

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDA GADLER

DESEMPENHO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
MORNAS PRODUZIDAS COM REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO E  
AGREGADO DE RESÍDUO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO DA FRAÇÃO  
GRAÚDA E MIÚDA DA GRANULOMETRIA

CURITIBA

2018

FERNANDA GADLER

DESEMPENHO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
MORNAS PRODUZIDAS COM REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO E  
AGREGADO DE RESÍDUO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO DA FRAÇÃO  
GRAÚDA E MIÚDA DA GRANULOMETRIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Fagundes  
Rosemback Miranda

Coorientador: Prof. Dr. Joe Arnaldo Villena  
Del Carpio

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

---

G124d

Gadler, Fernanda

Desempenho e propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas produzidas com revestimento asfáltico fresado e agregado de resíduo de concreto em substituição da fração graúda e miúda da granulometria / Fernanda Gadler. – Curitiba, 2018.  
163 p. : il. color.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2018.

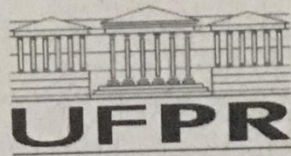
Orientador: Leonardo Fagundes Rosembach Miranda.  
Coorientador: Joe Arnaldo Villena Del Carpio.

1. Misturas asfálticas recicladas. 2. Revestimento asfáltico fresado. 3. Agregado de resíduo de concreto. 4. Deformação permanente. I. Universidade Federal do Paraná. II. Miranda, Leonardo Fagundes Rosembach. III. Villena Del Carpio, Joe Arnaldo. IV. Título.

CDD: 625.85

---

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **FERNANDA GADLER** intitulada: **DESEMPENHO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS PRODUZIDAS COM REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO E AGREGADO DE RESÍDUO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO DA FRAÇÃO GRAÚDA E MIÚDA DA GRANULOMETRIA**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

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

Curitiba, 13 de Abril de 2018.

JOE ARNALDO VILLENA DEL CARPIO  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

JOSÉ MARQUES FILHO  
Avaliador Interno (UFPR)

LIEDI LEGI BARIANI BERNUCCI  
Avaliador Externo (USP)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. De maneira especial gostaria de agradecer:

Ao meu orientador, professor Leonardo Miranda, que me recebeu na UFPR e acreditou em mim, desde o princípio, muitas vezes mais do que eu mesma. Obrigada por me ensinar tanto. Professor, nesses últimos meses você me mostrou lições ainda maiores de perseverança, de força e de garra. Você é um grande exemplo para mim.

Ao meu coorientador, professor Joe Villena, que me acolheu nesses últimos meses onde a ansiedade beirava o desespero. Obrigada por ser sempre paciente e positivo, me guiando com sabedoria para que eu pudesse desenvolver e concluir o trabalho.

À professora Liedi Bernucci, que tive o prazer de ter como membro da minha banca de qualificação. Obrigada por todas as críticas e contribuições ao trabalho e, mais ainda, por fazer isso de forma tão generosa e competente. Obrigada ao professor José Marques Filho, por aceitar o convite para ser membro da banca avaliadora.

À Ana Obana, a melhor aluna de IC que uma mestranda poderia ter como sua parceira de trabalho. Obrigada por todo o trabalho, alegrias e por todo o carinho compartilhado.

Aos alunos de graduação Aline, Viviane e Dieudonne, por toda a ajuda no laboratório.

À Thaísa Rocha, a quem posso chamar de minha irmã-acadêmica. Obrigada por tudo que tem feito por mim, principalmente nesses últimos meses tão atribulados. Suas palavras me acalmaram e me motivaram, obrigada de coração!

À Lígia Real, que me ajudou desde o processo seletivo de mestrado, naquela época sem ao menos me conhecer pessoalmente, demonstrando a pessoa generosa e de coração maravilhoso que ela é.

À Afirma Engenharia, em nome do professor Mário Henrique Furtado Andrade e do técnico Gerson, obrigada por todo apoio e disponibilidade. À Nova Prata Mineração pela doação dos agregados e ligante asfáltico, à Betunel Indústria e Comércio Ltda. pela doação do AR e à Ingevity pelo fornecimento do aditivo surfactante.

Ao Laboratório de Polímeros Paulo Scarpa (LaPPS) da UFPR, em nome da professora Leni Akcelrud e do pós-doutorando Denis Turcheti, pelo apoio nos ensaios utilizando o Rotoevaporador.

Ao Laboratório de Pavimentação da UFSC, em nome do professor João Victor Staub e do professor Glicério Trichês, pelo apoio e disponibilidade para realização dos ensaios de deformação permanente no simulador de tráfego.

Ao Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP), da UFPR, que foi minha segunda casa durante esses dois anos e à professora Daniane Vicentini por todas as dúvidas esclarecidas. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC/UFPR) e à CAPES pela bolsa concedida. À Deus que renova minhas forças todos os dias através da minha fé.

E, por fim, meu agradecimento mais especial não poderia deixar de ser para minha família. Às minhas avós, Olga e Ignêz, e minha tia Lizene pelas orações diárias que me fazem forte. À minha tia Maria Tereza que sempre me incentivou e torceu por mim. Ao meu tio Alceu que sempre vibrou muito com as minhas conquistas e tenho certeza que hoje olha por mim lá do céu. Agradeço de modo muito especial ao meu pai, Éder, que fez o possível e o impossível para que eu conseguisse finalizar meus ensaios. Pai, sem você eu não teria conseguido. A minha mãe, Lindamir, que é meu maior exemplo, minha melhor amiga e conselheira para todas as horas, e ao meu irmão, Diego, por todo o apoio. Ao meu amor, Lucas, que suportou minha ansiedade, meus medos e inseguranças, sempre com uma palavra de incentivo e de amor, tornando a jornada muito mais leve. Minha família amada, cada caractere deste trabalho tem um pouco de vocês!

“Milhões viram a maçã cair, mas foi Newton quem perguntou por quê.”

Bernard M. Baruch

## RESUMO

O constante crescimento da população, somado ao incremento do padrão de vida, tem como consequência um aumento significativo da produção de resíduos. No caso da construção de estradas, grandes quantidades de recursos naturais são utilizadas ao mesmo tempo em que grandes quantidades de resíduos também são geradas. Esse contrassenso reflete, de maneira evidente, a necessidade da busca constante por metodologias e processos de reciclagem dos materiais utilizados na construção civil, sobretudo aqueles consumidos pela indústria da pavimentação asfáltica. Neste sentido, a presente pesquisa tem o objetivo de avaliar o desempenho das misturas asfálticas mornas confeccionadas com o emprego dos dois resíduos, revestimento asfáltico fresado e agregado de resíduo de concreto, além da verificação da influência da incorporação dos mesmos, nas frações graúda e miúda da granulometria, nos parâmetros de módulo de resiliência, vida de fadiga, deformação permanente e dano por umidade induzida das misturas asfálticas. Foram produzidas cinco misturas com incorporação dos resíduos, em diferentes frações granulométricas (graúda e/ou miúda). O tipo de ligante asfáltico, a faixa granulométrica escolhida e o aditivo surfactante para produção de misturas mornas, foram mantidos constantes. A variável de controle do estudo é a fração em que cada resíduo foi incorporado, ora graúda, ora miúda ou ambas. Os resultados obtidos indicam que há influência tanto do tipo de resíduo incorporado quanto da fração em que o mesmo é disposto, no desempenho das misturas. O aumento do teor ótimo de ligante asfáltico das misturas é diretamente proporcional à quantidade e ao tamanho do agregado de resíduo de concreto incorporado. Ainda, o ligante asfáltico é o componente que exerce maior influência no módulo de resiliência das misturas. O dano por umidade induzida das misturas estudadas foi satisfatório, ficando dentro dos limites aceitáveis. Quanto à deformação permanente, as misturas com menor teor de ligante foram as que obtiveram melhor desempenho, com destaque para a mistura com incorporação de agregado de resíduo de concreto na fração graúda e revestimento asfáltico fresado na fração miúda, que alcançou resultados próximos aos da mistura de referência, atendendo ao limite aceitável de afundamento para rodovias de baixo volume de tráfego. A vida de fadiga das misturas com incorporação de resíduos, independente do tipo e da fração, apresentaram desempenho superior se comparadas com a mistura de referência. A mistura com incorporação de agregado de resíduo de concreto na fração graúda e revestimento asfáltico fresado na fração miúda foi a que, a partir do dimensionamento de uma estrutura hipotética, resistiria a um número de ciclos de carregamento maior. De forma geral, os resultados obtidos pela presente pesquisa corroboram a hipótese de que é possível produzir misturas recicladas mornas com desempenho satisfatório, sendo que a composição conjunta dos dois resíduos, tanto na fração graúda quanto na miúda, apresenta desempenho superior em comparação as misturas compostas por 100% de cada um dos resíduos isoladamente. Essas misturas se apresentam como uma alternativa econômica, ambiental e tecnicamente viável para pavimentação, principalmente para vias de baixo volume de tráfego.

**Palavras-chave:** Misturas asfálticas recicladas, revestimento asfáltico fresado, agregado de resíduo de concreto, fadiga, deformação permanente.



