com relação ao desempenho mecânico das misturas, conclui-se que as configurações estudadas apresentam elevada rigidez, proporcional ao teor de RAP incorporado, sendo que misturas com teores elevados apresentaram mais rígidas se comparadas a misturas com menores teores ou ainda a misturas convencionais consultadas.

A rigidez das misturas recicladas deve-se principalmente ao condicionamento do material e a viscosidade do ligante remanescente presente no RAP atrelado ao volume de vazios, onde pelo fato do material conter ligante oxidado, esse passa a ter um comportamento mais viscoso, e quando aquecido tende a desempenhar a propriedade de ativar o ligante remanescente.

Outra observação importante, se deve ao fato de que nas misturas avaliadas, a configuração MAR-R100 com 100% de RAP, apresentou resistência a tração e módulos de resiliência superiores aos da mistura cujo teores foram menores (MAR-R25 e MAR-R45), fato este explicado pela maior rigidez da mistura se comparada as demais.

A rigidez da mistura contribui na capacidade do material de armazenar energia. Isso ocorre devido ao fato dos agregados de origem mineral resistirem bem a compressão, e o agregado negro oriundo do RAP juntamente com a película de ligante remanescente tende a apresentar um comportamento mais viscoso, que favorece o desempenho do material quando sujeito a esforços de tração.

Nota-se também que a parcela de coesão exerce papel fundamental no desempenho da

mistura. Esse parâmetro foi avaliado quando se analisou a resistência retida à tração das misturas, o que levou a observar que a coesão da mistura está diretamente relacionada a rigidez das mesmas.

Logo, misturas mais rígidas apresentaram maior coesão, o que gera uma maior ligação entre ligante e agregado, e o ligante oxidado quando ativado aumenta essa parcela de coesão na mistura, fazendo com que a mistura tenha menor perda de adesão quando submetida ao efeito deletério da água. Essa relação foi confirmada por meio dos resultados de adesividade e o dano por umidade induzida nas misturas avaliadas estarem em patamares adequados de desempenho.

Devido os maiores valores de módulos terem sido obtidos nas misturas com maior percentual de incorporação de RAP em massa, presumia-se que a mistura teria um bom comportamento a deformação permanente, porém uma baixa vida de fadiga, com maiores índices de desgastes nas misturas mais rígidas sob temperaturas mais baixas.

Esse fato foi confirmado ao avaliar o desgaste das misturas submetidos a uma temperatura de 25°C, uma vez que a mistura em temperatura ambiente enrijecia sua composição devido parcela de ligante oxidado, apresentando assim, uma baixa resistência ao desgaste por Abrasão. Isso ocorre em razão do choque por impacto, relacionado com o número de vazios da mistura (elevado), favorecer o micro trincamento, gerando assim a perda de massa da amostra quando ensaiada, aqui representada pelo desprendimento de material em campo devido o trincamento do revestimento quando solicitado.

Os dados de módulo dinâmico confirmam tal fato, onde as misturas com teores mais elevados tendem a apresentar valores maiores. Entretanto, em temperatura de ensaio maiores houve uma tendência a apresentar ângulos de fase maiores devida ativação do ligante que aumenta o comportamento viscoso do material, pois mesmo nas misturas com elevados teores de RAP (as mais rígidas), estas tendem a apresentar trincamento em menores temperaturas.

Deste modo, ao avaliar a fadiga das misturas asfálticas recicladas da presente pesquisa nota-se que ocorreu o que se havia presumido em função dos dados dos ensaios de RT, RRT, MR e MD. Quanto maior a parcela de rigidez da mistura, menor a vida de fadiga da mesma, e consequentemente maior o desempenho a deformação permanente.

As misturas recicladas avaliadas apresentaram bom comportamento nos principais índices de avaliação de desempenho mecânico das misturas asfálticas, com valores de módulos superiores ao de misturas convencionais, de acordo com bibliografia existente. Observou-se também que quanto maior o percentual de incorporação de RAP, melhores são os resultados, devido

proporcionalidade de taxa de RAP por rigidez da mistura.

Além disso, conclui-se também que elevada parcela de rigidez desfavorece a vida de fadiga das misturas recicladas para altos teores, bem como volume de vazios alto, onde misturas com maiores índices de vazios e com elevada rigidez tendem a apresentar um trincamento precoce, e apresentar um plano de ruptura pontual.