## ABSTRACT

The population and its standard of living has been growing exponentially, with the consequence of a significant increase in the production of waste. The pavement industry consumes many natural resources and generates large amounts of waste. This contradiction reflects, of eleven evident, the demand of the specific method and manufacturing processes to recycle as many as possible all the materials used by the civil construction industry; specially those consumed by asphalt paving. In this sense, the present research has the objective of evaluating the asphalt mixtures made with the use of the two types of waste, reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate. Moreover, it aims to verify the influence of the same residues, in the course or fine fractions of the gradation, in the resilient modulus, fatigue, rutting and water susceptibility of the asphalt mixtures. Five mixtures were produced with said wastes in different fractions of gradation (fine and/or course). The type of asphalt binder, the gradation and the surfactant additive for the production of warm mixtures, were keep constant. The control variable is the fraction in which it has been increasingly incorporated, sometimes course, sometimes fine, or both. The results obtained indicate that there is influence of both the type of incorporated waste and the fraction in which it is disposed. The increase of the optimum binder content is directly related to the amount and size of the incorporated recycled concrete aggregate. In addition, the asphalt binder is the component that exerts greater influence on the resilient modulus of the mixtures. The water susceptibility of the mixtures studied was satisfactory, within acceptable limits. As for the rutting, the mixtures with the low binder content were the ones that obtained better performance, especially the mixture with incorporation of recycled concrete aggregate in course and reclaimed asphalt pavement in fine, which obtained results close to the reference mixture, within acceptable limits of rutting for low traffic highways. The fatigue life of mixtures incorporating wastes, regardless of type and gradation, presented superior performance when compared to the reference mixture. The mixture with incorporation of recycled concrete aggregate in course and reclaimed asphalt pavement in fine was the one that, from the design of a hypothetical structure, would withstand a greater number of loading cycles. In general, the results obtained by the present research corroborate the hypothesis that it is possible to produce warm recycled mixtures with satisfactory performance, and the combined composition of the two residues, in both the course and fine gradation, presents a superior performance in compared to mixtures composed of 100% of each of the residues alone. These mixtures are presented as an economical, environmentally and technically feasible alternative for paving, especially for low traffic roads.

**Keywords:** Recycled asphalt mixtures, reclaimed asphalt pavement, recycled concrete aggregate, fatigue cracking, rutting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por País (valores em km/1.000km <sup>2</sup> ). .....	25
Figura 2 - Visão geral das divisões das peneiras de controle do método Bailey.....	34
Figura 3 - Esquema método de seleção da massa unitária escolhida – Método Bailey. ....	36
Figura 4 - Custo de uma mistura reciclada com RAP.....	43
Figura 5 - Correlação entre teor de ligante e % de incorporação de ARC em misturas asfálticas. ....	49
Figura 6 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados). ....	53
Figura 7 – Aditivos para mistura morna (a) ceras (b) surfactante.....	55
Figura 8 - Coleta CAP – tanque Usina Nova Prata. ....	64
Figura 9 – Agregado natural (a) brita 1; (b) pedrisco; (c) pó de pedra. ....	65
Figura 10 – Agregado reciclado – (a) brita; (b) pedrisco; (c) pó de pedra .....	66
Figura 11 - Depósito de material fresado (local de coleta). ....	67
Figura 12 – Aditivo mistura morna.....	68
Figura 13 – Agente rejuvenescedor – CYCLOPAV 900.....	68
Figura 14 – Etapas de pesquisa.....	70
Figura 15 – Secagem RAP.....	71
Figura 16 - (a) peneiramento para eliminar grumos (b) grumos maiores 25mm descartados.....	71
Figura 17 - (a) molde de papel filtro; (b) colocação amostra no molde; (c) extrator Soxhlet com amostra e solvente; (d) extração em andamento; (e) etapa final de extração-solvente límpido; (f) secagem superficial; (g) amostra após secagem em estufa. ....	73
Figura 18 – Frações do RAP - (a) graúda; (b) miúda; (c) total. ....	74
Figura 19 - Determinação massa unitária solta e compactada - RAP graúdo após extração.....	75
Figura 20 - Separação do solvente e do CAP utilizando o Rotoevaporador. ....	76
Figura 21 – Ligante recuperado RAP com adição de AR em teores de 20 a 40%. ...	77
Figura 22 - Agregados com falta de recobrimento do ligante - mistura ARC- (a) teor de ligante 4,0%; (b) teor de ligante 6,0%. ....	80
Figura 23 – Amostra para o ensaio RICE.....	80
Figura 24 - Misturador mecânico utilizado para produção das misturas. ....	81
Figura 25 – (a) compactador giratório utilizado para produção dos corpos de prova; (b) corpo de prova compactado.....	82
Figura 26– (a) RAP temp. ambiente; (b) RAP aquecido por 15 minutos; (c) incorporação de ARC; (d) mistura dos agregados 200s; (e) adição de ligante virgem; (f) mistura completa 500s.....	85
Figura 27 - Equipamento utilizado para mistura mecânica do ligante com o aditivo surfactante.....	86
Figura 28 - Curva viscosidade (Brookfield) versus temperatura – CAP 50/70 e CAP envelhecido + 40% AR. ....	87
Figura 29 - Volume de vazios em função do número de giros (CGS) – misturas mornas. ....	88
Figura 30 - Prensa Marshall – determinação da resistência à tração estática. ....	90

Figura 31 – Ensaio de fadiga tensão 20% da RT: não cumprimento critério de ruptura – mistura GRAP_MARC.....	91
Figura 32 - Ensaio de fadiga tensão 20% da RT: não cumprimento critério de ruptura – mistura GARC_MRAP.....	91
Figura 33 - Ensaio vida de fadiga (a) prensa universal (b) carregamento.....	92
Figura 34 - Mesa compactadora de placas para ensaio de deformação permanente.....	94
Figura 35 - Registro dos afundamentos – ensaio de deformação permanente.....	95
Figura 36 - (a) saturação parcial CP's; (b) congelamento (-18°C) por 16h; (c) banho a 60°C por 24h; (d) rompimento CP resistência à tração.....	96
Figura 37 – Características da estrutura de pavimento utilizada para o dimensionamento.....	98
Figura 38 – Características do carregamento aplicado no dimensionamento e pontos de análise.....	99
Figura 39 – RAP antes e após extração - (a) fração graúda; (b) fração miúda; (c) fração total.....	101
Figura 40 – Curva granulométrica agregado natural – brita, pedrisco e pó de pedra.....	103
Figura 41– Curva granulométrica ARC – brita, pedrisco e pó de pedra.....	104
Figura 42 – RAP – Forma dos agregados do RAP antes e após extração.....	106
Figura 43 – Granulometria RAP – antes e após extração.....	106
Figura 44 – RAP fração graúda (a) antes extração; (b) após extração – elevada quantidade de finos após extração.....	107
Figura 45 – Curva viscosidade (Brookfield) versus temperatura – CAP 50/70; CAP envelhecido com 20%, 30% e 40% de AR.....	108
Figura 46 - Curvas granulométricas misturas estudadas.....	110
Figura 47 - Curvas dos parâmetros determinados na dosagem – mistura REF.....	112
Figura 48 – Curvas dos parâmetros determinados na dosagem – mistura GM_ARC.....	113
Figura 49 - Curvas dos parâmetros determinados na dosagem – mistura GRAP_MARC.....	114
Figura 50 - Curvas dos parâmetros determinados na dosagem – mistura GRAP_MARC.....	115
Figura 51 – Volume de vazios da mistura GM_RAP com diversos teores de AR. ..	117
Figura 52 – Relação betume/vazios da mistura GM_RAP com diversos teores de AR.....	117
Figura 53 – CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura REF.....	120
Figura 54 - CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura GM_RAP.....	121
Figura 55 - CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura GM_ARC.....	122
Figura 56 - CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura GARC_MRAP.....	122
Figura 57 - CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura GRAP_MARC.....	123
Figura 58 – Resultado dos ensaios de deformação permanente das misturas estudadas.....	124
Figura 59 – Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura REF.....	125
Figura 60 - Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura GARC_MRAP.....	126

Figura 61 – Deformação excessiva logo após condicionamento mistura GM_ARC. ....	126
Figura 62 – Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura GM_ARC. ....	127
Figura 63 - Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura GM_RAP. ....	128
Figura 64 - Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura GRAP_MARC – (a) Placa 1; (b) Placa 2. ....	129
Figura 65 – Resultado dos ensaios de MR misturas estudadas.....	130
Figura 66 – Vida de fadiga versus diferença de tensões.....	134
Figura 67 - Vida de fadiga versus deformação específica resiliente. ....	134
Figura 68 - Vida de fadiga versus diferença de tensões – critério deslocamento atuador.....	136
Figura 69 - Vida de fadiga versus deformação específica resiliente – critério deslocamento atuador.....	136
Figura 70 – Teor de ligante das misturas estudadas.....	140

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Peneiras de controle de acordo com o TMN.....	34
Tabela 2 - Limites para parâmetros de misturas de agregados combinados pelo Método Bailey.....	37
Tabela 3 - Distribuição da produção de RAP e sua utilização em pavimentação no ano de 2014.....	41
Tabela 4 - Distribuição da produção de RAP e sua utilização em pavimentação no ano de 2015.....	42
Tabela 5 – Especificação brasileira de agentes rejuvenecedores para misturas a quente.....	48
Tabela 6 - Diretrizes para seleção do ligante asfáltico em misturas com RAP.....	51
Tabela 7 - Caracterização CAP 50/70 fornecido pelo fornecedor.....	64
Tabela 8 – Características AR – CYCLOPAV 900.....	69
Tabela 9 – Quantidade de corpos de prova ensaiados.....	78
Tabela 10 - Temperaturas de usinagem e compactação das misturas.....	89
Tabela 11 - Resultados extração Soxhlet – teor de ligante asfáltico.....	100
Tabela 12 - Resultados caracterização agregado natural.....	102
Tabela 13 - Resultados caracterização ARC.....	103
Tabela 14 – Resultados de caracterização do RAP após extração – fração graúda e miúda.....	105
Tabela 15 – Resultados caracterização ligante asfáltico – CAP 50/70 e recuperado do RAP.....	107
Tabela 16 - Proporção AG (Bailey) das misturas estudadas.....	109
Tabela 17 - Composição granulométrica das misturas estudadas.....	110
Tabela 18 - Proporções em massa de agregados para dosagem das misturas.....	111
Tabela 19 - Parâmetros volumétricos mistura REF.....	111
Tabela 20 – Parâmetros volumétricos mistura GM_ARC.....	113
Tabela 21 - Parâmetros volumétricos mistura GRAP_MARC.....	114
Tabela 22 - Parâmetros volumétricos mistura GARC_MRAP.....	115
Tabela 23 – Parâmetros volumétricos mistura GM_RAP x teor de AR.....	117
Tabela 24 – Composição e Vv das misturas estudadas.....	118
Tabela 25 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida.....	119
Tabela 26 – Volume de vazios das placas de deformação permanente.....	123
Tabela 27 – Medidas de afundamento em trilha de roda das misturas estudadas..	124
Tabela 28 – Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura GM_ARC.....	131
Tabela 29 - Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura GM_RAP.....	132
Tabela 30 - Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura REF.....	132
Tabela 31 - Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura GRAP_MARC.....	133
Tabela 32 - Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura GARC_MRAP.....	133
Tabela 33 – Estimativa vida útil a partir das curvas de fadiga.....	137
Tabela 34 – Resumo resultados de ensaio das misturas estudadas.....	139

## LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AR	Agente rejuvenescedor
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório Superpave
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
FEL	Fatigue Endurance Limit
IDOT	Illinois Department of Transportation
IFFSTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LAMP	Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins
LaPPS	Laboratório de Polímeros Paulo Scarpa
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LVDT	Linear Variable Differential Transducers
MEE	Massa Específica Escolhida
MR	Módulo de Resiliência
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira
NCAT	National Center for Asphalt Technology
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PCP	Peneira Controle Primário
PCS	Peneira Controle Secundário
PCT	Peneira Controle Terciário
PG	Performance Grade
PM	Peneira Média
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RBV	Relação Betume Vazios
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas

RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux
RT	Resistência à tração
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SMA	Stone Matrix Asphalt
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SHRP	Strategic Highway Research Program
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFPR	Universidade Federal do Paraná
USP	Universidade de São Paulo
VAM	Vazios Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	PROBLEMA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	22
1.3	JUSTIFICATIVA.....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
2.1	BREVE PANORAMA ATUAL DAS RODOVIAS BRASILEIRAS .....	25
2.2	GESTÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	26
2.2.1	Lei Nº 12.305/10 .....	27
2.2.2	Resolução CONAMA Nº 307/02.....	29
2.3	MISTURAS ASFÁLTICAS.....	30
2.3.1	Dosagem.....	30
2.3.2	Seleção granulométrica - Método Bailey.....	32
2.3.2.1	Peneiras de controle .....	33
2.3.2.2	Definição do tipo de mistura.....	35
2.3.2.3	Avaliação da mistura.....	37
2.3.2.4	Considerações sobre o uso de RAP .....	38
2.4	MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS .....	39
2.4.1	Revestimentos asfálticos fresados – RAP .....	40
2.4.1.1	Extração e recuperação de ligante do RAP .....	46
2.4.1.2	Agentes rejuvenescedores.....	47
2.4.2	Agregado de resíduo de concreto – ARC .....	48
2.4.3	Normas e recomendações .....	51
2.4.4	Misturas mornas .....	52
2.4.4.1	Aditivos para produção das misturas mornas .....	54
2.4.5	Propriedades mecânicas das misturas recicladas .....	56
2.4.5.1	Vida de fadiga .....	56
2.4.5.2	Deformação Permanente .....	58
2.4.5.3	Resistência ao dano por umidade.....	60
2.4.5.4	Módulo de resiliência .....	61
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>63</b>
3.1	MATERIAIS.....	63



3.1.1	Ligante asfáltico .....	63
3.1.2	Agregados naturais .....	65
3.1.3	Agregados de resíduo de concreto - ARC .....	65
3.1.4	Revestimento asfáltico fresado - RAP .....	66
3.1.5	Aditivo para mistura morna .....	67
3.1.6	Agente rejuvenescedor - AR .....	68
3.2	MÉTODOS .....	70
3.2.1	ETAPA 1 – PREPARAÇÃO DO RAP .....	71
3.2.2	ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	76
3.2.3	ETAPA 3 – DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	77
3.2.3.1	Seleção granulométrica .....	78
3.2.3.2	Usinagem das misturas .....	79
3.2.3.3	Incorporação do RAP .....	83
3.2.3.4	Aditivo surfactante .....	85
3.2.4	ETAPA 4 – DESEMPENHO E PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	89
3.2.4.1	Vida de fadiga .....	89
3.2.4.2	Deformação permanente .....	93
3.2.4.3	Dano por umidade induzida .....	96
3.2.4.4	Módulo de resiliência .....	97
3.2.5	ETAPA 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	97
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>100</b>
4.1	ETAPA 1 – PREPARAÇÃO DO RAP .....	100
4.2	ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	102
4.2.1	Agregado natural .....	102
4.2.2	Agregado de resíduo de concreto – ARC .....	103
4.2.3	Revestimento asfáltico fresado – RAP .....	104
4.2.4	Ligante asfáltico .....	107
4.3	ETAPA 3 - DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	109
4.3.1	Seleção granulométrica .....	109
4.3.2	Mistura REF .....	111
4.3.3	GM_ARC .....	112
4.3.4	GRAP_MARC .....	113
4.3.5	GARC_MRAP .....	114
4.3.6	GM_RAP .....	116

4.3.7	Resumo – composição das misturas .....	118
4.4	ETAPA 4 – DESEMPENHO E PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	119
4.4.1	Dano por umidade induzida .....	119
4.4.2	Deformação permanente .....	123
4.4.3	Módulo de resiliência .....	129
4.4.4	Vida de fadiga .....	131
4.5	ETAPA 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	136
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>141</b>
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	144
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>146</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>154</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>158</b>
	<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>161</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Grandes quantidades de recursos naturais são utilizadas durante a construção e a manutenção da infraestrutura rodoviária, ao mesmo tempo em que grandes quantidades de resíduos também são geradas durante essas operações. Esse contrassenso reflete, de maneira evidente, a necessidade da busca constante e cada vez mais incentivada, por metodologias e processos de reciclagem na pavimentação asfáltica.

Estudos que promovem a reutilização de revestimentos asfálticos fresados nas operações de reabilitação de pavimentos, além da incorporação de outros tipos de resíduo nas misturas asfálticas, como o agregado de resíduo de concreto, por exemplo, vem sendo retratados pela literatura científica e, na maioria dos casos, as pesquisas demonstram que essas misturas recicladas possuem desempenho similar às misturas convencionais (FREIRE et al., 2014; PASANDÍN E PÉREZ, 2015; GENNESSEAU, 2015; MOTTER et al., 2015).

Além do aproveitamento desses resíduos que seriam inicialmente descartados, o aumento no montante utilizado também é interessante. Por isso, os estudos relativos à combinação de mais de um tipo de resíduo podem contribuir para o desenvolvimento técnico do setor, através da avaliação do potencial de utilização das misturas asfálticas recicladas, visando os possíveis ganhos econômicos, ambientais e tecnológicos a que esse tipo de estudo está vinculado.

Com base na revisão de literatura, é possível afirmar que o tamanho e a quantidade de resíduo incorporado têm impacto direto no desempenho da mistura. Existem diversas pesquisas que tratam da incorporação de uma fração específica do material, ora miúdo, ora graúdo, a fim de verificar seu potencial (MOTTER et al., 2015; CHEN et al., 2011; RADEVIĆ et al., 2017). No caso do revestimento asfáltico fresado, muito conhecido no meio técnico e acadêmico como RAP, proveniente da sigla em inglês de *Reclaimed Asphalt Pavement*, por exemplo, essa incorporação em frações pode ser ainda mais valiosa, uma vez que é sabido que o ligante asfáltico contido em uma mistura é distribuído entre os grãos de acordo com a superfície específica dos mesmos, sendo esta a relação entre a área total da superfície dos grãos e sua massa (GENNESSAUX, 2015). Neste caso, a parte fina de uma mistura é mais rica em ligante que a parte mais graúda, devido a maior superfície específica dos finos e, portanto, a

utilização de RAP miúdo pode contribuir para reduzir ainda mais a necessidade de incorporação de ligante virgem nas misturas recicladas.

Ainda, quando se trata da substituição de agregados, é importante ressaltar que, segundo Silva et al. (2015), os agregados representam em média 95% do volume total das misturas asfálticas, evidenciando assim a importância da seleção granulométrica adequada para fabricação dessas misturas. Os autores indicam que a granulometria dos agregados da mistura asfáltica (proporcionalidade entre agregados miúdos e graúdos), pode estar relacionada a muitos aspectos de desempenho do material em campo, como compactação, densificação, permeabilidade, durabilidade e resistência à deformação permanente. Mesmo com essa relevância significativa, normalmente as curvas granulométricas são selecionadas empiricamente de modo que é suficiente o atendimento às especificações do órgão regulador; no caso do Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Neste caso, no momento da seleção da granulometria da mistura, várias alternativas são possíveis, já que os limites das faixas granulométricas especificadas são muito amplos. Existe, desta forma, a carência de uma metodologia que permita a escolha da composição granulométrica de forma menos empírica e mais analítica, sendo esse o objeto de estudo de diversas pesquisas atualmente. Um desses métodos de seleção de agregados para misturas asfálticas é o Método Bailey, pesquisado por diversos autores (SILVA et al., 2015; LEANDRO, 2016; Yu, 2012; MOSAWE et al., 2015), tanto para camadas de revestimento como de base. Este método considera o conceito de empacotamento das partículas, principalmente com relação ao intertravamento dos agregados graúdos como esqueleto da mistura de agregados.