Contudo, dentre as misturas avaliadas a mistura com 25% de RAP cuja rigidez é inferior as demais apresentou um melhor comportamento à vida de fadiga. Entretanto, essa conclusão não despreza que haja incorporações com maiores teores, fato este que a mistura com 100% de RAP apresentou melhor desempenho a fadiga se comparada a de 45%.

Esse comportamento pode ser explicado pela propriedade do agente rejuvenescedor diminuir a rigidez das misturas recicladas, análise perceptível com a suavização da curva de fadiga, observada também por outros pesquisadores. Entretanto cabe realizar análises mais detalhadas e precisas sobre o real comportamento do agente rejuvenescedor na mistura.

Nota-se que a fadiga juntamente com a deformação permanente tem sido o principal obstáculo para obtenção de pavimentos de alto desempenho, e fazendo análise aos dados provenientes da pesquisa, presume-se que as misturas recicladas apresentem dados satisfatórios a deformação permanente.

Entretanto, dada necessidade de se conceber pavimentos mais duráveis, e que apresentem de fato uma vida de fadiga elevada, e dado princípio da sustentabilidade, os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que a técnica de reciclagem de pavimentos é bastante eficaz. Levando a concluir que as misturas com 25% de RAP podem ser aplicadas em obras de pavimentação no estado de Goiás, seja para serviços de execução de novas camadas de revestimento de pavimentos e ou em serviços de conservação.

Porém é necessário que sejam executadas análises com aplicação de outros métodos de determinação da vida de fadiga, afim de prever comportamento para outros teores de incorporações de RAP, além de análises para observar parâmetros que não puderam ser obtidos neste trabalho, tais como efeito do agente rejuvenescedor na ativação do ligante oxidado, e sua influência no desempenho das misturas recicladas à quente dado seu percentual de incorporação.

## **5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Em função das análises realizadas durante este trabalho, tendo em vista a necessidade de

conhecimento de outros parâmetros sugere-se como trabalhos futuros:

- Dosar mistura convencional de CA (micaxisto e CAP 50-70) e adotar como parâmetro de mistura de referência;
- Realizar caracterização reológica (LAS, DSR, MSCR) para ligante remanescente recuperado e CAP 50-70 virgem;
- Realizar análise de espectrofotometria e cromatografia SARA para ligante oxidado, no intuito de avaliar as frações remanescentes no ligante e como poderia ser recuperados por meio da inserção de agentes rejuvenescedores;
- Analisar dados do ensaio de fadiga por flexão em 4 pontos, para misturas com mesmo teores de RAP;
- Efetuar análises de MAF e LAS nas misturas recicladas;
- Estudar o desempenho à deformação permanente, por meio de análises de Flow test, Creep dinâmico e estático, além de ensaios em placas por meio do ensaio de DWT;

## REFERÊNCIAS

ASTM - American Society for Testing and Materials (2012) *D 2872 - Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (RollingThin-Film Oven Test)*.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2015) *D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2010) *D 7460 – Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending*.

ARSHAD, A. K., AWANG, H., SHAFFIE, E., HASHIM, W., RAHMAN, Z. A. (2017) Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt with Different Proportions of RAP Content. International Conference on Civil & Environmental Engineering (CENVIRON) Penang, Malaysia.

ASPHALT INSTITUTE. (1986) Asphalt Hot-Mix Recycling. Manual Series n. 20 (MS-20). Second Edition. College Park, Maryland, USA.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. December, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15897- Misturas asfálticas à quente – Preparação de corpos de prova com compactador giratório Superpave. Rio de Janeiro, 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. Standard Specifications for SUPERPAVE Volumetric Mix Design. AASHTO MP2, Washington, D. C., 2001.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAYS TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO - T 378: Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). EUA, 2017, 2p.

ABNT-NBR 15184: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004, 4p.

ABNT- NBR 11341: Derivados de Petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2014, 18p.

ABNT- NBR 6560: Materiais betuminosos – Determinação do ponto de - amolecimento - Método do anel e bola. Versão Corrigida. Rio de Janeiro, 2016. 7p.

ABNT- NBR 6576: Materiais asfálticos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007, 7p.