Tradicionalmente, as misturas asfálticas são produzidas mediante a mistura, em usinas especializadas, de agregados e ligantes virgens, a altas temperaturas. No entanto, nos últimos anos, outro segmento importante vem sendo relatado em publicações científicas e envolve os benefícios provenientes da redução de temperatura quando da utilização de misturas asfálticas mornas. Esses benefícios são traduzidos em menor consumo de energia nas usinas, redução de emissões de gases poluentes e, por conta desse último, melhores condições de trabalho (MOTTA, 2011; ZHAO et al., 2013; GIANI et al., 2015; LOPES et al., 2015; XIAO et al., 2016; DINIS-ALMEIDA et al., 2016). As aplicações de misturas asfálticas mornas e de misturas recicladas tem ganhado notoriedade atualmente devido ao seu apelo econômico e, sobretudo, ambiental.

Em razão do exposto, o escopo da presente pesquisa consiste em avaliar o desempenho das misturas asfálticas confeccionadas com o emprego de dois resíduos, revestimento asfáltico fresado e agregado de resíduo de concreto, utilizando a técnica das misturas mornas, a fim de potencializar a utilização de resíduos nas misturas asfálticas, diminuindo os impactos ambientais causados pela destinação inadequada desses materiais e ainda, possibilitando a preservação dos recursos naturais. Além disso, a pesquisa também contempla a verificação da influência da fração em que os resíduos são incorporados, no que diz respeito aos parâmetros de desempenho e características mecânicas da mistura, medidos através dos ensaios de deformação permanente, vida de fadiga, dano por umidade induzida e módulo de resiliência.

## 1.1 PROBLEMA

O constante crescimento da população, somado ao incremento do padrão de vida, proporcionam um aumento significativo da produção de resíduos. Os países desenvolvidos têm tomado consciência de que a gestão de resíduos é uma chave fundamental para resolver este emergente e grave problema. A preocupação não é limitada somente aos resíduos urbanos, como garrafas, papel, resíduos orgânicos, mas também resíduos industriais, resíduos de construção e resíduos de demolição, que devem ser cuidadosamente processados e reutilizados, a fim de reduzir o seu impacto ambiental e maximizar a sua valorização (ABREU et al., 2015).

Segundo Tojo e Fischer (2011), a importância da reciclagem de resíduos, sejam eles de concreto ou de asfalto, também se manifesta na política, como por exemplo, na reunião da Comissão Europeia “Directive 2008/98/EC on Waste”, na qual grande ênfase é colocada na prevenção, redução, reutilização e reciclagem de resíduos. Nesta reunião foi estabelecido que um objetivo de reciclagem de 70% para materiais de construção e resíduos de demolição (incluindo resíduos de asfalto) deve ser alcançado em 2020, em toda a União Europeia.

Seguindo esse movimento de conscientização mundial, a indústria de pavimentação tem dado atenção especial à busca de práticas de construção mais sustentáveis nas últimas décadas, já que a construção de estradas é uma atividade com intensa demanda de materiais e energia, produzindo impactos potenciais sobre o meio ambiente (YANG et al., 2015).

Freire et al. (2014), analisando o estado da arte sobre o uso do RAP concluíram que os trabalhos realizados atestam a viabilidade técnica para produção de misturas asfálticas utilizando RAP, as quais possuem desempenho semelhante e em alguns casos até superior ao das misturas convencionais. Porém, ainda existe grande receio na utilização de misturas com teores elevados deste material, justamente por seu desempenho ainda não estar comprovado e apresentar maior disparidade entre os resultados.

De acordo com Motta (2011), como a temperatura tem efeito nas características reológicas do ligante, causando seu envelhecimento, o ideal é que o material fresado não seja submetido a altas temperaturas (como as das misturas convencionais) na usinagem de misturas recicladas a quente, a fim de se prevenir um envelhecimento ainda maior do asfalto contido no fresado e a rápida deterioração da mistura. Diante disso, o emprego de misturas mornas e semimornas pode favorecer a adição de maiores quantidades de RAP na produção de misturas recicladas a quente (OLARD, 2008; PROWELL e HURLEY, 2007).

Outro resíduo citado em recentes pesquisas científicas, para utilização em misturas asfálticas, é o agregado de resíduo de concreto (ARC). Segundo Pasandín e Pérez (2015), em particular, resíduos de construção e demolição são os materiais recicláveis mais notáveis na indústria da construção. Motter et al. (2015) e Mills-Beale e You (2010) confirmam a viabilidade técnica da utilização de agregado de resíduo de concreto em misturas asfálticas, porém, limitado a estradas de baixo volume de tráfego.

Quanto à granulometria das misturas asfálticas, Silva et al. (2015), concluem que somente a seleção convencional da faixa granulométrica, como indica o DNIT, não é suficiente para fornecer subsídios para um esqueleto mineral ideal, que resulte em misturas asfálticas mais resistentes à deformação permanente. Por isso, a utilização de métodos complementares de seleção de agregados, agregando conceitos de melhor empacotamento granulométrico, vem sendo discutidas na literatura científica. Segundo o Asphalt Institute (2014), o método Bailey de seleção de agregados fornece a assistência necessária para garantir que as misturas serão projetadas de modo a proporcionar boa resistência à deformação permanente, longa durabilidade ou desempenho de longo prazo com os agregados disponíveis. Além disso, o método é de fácil aplicação em laboratório e reprodução em campo, obtendo boa densidade de maneira prática.

A fim de potencializar a utilização de resíduos nas misturas asfálticas, diminuindo os impactos ambientais causados pela destinação inadequada desses materiais e ainda possibilitando a preservação dos recursos naturais, a presente pesquisa baseia-se nos seguintes questionamentos: Qual é o desempenho das misturas asfálticas confeccionadas com o emprego dos dois resíduos, revestimento asfáltico fresado e agregado de resíduo de concreto, utilizando a técnica das misturas mornas? Qual a influência da incorporação dos resíduos (RAP e ARC), nas frações graúda e miúda da granulometria, nos parâmetros de desempenho e nas características mecânicas das misturas asfálticas?

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa é a avaliação do desempenho de misturas asfálticas utilizando revestimento asfáltico fresado e agregado de resíduo de concreto com o uso da técnica de misturas mornas.

Os objetivos específicos são:

- a) avaliar os efeitos das incorporações de RAP e ARC, nas frações graúda e miúda da granulometria das misturas asfálticas morna;
- b) determinar as características mecânicas e o desempenho das misturas recicladas mornas com adição de RAP e ARC, a partir dos seguintes ensaios laboratoriais:
  - Vida de fadiga;
  - Deformação permanente;
  - Dano por umidade induzida; e,
  - Módulo de resiliência.
- c) determinar a vida útil, quanto à fadiga, das misturas estudadas a partir da análise computacional de uma estrutura de pavimento flexível hipotética modelada com o software Elsym5 e dos modelos das curvas de fadiga obtidos em laboratório.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

No âmbito nacional e internacional, o setor de infraestrutura de transportes tem incentivado o desenvolvimento de metodologias que estejam relacionadas com o

conceito de sustentabilidade, permitindo a redução do consumo de energia e de novos materiais, sem comprometer a durabilidade do produto final. Por essa razão, a reciclagem de revestimentos asfálticos fresados é uma questão chave do ponto de vista econômico e ambiental, permitindo principalmente redução do uso de novos materiais (agregados e ligantes) e a gestão de resíduos sólidos (GENNESSEAUX, 2015).

Blankendaal et al. (2014) avaliaram medidas para reduzir o impacto ambiental de concreto e misturas asfálticas. Vários cenários foram projetados para esses materiais e foram avaliados com base no seu desempenho ambiental utilizando a análise do ciclo de vida. O efeito das técnicas de produção de baixa energia e a aplicação de materiais secundários foi quantificado no trabalho. Dentre todas as conclusões, as mais significativas dizem respeito à execução das misturas asfálticas. Atualmente cerca de 40% de pavimento asfáltico reciclado é consumido na produção de misturas asfálticas. Um aumento adicional de 20% de RAP produz cerca de 12% de redução no impacto ambiental da produção dessas misturas. A maior redução, entretanto, pode ser observada através da aplicação de misturas mornas, em substituição à aplicação das misturas a quente convencionais, que representam uma redução de aproximadamente 33% do impacto ambiental. Com relação às misturas mornas, é importante ressaltar que, além da redução do impacto ambiental, a utilização desta tecnologia proporciona a melhoria do ambiente de trabalho, com menor exposição às emissões asfálticas (fumos de asfalto), temperaturas mais baixas e redução de odores (MOTTA, 2011).

A indústria de construção de rodovias é um dos principais consumidores de agregado em âmbito global, portanto, é evidente que reduzir o consumo de agregados naturais é crucial para a garantia do desenvolvimento sustentável. A este respeito, nos últimos anos, vários estudos têm sido conduzidos no que tange a utilização de agregados de resíduo de concreto (ARC) provenientes da construção e entulho como agregados de misturas asfálticas convencionais (PASANDÍN et al., 2015). Ainda, segundo o Relatório de Pesquisa do IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), chamado Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil, publicado em 2012, é estimado que um valor médio de 0,50 toneladas por habitante de resíduo da construção civil é gerado anualmente em algumas cidades brasileiras.

No que diz respeito à esfera econômica, proporcionar segurança e eficiência operacional nas rodovias, através de melhores e mais eficientes tecnologias de



pavimentação, por exemplo, também significa economia nos custos de transportes. Segundo pesquisa sobre as rodovias brasileiras, publicada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2017, um recente estudo realizado pelo próprio órgão apontou que o Brasil tem prejuízo anual de R\$ 3,8 bilhões somente com a exportação de grãos devido às condições das rodovias, em especial à deficiência do pavimento. Além disso, a referida pesquisa ressalta o fato de que trafegar por vias que possuem uma infraestrutura inadequada, como é o caso das vias brasileiras segundo os resultados do estudo, potencializa a ocorrência de acidentes, gerando expressivos impactos sociais. Por isso, o estudo de novas tecnologias que resultem em pavimentos asfálticos com bom desempenho, aliado a utilização de resíduos e com isso, a preservação dos recursos naturais, pode contribuir para reverter esse cenário problemático e promover a sustentabilidade do setor rodoviário.