ABNT- NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2012a, 6p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T321: Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending. Washington, DC, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D7460: Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending, Philadelphia, 2010

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2041/2005**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. EUA, 5 p.

ARAO, M. (2014) Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas. 2014. 61 p. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil.

ARSHAD, A. K.; MOHAMMAD, M.; SHAFFIE, E.; HASHIM, W.& HALIM, A. G. B. (2016) Volumetric Analysis and performance of hot mix asphalt with variable RAP content. MATEC Web of Conferences 103:09004.

ARRA-Asphalt Recycling and Reclaiming Association (2009) *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book*. U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.

BALBO, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 558 p. ISBN 9788586238567.

BAPTISTA, A. M. C. (2006) *Misturas Betuminosas Recicladas à quente em Central: Contribuição para o seu estudo e aplicação*. 340 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.

BARRA, B. S. (2009) *Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas*. 327 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

BASUENY, A. (2016) *Complex modulus and fatigue behaviour of recycled hot mix asphalt: laboratory investigation and modelling at the material levels*. 506 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Superior de Tecnologia da universidade de Quebec, Canadá.

BASTOS, J. B. S.; J. B. SOARES; L. A. H. Nascimento. (2017) *Crerios Para os Resultados do Ensaio Uniaxial de Carga Repetida de Misturas Asfálticas em Laborat3rio a partir do desempenho em Campo*. Transportes, v. 25, n. 2, p. 19-40.

BENTO, F. T. A. M. (2010) *Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente*. Dissertaç3o (Mestrado) 149 p. Engenharia Civil. Instituto T3cnico da Universidade T3cnica de Lisboa.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2008) *Pavimentaç3o Asfáltica: Formaç3o B3sica para Engenheiros*. Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 475 p.

BOEIRA, F. D., PINHEIRO, G. S., SPECHT, L. P., DRUZIAN, E. L., JUST, M. L., BABADOPULOS, L. F. A. L., NASCIMENTO, L. A. H., PEREIRA, D. S. (2018) *Projeto e implementaç3o de ensaio de fadiga por traç3o-compress3o direta (uniaxial) para avaliaç3o de dano em misturas asfálticas*. 2018. Mat3ria (Rio J.) vol.23 no.3 Rio de Janeiro . Doi: 10.1590/s1517-707620180003.0482.

BOHN, K. A. (2017) *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Pol3mero*. 255 p. Dissertaç3o (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

BONAQUIST, R., WITCZAK, M. W., VON QUINTUS, H., KALOUSH, K. E. (1999). *Specimen Geometry and Aggregate Size Lab Test Study. Superpave Support and Performance Models Management, NCHRP 9-19, Task F – Advanced Mixture Characterization, Team Report SLS-03, Vol. I, Arizona State University, Arizona, EUA, 132 pg.*

BONFIM, V. (2016) Fresagem de Pavimentos Asfálticos. São Paulo. Exceção Editorial, 3ª Ed. 127 p.

BUDNY, J. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas. 2012. 137p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CAPITÃO, S.D. (2003). Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

CENTOFANTE, R. (2016) Estudo Laboratorial da Utilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas à quente. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

CEZARO JUNIOR, T. Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

CHRISTENSEN, R. M. (2003). Theory of Viscoelasticity. Dover Publications, Inc, 2nd Ed. New York, USA, 364 pg.

COLPO, G. B. (2014) Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Vida de Quatro Pontos. 155p. Dissertação (mestrado) Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CUNHA, C. M. (2010) Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Diferentes Tipos de Reciclagem. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal.

DENNEMAN, E. (2013) Review of the AG/PT-233 fatigue test protocol and its link to structural pavement design. Brisbane, 15th AAPA - International Flexible Pavement Conference.

DI BENEDETTO, H., LA ROCHE, D., BAAJ, H., PRONK, A. (2004) Fatigue of bituminous mixtures, *Materials and Structures*, v. 37, pp. 202-216, Abril.

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. (2004) Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: from binders to mixes. Road Materials and Pavements Design. Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE) 41p.

DNER-ME 089/94: Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994

DNER-ME 085: Material finamente pulverizado - Determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994a. 4p.

DNER-ME 084: Agregado miúdo - Determinação da Densidade real. Rio de Janeiro, 1995a. 3p.

DNER-ME 081: Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998b. 6p.

DNER-ME 054: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997, 10p.

DNER-ME 086: Agregado – Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, 1994b. 5p.

DNER-ME 035: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998c. 6p.

DNER-ME 078: Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994c. 3p.

DNER-ME 163: Materiais Betuminosos - Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 1998d. 6p.

DNER-ME 043: Misturas Betuminosas à quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995b, 11p.

DNER-ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999, 02p.

DNIT. ES 033: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico reciclado à quente na usina. Rio de Janeiro, 2005. 13 p.

DNIT. ME 180/2010: Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

DNIT. IPR 720: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. 2º ed. Rio de Janeiro, 2006, 310 p.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2005) 032-ES – Pavimentos flexíveis – Areia-Asfalto a quente.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2019) 412-ME – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010) 155-ME – Material asfáltico – Determinação da penetração.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010) 131-ME – Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 178-PRO – Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 136-ME – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 135-ME – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018) 183-ME – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006) 031-ES – Concreto asfáltico.

DNIT (2018). Relatório de Gestão do DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasil. 246 p.

DON BROCK J.; RICHMOND J. L. Milling and recycling. Technical Paper T-127, ASTEC. INC., Chatanooga, USA, 2007.

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

EL-MAATY, A. E. A.; ELMOHR, A. I. (2015) Characterization of Recycled Asphalt Pavement (RAP) for Use in Flexible Pavement. American Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol 8, Issue 2, pg 233-248. Dubai, UAE.

EAPA – European Asphalt Pavement Association. The use of Warm-Mix Asphalt. 2019.

EN – European Standard (2004) 12697-24 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue.*

EN – European Standard (2004) 12697-26 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness.*

EVANGELISTA JR, F. (2006) Análise quasi-Estática e Dinâmica de Pavimentos Asfálticos. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

FILHO, W. U. (2019) Estudo de Mistura Asfáltica Reciclada a Frio Produzida com 100% de Revestimento Asfáltico Fresado e Agente de Reciclagem Emulsionado. 169 p. Dissertação (Mestrado) Engenharia de Transportes- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FONTES, L. P. T. L. (2009) Otimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos. 545 f. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho.

FREIRE, J., GÓIS, T. S., DOMINICINI, W. K., LUTIF, J. (2014) O Estado da Arte sobre o Uso do Reciclado de Pavimento Asfáltico na Pavimentação do Brasil e do Mundo. ANPET, Curitiba.

GENNESSEAU, M. M. L. (2015) Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas à quente e

mornas contendo material fresado. 182 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

HAGHSHENAS, H. F., NABIZADEH, H., KIM, Y-R., SANTOSH, K. (2016) Research on High-RAP Asphalt Mixtures with Rejuvenators and WMA Additives. University of Nebraska-Lincoln, Report N° SPR-P1(15) M016. Lincoln, p. 66.

HUANG, B. & VUKOSAVLJEVIC, D. (2004) Laboratory study of fatigue characteristics of HMA surface mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP). TRB Annual Meeting Transportation Research Board of National Academies, Washington, D.C.

HUANG, B.; LI, G.; VUKOSAVLJEVIC, D.; SHU, X.; EGAN, B.K. (2005). Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board No. 1929, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 37–45.

IWANAGA, F. I. (2007). Avaliação da influência do tipo de agregado, do tipo do ligante, do tipo de moldagem e do tipo de Fíler na vida de fadiga de misturas asfálticas densas. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da USP, São Paulo.

KANDHAL, P. M.; MALLICK, R. B. (1997). Pavement recycling guidelines for state and local governments-participant's reference book. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, Report Number FHWA-SA-98-042.

KEARNEY, E. J., HUFFMAN, J. E. (1999) Full Depth Reclamation Process. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1684, TRB, National Research Council, Washington, D.C. Estados Unidos.

LIMA, A. T. Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas à quente. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2003.

LOUREIRO, T. G. (2003) Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LUZZI, F. C. (2019) Adaptação de Usina para Reciclagem a Quente e Avaliação Laboratorial das Misturas Asfálticas Produzidas. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

MAMLOUK, M.; SOULIMAN, M.; ZEIADA, W. Optimum Testing Conditions to Measure HMA Fatigue and Healing Using Flexural Bending Test. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board. USA, 2012.