Segundo Don Brock e Richmond (2007), o revestimento asfáltico fresado é um material particularmente valioso para a indústria de misturas asfálticas, e seu valor vai continuar a aumentar na medida em que os agregados naturais e o ligante asfáltico se tornam mais caros. Segundo os autores, por essa razão, os produtores que conseguirem incorporar esse tipo de agregado reciclado em suas misturas estarão melhores preparados para competir no mercado futuro.

Por fim, ainda são pouco numerosas as pesquisas que tratam da aplicação conjunta dos dois resíduos propostos em misturas asfálticas (Behnood et al. 2015, avaliou a utilização de RAP e ARC na execução de reciclagem à frio), corroborando a importância tecnológica para avaliação e verificação da potencialidade de utilização desse tipo de mistura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BREVE PANORAMA ATUAL DAS RODOVIAS BRASILEIRAS

Segundo a pesquisa de rodovias feita pela CNT (2017), a malha rodoviária brasileira tem 78,7% de sua extensão total não pavimentada, sendo apenas 12,3% de rodovias pavimentadas. Em relação à densidade da malha, O Brasil possui densidade inferior se comparada com a de outros países de dimensão territorial semelhante ou mesmo com alguns países da América Latina, no valor de 24,8 km de rodovias pavimentadas para cada 1000 km<sup>2</sup> de área, conforme demonstrado na Figura 1. O cálculo da densidade é feito pela divisão da extensão de rodovias existentes (em km) pela área territorial do país (em km<sup>2</sup>).

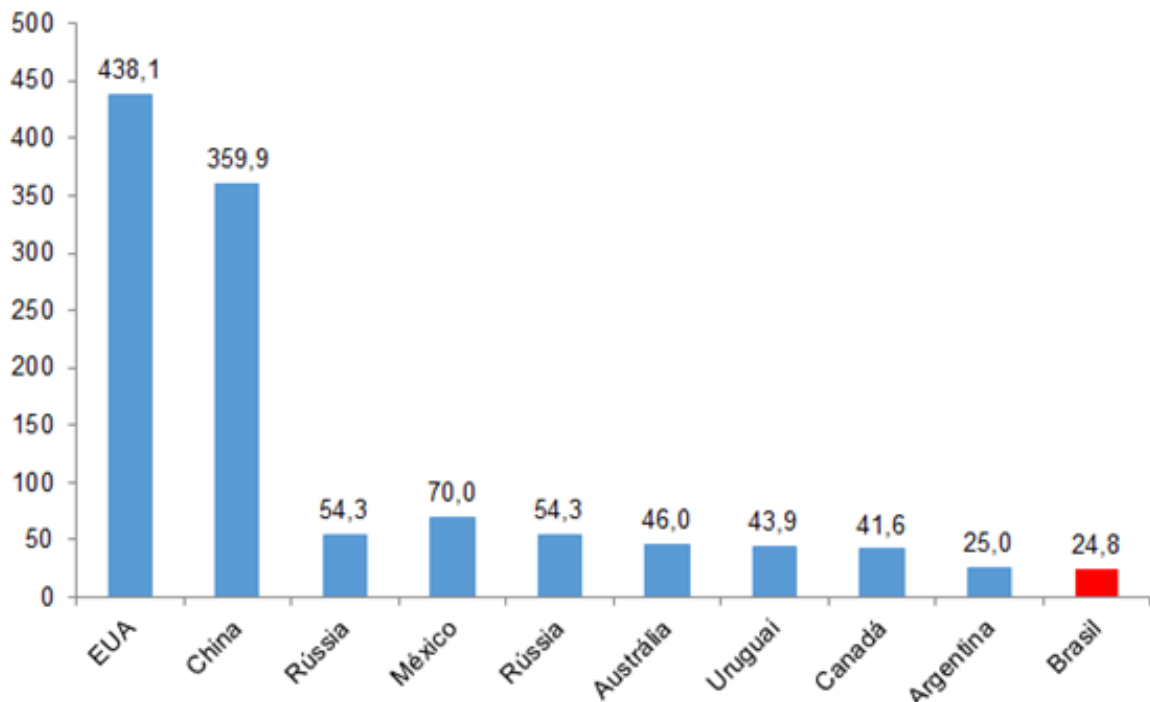


Figura 1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por País (valores em km/1.000km<sup>2</sup>).  
Fonte: Adaptado de CNT (2017).

Além da reduzida extensão da malha rodoviária para a área que possui o Brasil não se encontra em uma posição satisfatória no ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial. Segundo o relatório divulgado em setembro de 2017, a qualidade da infraestrutura rodoviária brasileira encontra-se na 103<sup>a</sup> posição dos 137 países analisados, atrás de países como Chile (24<sup>o</sup>), Equador (29<sup>o</sup>), Uruguai (95<sup>o</sup>) e Argentina (96<sup>a</sup>), todos situados na América do Sul. A avaliação da infraestrutura das

rodovias utiliza notas que variam de 1 (extremamente subdesenvolvida – entre as piores do mundo) a 7 (extensa e eficiente – entre as melhores do mundo). No índice de competitividade em questão, o Brasil recebeu a nota 3,1. De modo geral, muitas rodovias foram penalizadas, ao longo dos anos, pela ausência de investimentos em manutenção e/ou conservação nos moldes necessários e, cada vez mais, esse fator tem contribuído para a depreciação da malha rodoviária brasileira. Somado a isso, outro fator preocupante é a pressão crescente do volume de tráfego que, combinado com as más condições das rodovias, implica também o aumento do número de acidentes (CNT, 2017).

## 2.2 GESTÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Em âmbito mundial, a construção civil consome 60% de toda a matéria-prima extraída da litosfera. A partir deste volume, sabendo que a construção representa 40% de todas as atividades, podemos afirmar que o setor representa 24% das extrações globais de recursos naturais (BRIBRÍAN et al., 2011). Segundo Blankendaal et al. (2014), além de esgotamento dos recursos naturais, esta extração leva a:

- a) danos à paisagem rural e degradação dos ecossistemas;
- b) danos à saúde por contaminação do ambiente interno e externo durante a produção, processamento, manutenção e demolição de materiais de construção causados pelas emissões e poeiras;
- c) contaminação do solo, água e ar pelas emissões provenientes dos materiais de construção durante a sua fase de utilização.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) publicou em 2016 a atualização do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. O documento mostra que os municípios coletaram cerca de 45,1 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em 2016. Esta situação, também observada em anos anteriores, exige atenção especial quanto ao destino final dado aos RCD, visto que a quantidade total desses resíduos é ainda maior do que este número, uma vez que a pesquisa registra e divulga apenas os dados da coleta executada pelo serviço público, o qual usualmente limita-se a recolher os resíduos desta natureza lançados em logradouros públicos, pois a responsabilidade da coleta e destino final destes resíduos é de seu gerador. Portanto,

de maneira geral, as projeções sobre tais resíduos não incluem os RCD oriundos de demolições e construções coletados por serviços privados.

A gestão de resíduos da construção civil no Brasil é regulada basicamente pela Lei nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e pela resolução CONAMA nº 307 de 2002 e suas alterações (Resoluções CONAMA nº 348/04, nº 431/11, nº 448/12 e nº 469/15, que estabelecem as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCD).

### 2.2.1 Lei Nº 12.305/10

A Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

I.Quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do SISNAMA e do SNVS;

- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

## II.Quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

A lei trata dos Planos de Resíduos Sólidos, nas esferas nacional, regional e municipal, propondo a criação destes documentos que apresentarão, entre outras questões, metas de redução, reutilização e reciclagem, com vistas a reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada.

Além disso, a lei estabelece as responsabilidades dos geradores e do poder público e, institui a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, que tem como objetivo as seguintes questões:

- a) compatibilizar interesses entre os agentes econômicos e sociais e os processos de gestão empresarial e mercadológica com os de gestão ambiental, desenvolvendo estratégias sustentáveis;
- b) promover o aproveitamento de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas;
- c) reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais;
- d) incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade;
- e) estimular o desenvolvimento de mercado, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis;
- f) propiciar que as atividades produtivas alcancem eficiência e sustentabilidade;
- g) incentivar as boas práticas de responsabilidade socioambiental.

#### 2.2.2 Resolução CONAMA Nº 307/02

A Resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 5 de julho de 2002, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais.

Os resíduos da construção civil são classificados, para efeito desta Resolução e de suas alterações (nº 348/2004, nº 431/2011, nº 448/2012 e nº 469/2015), da seguinte forma:

- a) Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras;

- b) Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- c) Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- d) Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

## 2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS

### 2.3.1 Dosagem

Os materiais betuminosos são associações de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono. São materiais aglomerantes (ou ligantes) e possuem propriedades de aderência aos agregados pétreos. Uma mistura asfáltica a quente é a combinação de agregados, ligantes e aditivos, que são usinados utilizando técnicas para produção em altas temperaturas. Na mistura asfáltica, os agregados representam cerca de 95% do volume total, e o ligante asfáltico cerca de 5%. Para a definição da composição de uma mistura asfáltica, são utilizados métodos de dosagem que auxiliam na escolha dos materiais (agregados, finos, ligante, aditivos), na verificação de suas propriedades, na observância do teor mínimo de ligante, na verificação do comportamento mecânico requerido por norma, dentre outros (GENNESSAUX, 2015).

O método de dosagem de misturas asfálticas mais utilizado no Brasil ainda é o chamado método Marshall (DNER-ME 043/95), que faz uso da compactação por impacto, porém este vem sendo gradativamente substituído pelo método Superpave. O método denominado Superior Performance asphalt PAVements (Superpave), desenvolvido nos Estados Unidos durante o programa SHRP (Strategic Highway Research Program), inclui um novo sistema para seleção e especificação de ligantes

asfálticos, requisitos quanto à graduação e às propriedades dos agregados, além de uma nova sistemática para dosagem de misturas asfálticas (Asphalt Institute, 2001).

No que diz respeito à especificação de ligantes asfálticos, a metodologia Superpave é baseada em medidas de propriedades fundamentais relacionadas de forma racional ao desempenho dos pavimentos, sendo que os ligantes são ensaiados em temperaturas relacionadas ao seu ciclo de utilização que indicam seu grau de desempenho (Performance Grade – PG). Quanto ao projeto das misturas propriamente dito, a metodologia foi segmentada em três níveis em função do tráfego, sendo o nível 1 para tráfego com carga de eixo equivalente menor do que  $10^6$ , o nível 2 para tráfego entre  $10^6$  e  $10^7$  e o nível 3 para tráfego maior do que  $10^7$ . Em seu nível 1 o método apresenta similaridade ao método Marshall no que diz respeito à avaliação dos parâmetros volumétricos. Contudo, o processo de compactação se dá pelo uso do compactador giratório Superpave (CGS), sendo essa a principal diferença entre a dosagem Superpave e a dosagem Marshall, onde a primeira é realizada por amassamento (giros) e a segunda é realizada por impacto (golpes). O compactador aplica uma pressão constante de 0,6 Mpa sobre a amostra dentro do molde durante o processo de compactação. O molde é fixado num ângulo de  $1,25^\circ$  e sua base gira a 30 revoluções por minuto. A altura da amostra é medida para cada giro e, assim, pode-se estimar a densidade do corpo de prova durante a compactação. De maneira resumida, o método Superpave em seu Nível 1 é constituído por quatro etapas principais: (1) seleção dos materiais; (2) seleção do projeto estrutural do agregado; (3) seleção do teor de projeto e; (4) avaliação da sensibilidade à água. O teor de projeto é estabelecido para o volume de vazios de 4%, sendo todos os outros parâmetros volumétricos analisados para este teor de modo a verificar se os critérios especificados são atendidos (LEANDRO, 2016).

De acordo o Advanced Asphalt Technologies (2011) a partir das informações publicadas no documento NCHRP 673, o sistema Superpave tem apresentado sucesso em vários aspectos, principalmente com relação à avaliação dos ligantes asfálticos. Quanto ao desempenho em campo das misturas projetadas por essa sistemática o sucesso é mais evidente em termos de resistência ao afundamento em trilha de roda, sendo que os órgãos rodoviários americanos têm se preocupado com relação ao trincamento por fadiga e à permeabilidade dos revestimentos com misturas asfálticas dosadas através do método Superpave. De qualquer forma, o relatório destaca que desde a implementação da metodologia Superpave, pesquisas têm sido



desenvolvidas de modo a aperfeiçoar vários aspectos desse sistema, incluindo requisitos volumétricos, níveis de compactação e especificação para agregados e distribuições granulométricas.

### 2.3.2 Seleção granulométrica - Método Bailey

Utilizando-se dos conceitos de empacotamento de partículas, bastante empregado na dosagem de concretos, existe um método de seleção de agregados para misturas asfálticas que vem sendo muito utilizado nos Estados Unidos desde o início da década de 80, chamado método Bailey. De acordo com Silva et al. (2015), a metodologia Bailey se baseia no arranjo das partículas a fim de formar uma matriz de agregados resistente através do intertravamento máximo das partículas obtido pela distribuição das mesmas por tamanho. Para entender melhor esse conceito, é preciso determinar quais partículas formam a estrutura de agregados graúdos e quais preenchem os vazios criados por essa estrutura. As características de empacotamento são determinadas por muitos fatores como a forma, resistência e textura dos agregados, graduação da mistura e o tipo e quantidade dos esforços de compactação (VAVRIK et al., 2002).

O método Bailey foi desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT), sendo refinado nas pesquisas de Vavrik et al. a partir dos anos 2000, fazendo com que ele se torne aplicável a qualquer mistura asfáltica, independentemente do tamanho do agregado. O autor destaca ainda que o método se relaciona diretamente com as características de compactação de cada fração, com os vazios no agregado mineral (VAM) e o com os vazios da mistura (Vv). A estrutura de agregados da mistura é selecionada buscando maior intertravamento dos agregados graúdos e a metodologia pode ser utilizada em qualquer método de dosagem de misturas asfálticas (Superpave, Marshall, Hveem, etc.).

De acordo com Asphalt Institute (2014) existem quatro princípios fundamentais que devem ser considerados no método Bailey. São eles:

- a) determinar o que é graúdo e miúdo, qual cria vazios e qual preenche esses vazios, e ainda qual deles (graúdo ou miúdo) está no controle da estrutura de agregados;

- b) o empacotamento da fração graúda influencia o empacotamento da fração miúda;
- c) o agregado miúdo da fração graúda se relaciona com o empacotamento do total da fração miúda na mistura;
- d) o agregado miúdo da fração miúda se relaciona com o empacotamento da porção fina na graduação da mistura.

Cada um dos quatro princípios desempenha um papel específico no empacotamento dos agregados ou no volume de vazios do agregado mineral. Esses princípios também estão relacionados com a compactação e suscetibilidade à segregação em campo, além de estimar mudanças esperadas no VAM e no volume de vazios de uma mistura para outra, ou de uma amostra de controle de qualidade para a outra.

De acordo com as diretrizes do método, são considerados agregados graúdos as partículas que, dentro de um certo volume, criam vazios que podem ser preenchidos por agregados de tamanho menor. Assim, todas as partículas que preenchem os vazios deixados pelo agregado graúdo são consideradas finas. Com isso, é necessário mais do que uma peneira de controle para a divisão entre agregado graúdo e fino, e essas peneiras vão depender do tamanho máximo nominal da mistura (TMN). O TMN é definido do mesmo modo que as indicações da especificação Superpave, sendo a primeira peneira acima da peneira que retém mais que 10% do material (Vavrik et al., 2002).

### 2.3.2.1 Peneiras de controle

No método Bailey, a peneira que define a divisão entre agregado graúdo e miúdo é chamada de Peneira de Controle Primário (PCP), sendo baseada no TMN da mistura. A PCP é considerada como sendo a peneira com o diâmetro de abertura mais próxima do resultado da equação 1 (ASPHALT INSTITUTE, 2014).

$$PCP = TMN \times 0,22 \quad (1)$$

Onde:

PCP: peneira de controle primário

TMN: diâmetro máximo nominal

Os autores ressaltam ainda que o fator 0,22 utilizado para determinação das peneiras de controle resultou de análises, em duas (2D) e três (3D) dimensões, da compactação de agregados de diferentes formas, que mostraram que a razão do diâmetro das partículas entre 0,18 e 0,28 seria a ideal para os diferentes tipos de agregados, tendo-se então adotado o valor de 0,22 como padrão. Além da PCP, também devem ser determinadas a Peneira de Controle Secundário (PCS), a Peneira de Controle Terciário (PCT) e a Peneira Média (PM). Diante dessa avaliação realizada, o método indica as peneiras de controle em função do TMN, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Peneiras de controle de acordo com o TMN.

Peneiras de controle	Tamanho Nominal Máximo (mm)					
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
<b>PM</b>	19,00	12,50	9,50	6,25	4,75	2,36
<b>PCP</b>	9,50	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
<b>PCS</b>	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
<b>PCT</b>	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075

Fonte: Vavrik et al., 2002.

Todo o material que ficar retido na PCP é considerado agregado graúdo. Já o material que passar na PCP e ficar retido na PCS caracteriza a fração graúda do agregado miúdo e o material que passar na PCS é considerado a fração miúda do agregado miúdo, conforme Figura 2. Além disso, a PCT é utilizada para avaliar a fração miúda do agregado miúdo e a PM para avaliação da fração graúda da mistura.

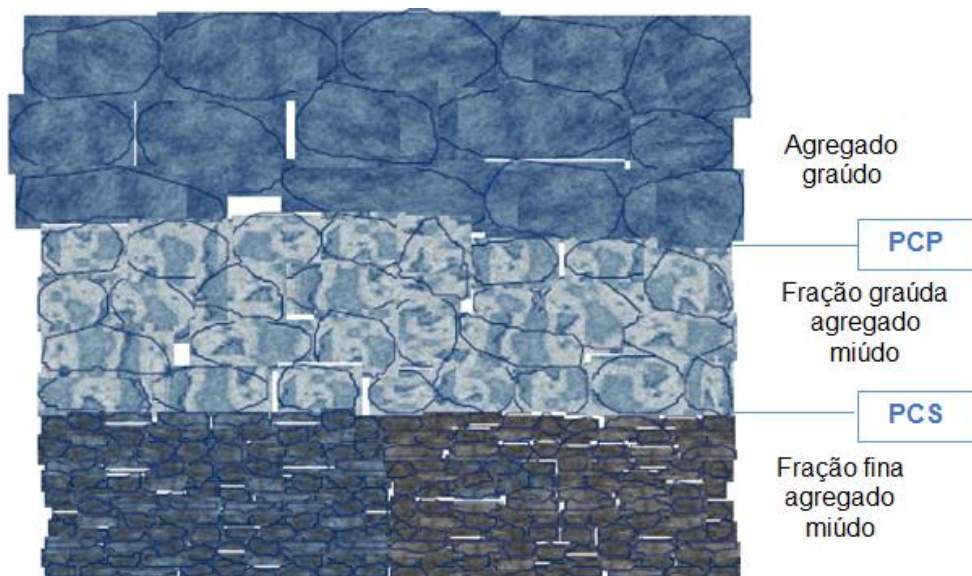


Figura 2 - Visão geral das divisões das peneiras de controle do método Bailey.

Fonte: Adaptado de Vavrik et al., 2002.

Outra questão importante é que a partir da quantidade de material passante na PCP pode-se definir se a mistura de agregados se caracteriza por uma mistura graúda ou miúda, sendo que 50% ou mais passante, considera-se miúda, e 49,9% ou menos passante, considera-se graúda (ASPHALT INSTITUTE, 2014).