MARTINEZ, J. G. B. (2014). Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas com Adição de Lodos de ETA e de ETE. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

MEDINA, J. (2006) Mecânica dos pavimentos/ Jacques de Medina. Rio de Janeiro: Ed. da UFRJ, 1997. 380p. ISBN 85711082006.

Medina, J., (2005). Mecânica dos Pavimentos. Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

MELLO, D. (2012) Avaliação da adição de Evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo. 261p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MELLO, L. G. R. (2008). A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 263 p.

MELO, J. V. S. (2014) Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos. 2014. 414 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

MORILHA JUNIOR, A. (2004) Estudo sobre a ação dos modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas. 2004. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

NAPA - National Asphalt Pavement Association. (2013) Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2009-2012.

NAPA – National Asphalt Pavement Association (2014). Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2009-2013.

NAPA. (2015) Best Practices for RAP and RAS Management. Quality Improvement Series 129. Lanham, Maryland, EUA, 44 p.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY. NCAT Researchers Explore Multiple Uses of Rejuvenators. Disponível em: <<http://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/info-pubs/newsletters/atnspring2014.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2019

NUNES, C. L. (2017) Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto Borracha de 4ª Geração. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.

OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; ABREU, L. P. F.; PEREIRA, P. A. A. (2012). Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol. 53, N°3, pp. 266–275. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.09.879.

OLIVEIRA, J. A. de. Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo. (2013). 139p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração: Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

OLIVEIRA, M. S., AZEVEDO, C. P., FARIAS, P. C.A., (2020) Applicability of PAVEAIR for Airport Pavement Management: Comparison between Military and Civilian Runways. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, v. 14, p. 360-367.

OLIVEIRA, M. S. (2018) Avaliação funcional da infraestrutura aeroportuária de um aeródromo militar por meio da análise comparativa de medidas de irregularidade superficial. 58p. Engenharia civil da mobilidade- Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, Anápolis.

PAIS, J.C., (1999). Consideração da Propagação de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

PRADYUMNA, T. A.; MITTAL, A.; JAIN, P.K. (2013) Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. 2° Conference of Transportation Research Group of India. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 104, p. 1149-1157.

Pesquisa CNT de Rodovias 2019 - (2019) PRINCIPAIS DADOS. Disponível em: [https://cms\\_pesquisarodovias.cnt.org.br/PDFs/Resumo\\_Principais\\_Dados\\_Pesquisa\\_CNT\\_2019\\_FINAL.pdf](https://cms_pesquisarodovias.cnt.org.br/PDFs/Resumo_Principais_Dados_Pesquisa_CNT_2019_FINAL.pdf) ACESSO EM: 26/08/2020.

PICADO-SANTOS, L.G., BRANCO, F.; Pereira, P.A.A.;. (2005). Pavimentos Rodoviários. Edições Almedina, S.A., Portugal.

PINTARELLI, M. G. (2017) Comportamento de misturas asfálticas com relação ao fenômeno de fadiga – estudo de comparação entre as normas ASTM D7460, AASHTO T321 e EN 12697-2. 2017. 131 p. Trabalho de conclusão de curso (graduação)- Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, Florianópolis.

PINTO, S. (1991) Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

QUINTERO, C. F.(2016) Influência da temperatura e da consistência do ligante na fadiga e no módulo complexo de misturas asfálticas. 2016. 264 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

ROSSATO, F. P. (2015). 221p. Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

RUIZ, E. F, C. A. T. D'ÁVILA, C. A. (2012). Deformation Analysis of a Geogrid-Reinforced Pavement. Second Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition. GeoAmericas. Lima, Perú.

SACHET, T. (2007) Controle tecnológico de obras rodoviárias envolvendo a reciclagem *in situ* de bases granulares de pavimentos asfálticos. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Rio Grande do Sul.

SEGUNDO, I. G. R; BRANCO, V. T. F. C; VASCONCELOS, K. L; HOLANDA, A. S.(2016) Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. Transportes, v. 24, p. 85-94.

SHRP, (1993). SHRP – P – 338, Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA.

SILVA, J. P. S. (2011) Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. 2011. 145 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SILVA, P. F. A. (2009) Manual de patologia e manutenção de pavimentos. 2. ed. São Paulo: Pini, 128p.