### 2.3.2.2 Definição do tipo de mistura

Ainda, seguindo o método, para cada agregado graúdo deve ser determinada a sua massa unitária solta e compactada e, para cada agregado miúdo, apenas a massa unitária compactada. Essas informações representam como os agregados se arranjam estruturalmente, formando vazios. Elas são necessárias para avaliação das propriedades de intertravamento.

A massa unitária solta é definida como a quantidade de agregados necessária para preencher um dado recipiente sem qualquer tipo de esforço de compactação. Essa condição representa uma situação de mínimo contato entre partículas. Já a massa unitária compactada do agregado graúdo é a quantidade de agregados necessária para preencher um dado recipiente através da aplicação de um esforço de compactação, que reduz a quantidade de vazios e aumenta o contato entre partículas. A condição compactada representa o volume de vazios da mistura quando as partículas estão em maior contato do que na condição solta.

Somado a isso é preciso escolher o grau de intertravamento do agregado graúdo desejado para a mistura, denominado pelo método Bailey de massa unitária escolhida. Através desse parâmetro são determinados o volume de agregado graúdo da mistura e o seu grau de intertravamento. No método, toda mistura que apresenta um esqueleto de agregado graúdo é definida como graduação graúda. Já uma mistura de graduação fina não possui quantidade suficiente de agregado graúdo para formar um esqueleto, portanto, as cargas aplicadas são suportadas pela estrutura de agregado fino. Sendo assim, o valor da massa unitária escolhida tem relação com o tipo de mistura desejada, conforme Figura 3.

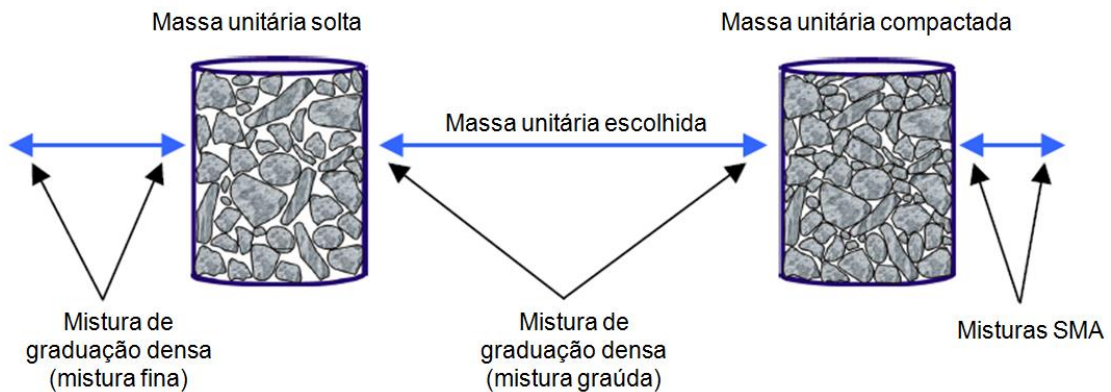


Figura 3 - Esquema método de seleção da massa unitária escolhida – Método Bailey.  
Fonte: Adaptado de Vavrik et al., 2002.

A massa unitária solta é o limite inferior do intertravamento do agregado graúdo. Teoricamente é a divisão entre uma mistura de graduação fina e outra de graduação graúda. Selecionando uma massa unitária escolhida menor que a massa unitária solta, por exemplo 90%, as partículas de agregado graúdo ficam espalhadas e não formam uma condição uniforme de contato entre partículas. Por sua vez, a massa unitária compactada é considerada, para misturas de graduação densa, como sendo o limite superior do intertravamento do agregado graúdo. Este valor é adotado geralmente como sendo 110% da massa unitária solta. Não é aconselhável usar valores de massa unitária escolhida próximos da massa unitária compactada pois pode dificultar a compactação da mistura em campo, necessitando um esforço de compactação maior para atingir a densidade desejada. Sendo assim, a seleção da massa unitária escolhida é feita a partir de uma porcentagem da massa unitária solta do agregado graúdo. Se o intuito for obter certo grau de intertravamento do agregado graúdo, a porcentagem deve ficar entre 95% e 105% da massa unitária solta. Para agregados mais suscetíveis à segregação, deve ser mais próximo de 105%, sendo recomendado evitar valores acima desse percentual para que não haja dificuldades na compactação e/ou degradação do agregado. Em misturas de graduação fina, a massa unitária escolhida deve ficar abaixo de 90% da massa unitária solta (VAVRIK et al., 2002).

De acordo com as indicações do Asphalt Institute (2014), as massas unitárias solta e compactada de cada agregado são determinadas usando o procedimento de compactação descrito na norma AASHTO T19. A massa unitária (em  $\text{kg/m}^3$ ) é calculada dividindo-se a massa de agregado pelo volume do recipiente metálico.

### 2.3.2.3 Avaliação da mistura

Depois da definição das peneiras de controle e da caracterização dos agregados, para a avaliação da mistura de agregados combinada, a análise se dá pela aplicação de equações 2, 3 e 4, que vão determinar os parâmetros de proporção de agregado graúdo (AG), proporção de agregado graúdo no agregado miúdo (GAM) e proporção de agregado fino no agregado miúdo (FAM).

$$\text{Proporção AG} = \frac{\% \text{ passante na PM} - \% \text{ passante na PCP}}{100 - \% \text{ passante na PM}} \quad (2)$$

$$\text{Proporção GAM} = \frac{\% \text{ passante na PCS}}{\% \text{ passante na PCP}} \quad (3)$$

$$\text{Proporção FAM} = \frac{\% \text{ passante na PCT}}{\% \text{ passante na PCS}} \quad (4)$$

Por fim, os resultados obtidos nesta análise granulométrica devem ser comparados com os limites estabelecidos por Vavrik et al. (2002), que estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites para parâmetros de misturas de agregados combinados pelo Método Bailey.

Parâmetro	Tamanho Nominal Máximo (mm)					
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
<b>Proporção AG</b>	0,80-0,95	0,70-0,85	0,60-0,75	0,50-0,65	0,40-0,55	0,30-0,45
<b>Proporção GAM</b>	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50
<b>Proporção FAM</b>	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50

Fonte: Adaptado de Vavrik et al., 2012.

A avaliação da proporção AG usa o conceito da peneira média (PM). Segundo o Asphalt Institute (2014), as partículas retidas na PM são chamadas de “pluggers” e as partículas passantes na PM são chamadas de “interceptors”. Os “interceptors” são maiores do que os vazios criados pelos “pluggers” e, portanto, os separam. Assim como os demais parâmetros de avaliação do método, a proporção AG tem influência no VAM da mistura. Na medida em que a proporção AG aumenta, o VAM também aumenta. De acordo com o órgão, uma proporção AG baixa, indica que há poucos “interceptors” e, portanto, o VAM é mais baixo. Além disso, neste caso, há partículas graúdas em excesso, o que pode causar segregação da mistura. Em contrapartida,

uma proporção AG acima dos limites estabelecidos geralmente indica a formação de curvas “S”, que apresentam dificuldade para compactação em campo.

A proporção GAF tem impacto considerável no VAM da mistura devido à criação de vazios no agregado miúdo, com relação inversamente proporcional até o limite estabelecido pelo método (acima de 0,55 o VAM aumenta na medida em que a proporção GAF aumenta). O ideal é que o GAF apresente valor sempre abaixo de 0,50, pois valores muito altos indicam excesso de porção fina do agregado miúdo. Quando o valor de GAF ficar abaixo da faixa indicada pelo método, a graduação não será uniforme, caracterizando misturas abertas e que podem indicar instabilidade e problemas de compactação. A fração fina dos agregados miúdos preenche os vazios criados pela porção graúda dos agregados miúdos. O FAF indica como a porção fina do agregado miúdo é compactada, devendo sempre ficar abaixo de 0,50 para misturas de graduação densa. A relação do VAM com a proporção FAF é inversamente proporcional, até o limite estabelecido pelo método, assim como acontece com a proporção GAF.

#### 2.3.2.4 Considerações sobre o uso de RAP

De acordo com os autores, uma mistura contendo RAP pode ter sua granulometria selecionada pelo método Bailey, usando os mesmos princípios de misturas com agregados naturais. A abordagem descrita pelo método pode sofrer variações em misturas com alto teor de RAP incorporado (40% ou mais). Neste caso o método pode ser utilizado, porém, o VAM pode não ser alterado com a mudança de massa unitária escolhida e das proporções AG, FAM e GAM, porque o RAP supera os novos agregados. Sendo assim, o projetista precisará avaliar a mistura seguindo a experiência do método mais comumente utilizado.

A concepção do método Bailey foi realizada somente com agregados naturais e o projetista seleciona uma massa unitária escolhida para estabelecer o volume de agregados graúdos na mistura, o grau de intertravamento desses agregados e o volume correspondente de agregados miúdos. As proporções são calculadas para garantir que estejam dentro dos limites aceitáveis para um tamanho e tipo de mistura correspondente. Depois de calculadas as propriedades do Bailey com os novos agregados, a porcentagem desejada de incorporação de RAP é adicionada e, então, as novas porcentagens de agregado são alteradas conforme nova mistura contendo

RAP tem o mesmo percentual passante na PCP da mistura original com agregados naturais. A porcentagem passante na PCP deve ficar próxima à original após a inclusão do RAP, a fim de manter uma proporção adequada entre agregado graúdo e miúdo. A granulometria usada para o RAP é tipicamente determinada após a extração por solvente.