SILVA, J. P. S; FARIAS, M. M. (2018). Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas. Revista Matéria – UFRJ. V.23 n°03. DOI: [doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0523](https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0523)

SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M.; ABRAHIM, I. A. (2011) Avaliação do efeito do calor e do ar no envelhecimento de Ligantes Asfálticos utilizando o Modelo de Arrhenius. In: 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C / Exposição Internacional de Produtos para Rodovias. Foz do Iguaçu/PR. BRASVIAS.

SILVA, J. P. S., FARIAS, M. M. (2020) Estudos laboratoriais para determinação do comportamento da vida de fadiga de misturas asfálticas rejuvenescidas. TRANSPORTES (RIO DE JANEIRO), v. 28, p. 111-121. DOI: [10.14295/transportes.v27i4.1869](https://doi.org/10.14295/transportes.v27i4.1869).

SPECHT, L. P.; HIRSH, F.; ROZEK, T. M.; CERATTI, J. A. P. (2006) Estudo laboratorial da adesividade de misturas asfálticas preparadas com ligante convencional e modificado considerando o teor de fíler e a forma do agregado. 37ª Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia.

SPECHT, L. P., PIRES, G. M., VITORELLO, T., HIRSH, F., CRONST, F., BERGMANN, E. C., TIEFENSEE, M. D. (2013) Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. In: 42ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro: ABPv.

SPEIGHT, James G.(2016) Asphalt Materials Science and Technology. Waltham: Butterworth-Heinemann.

SUZUKI, K. (2019) Avaliação do percentual de material fresado em misturas asfálticas recicladas à quente e aplicação em projetos de restauração de pavimentos. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

TAYEBALI, A. A., DEACON, J. A., COPLANTZ, J. S., HARVEY, J. T., MONISMITH, C. L. (1994). Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mix. Part II – Extended Test Program. Strategic Highway Research Program – SHRP-A-404, National research Council.

TEIXEIRA, G. B. ; BEZERRA, H. B. ; BORGES, P. A. B. ; REZENDE, L. R. ; Prandina, J.A. (2017). Utilização de misturas de resíduo de corte de rochas ornamentais, cascalho laterítico e asfalto fresado na pavimentação. In: Geocentro 2017, Goiânia. ABMS, p. 849-854

UNDERWOOD, B.S., BAEK, C., KIM, Y.R.(2012) Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2296-1, pp. 36-45.

KIM, R. Y.(2009) Modeling of asphalt concrete. 1º ed. McGraw-Hill. p. 460. New York.

KIM, S. Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture. (2006) 142p. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Florida, Gainesville.

VAN DIJK, W. & VISSER, W. (1977) The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, V.46, pp. 1-37.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. (2003) Projeto de Misturas de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente com Diferentes Teores de Material Fresado. In: Anais do XII CONGRESSO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO – CILA.

VASCONCELOS, K. L. (2004) Comportamento mecânico de misturas asfálticas à quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias. 149 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

VASCONCELOS, Kamilla L. GUATIMOSIM, FREDERICO V. BERNUCCI, LIEDI L. B. JENKINS, KIM J. (2016) Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt. Road Materials and Pavement Design; v. 19, p. 385-399. DOI: [10.1080/14680629.2016.1261726](https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1261726).

VASCONCELOS, K. L.(2020) Reciclagem a Quente/Morna de Misturas Asfálticas: Desafios e Perspectivas. Apresentação de palestra nos Encontros Semanais da Rede de Tecnologia em Asfalto, XVII Workshop.

VALDÉS, G., PÉREZ-JIMÉNEZ, F., MIRÓ, R., MARTÍNEZ, A., BOTELLA, R. (2011) Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement RAP. Construction and Building Materials, Vol. 25, p. 1289-1297. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016. 2011.

WEST, R., KVASNAK, A., TRAN, N., POWELL, B., TURNER, P. (2009) Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2126. Transportation Research Board of the National Academies, Washington.

WEST, R., WILLIS, J. R., MARASTEANU, M. (2013) Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content.. NCHRP 752. Project Number 09-46. Auburn, AL.

WIRTGEN GROUP. (2012) Cold Recycling: Wirtgen Cold Recycling Technology. Windhagen, Germany, 367 p.

ZHAO, S.,HUANG, B., SHU, X., WOODS, M.(2013) Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. Construction and Building Materials, v. 44, p. 92-100.