Ao avaliar uma mistura teste com incorporação do RAP (antes do trabalho de laboratório), as três proporções da mistura com RAP devem ser comparadas com as da mistura com agregados naturais. Conforme mencionado anteriormente, é importante manter aproximadamente o mesmo valor da PCP. Além disso, o RAP geralmente contém agregados graúdos e miúdos. Isso geralmente altera todos os três valores de proporção, mesmo quando a PCP é aproximadamente a mesma que a mistura de agregados novos. É necessário comparar as mudanças ocorridas com a adição do RAP e considerar como isso pode alterar as propriedades volumétricas da mistura com RAP proposta. Alterações adicionais podem ser necessárias na mistura com RAP para atender às especificações volumétricas de um determinado projeto de mistura. Além disso, devem ser verificadas as características individuais dos agregados extraídos do RAP e se o processo de extração destes agregados pode ter alterado suas características. A premissa básica ao utilizar uma mistura com incorporação de RAP é considerar o volume de agregado fino e como isso se relaciona com características de compactação. Para estimar isso com precisão, é necessário considerar uma mistura com agregados novos. O volume de agregado graúdo na mistura com RAP determina se a mistura é graúda ou miúda e o grau de intertravamento do agregado graúdo desejado. Os três valores das proporções AG, GAM e FAM desempenham o mesmo papel em volumetria e compactação (VAVRIK et al, 2002).

## 2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS

Segundo Pasandín e Pérez (2015), durante a construção de uma obra civil, uma quantidade substancial de recursos naturais é consumida, o que faz com que a indústria de construção seja uma forte candidata para a reutilização de resíduos como matérias-primas. Essa é a situação do setor de construção de estradas, já que a rede rodoviária é grande e disseminada ao longo de uma vasta região geográfica. Por estas



razões, há um grande potencial para reutilizar os resíduos tanto nas fases de construção como na manutenção de estradas.

A reciclagem de misturas asfálticas consiste na reutilização dos materiais provenientes dos pavimentos ao final da sua vida útil ou cujas características se pretendem melhorar. Esta técnica possibilita o reaproveitamento de material, a redução dos gastos com construção de novos pavimentos, além de diminuir o impacto ambiental causado pela destinação inadequada de materiais e pela exploração de jazidas. Quanto maior a taxa de incorporação de material reciclado em novas misturas, maior o benefício econômico e ambiental proporcionado, sendo uma opção sustentável para a indústria de pavimentação (GENNESSAUX, 2015).

Kowalski et al. (2016) reforçam que, além dos impactos ao meio ambiente causados pela construção de estradas, o preço do petróleo, para fabricação do ligante asfáltico, teve aumento substancial nos últimos anos. Esse aumento se refletiu diretamente em preços mais elevados das misturas asfálticas. Sendo assim, no sentido de promover práticas mais sustentáveis e combater esse aumento de preços, medidas sólidas de sustentabilidade precisam ser amplamente implementadas. Os autores corroboram o fato de que o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias para integrar materiais mais ecológicos, resíduos e materiais reciclados no ciclo de produção de misturas asfálticas é uma solução que melhora a sustentabilidade e a eficiência econômica da indústria de pavimentação.

Diante deste potencial, de acordo com Mills-Beale e You (2010), um número considerável de tecnologias e materiais inovadores está sendo explorado para determinar a sua viabilidade na concepção, construção e manutenção de pavimentos. Misturas mornas, revestimento asfáltico fresado, cinzas e materiais de impermeabilização (mantas asfálticas), são alguns dos materiais que os pesquisadores acreditam que possam garantir a sustentabilidade da indústria da pavimentação no futuro. Porém, os autores destacam ainda que um material que tem sofrido pouca investigação para a sua utilização em pavimentos asfálticos reciclados são os agregados de concreto.

#### 2.4.1 Revestimentos asfálticos fresados – RAP

Inicialmente, o procedimento de reciclagem de pavimentos asfálticos era efetuado a partir da escarificação do pavimento existente (geralmente deteriorado) e,

posteriormente, levado para o processamento em usinas. Contudo, este método era inadequado, uma vez que resultava em blocos muito grandes, impossibilitando a utilização imediata na mistura asfáltica reciclada, necessitando, assim, de quebra e de rebitagem prévias. Na segunda metade da década de 1970 surgiu um novo procedimento efetuado a partir de um equipamento especial (fresadora) que remove a mistura asfáltica existente e possibilita a execução de uma mistura com novos agregados e um novo ligante asfáltico (GENNESSAUX, 2015).

Freire et al. (2014), analisando o estado da arte sobre o uso de revestimentos asfálticos fresados (RAP) na pavimentação no Brasil e no mundo, concluíram que os trabalhos realizados nos últimos anos corroboram a hipótese de que é possível fabricar, com o uso de RAP, misturas com desempenhos semelhantes e até superiores aos de misturas convencionais. Porém, existe grande receio na utilização de misturas com teores elevados desse material, justamente por seu desempenho ainda não estar comprovado e apresentar maior disparidade entre os resultados.

Segundo a EAPA, na Europa praticamente nenhum resíduo de asfalto é encaminhado para aterros e os pavimentos são o produto mais reciclado na indústria da construção, excedendo os volumes das típicas reciclagens de vidro e papel. De acordo com uma publicação do órgão que indica a produção e utilização de RAP mundialmente, sua incorporação em misturas asfálticas usinadas a quente e mornas cresceu 15% em apenas um ano na Grã-Bretanha. Ainda, a pesquisa demonstra o aumento expressivo da quantidade de RAP disponível nos EUA, de 2014 para 2015, na ordem de 1 milhão de toneladas a mais que o ano anterior (Tabela 3 e Tabela 4).

Tabela 3 - Distribuição da produção de RAP e sua utilização em pavimentação no ano de 2014.

País	RAP disponível (milhões de toneladas)	% de RAP disponível utilizado em:			
		Produção de misturas a quente	Produção de misturas mornas	Produção de misturas semimornas	Reciclagem a frio
Alemanha	1.090.000	90	0	0	0
Grã-Bretanha	3.350.000	52	18	0	5
Itália	9.000.000	20	0	0	30
Luxemburgo	285.000	85	5	0	10
Holanda	4.500.000	67	3	0	15
Eslováquia	30.000	98	0	0	1
Eslovênia	40.000	25	0	0	0
Espanha	390.000	95	2	3	0
Suécia	1.200.000	75	5	5	5
Suíça	1.000.000	52	10	1	2
EUA	68.700.000	95	sem dados	sem dados	sem dados

Fonte: EAPA – Asphalt in Figures, 2014.

Tabela 4 - Distribuição da produção de RAP e sua utilização em pavimentação no ano de 2015.

País	RAP disponível (milhões de toneladas)	% de RAP disponível utilizado em:			
		Produção de misturas a quente	Produção de misturas mornas	Produção de misturas semimornas	Reciclagem a frio
Alemanha	11.000.000	90	0	0	0
Grã-Bretanha	3.500.000	85		0	15
Itália	9.000.000	20	0	0	30
Luxemburgo	200.000	90	0	0	10
Holanda	4.500.000	70	0	0	10
Eslováquia	75.000	98	0	0	1
Eslovênia	37.000	27	0	0	73
Espanha	410.000	94	1	2	0
Suécia	1.600.000	76	8	6	5
Suíça	sem dados	sem dados	sem dados	sem dados	sem dados
EUA	69.700.000	91		sem dados	0

Fonte: EAPA – Asphalt in Figures, 2015.

Em um estudo desenvolvido por Cooper et al. (2012), avaliando quatro metodologias sustentáveis de revestimentos asfálticos, quais sejam, misturas mornas com o uso de asfalto espumado, utilização de RAP, modificador granulado de borracha e aditivo de enxofre, concluiu que a tecnologia utilizando RAP (teor de 40%) foi a que atingiu o melhor desempenho e a maior redução de custos.

Don Brock e Richmond (2007) reforçam que os produtores devem entender que o RAP não é um resíduo, mas sim, devem considerar a rodovia como uma fonte de matéria-prima (agregado e ligante asfáltico), assim como as pedreiras ou um poço de petróleo. Os autores reforçam que a substituição de material virgem por RAP vale cada tonelada e se o material for processado e tratado, assim como as matérias primas virgens o são, misturas asfálticas com até 50% de incorporação de RAP podem ser produzidas mantendo um nível de qualidade igual ou superior ao das misturas convencionais. Além disso, quando devidamente processado e misturado, o RAP também pode reduzir significativamente o custo de produção das misturas asfálticas, com a vantagem de preservar os recursos naturais e promover a execução de mais quilômetros de pavimento com o mesmo orçamento disponível.

De acordo com os estudos feitos por Gennesseaux (2015), quanto à durabilidade, é possível perceber que os níveis requeridos pelas normas dos materiais são alcançados na técnica morna, na reciclagem em taxas elevadas de RAP ou na combinação dessas duas técnicas. Como conclusão final do estudo mecânico, a autora ainda complementa que a técnica de mistura asfáltica morna tem a vantagem

de possibilitar a reciclagem em taxas elevadas de RAP (mais de 25%, atingindo até 50%), sem o comprometimento da qualidade da mistura final. De qualquer forma, a autora indica que um dos problemas para a fabricação de misturas com altos teores de RAP incorporado é o aquecimento deste agregado, que deve ser evitado a fim de se prevenir o envelhecimento ainda maior do asfalto contido no fresado. Para tal, técnicas de misturas asfálticas mornas podem ser utilizadas, facilitando a incorporação de maiores porcentagens de RAP.

Zaumanis et al. (2016) avaliou os custos relacionados aos materiais para produção de misturas fabricadas utilizando RAP, com porcentagens de incorporação progressivas. A mistura, para efeitos de cálculo, foi concebida com 94,3% de agregados e 5,7% de ligante asfáltico. A Figura 4 apresenta os resultados dos custos relacionados ao material, por tonelada de asfalto, em misturas com incorporação de RAP variando de 0% a 100%. De acordo com este estudo, dependendo da disponibilidade de RAP, os custos da mistura com 100% de RAP, teriam redução de 50% a 70% com relação à mistura com agregados naturais.

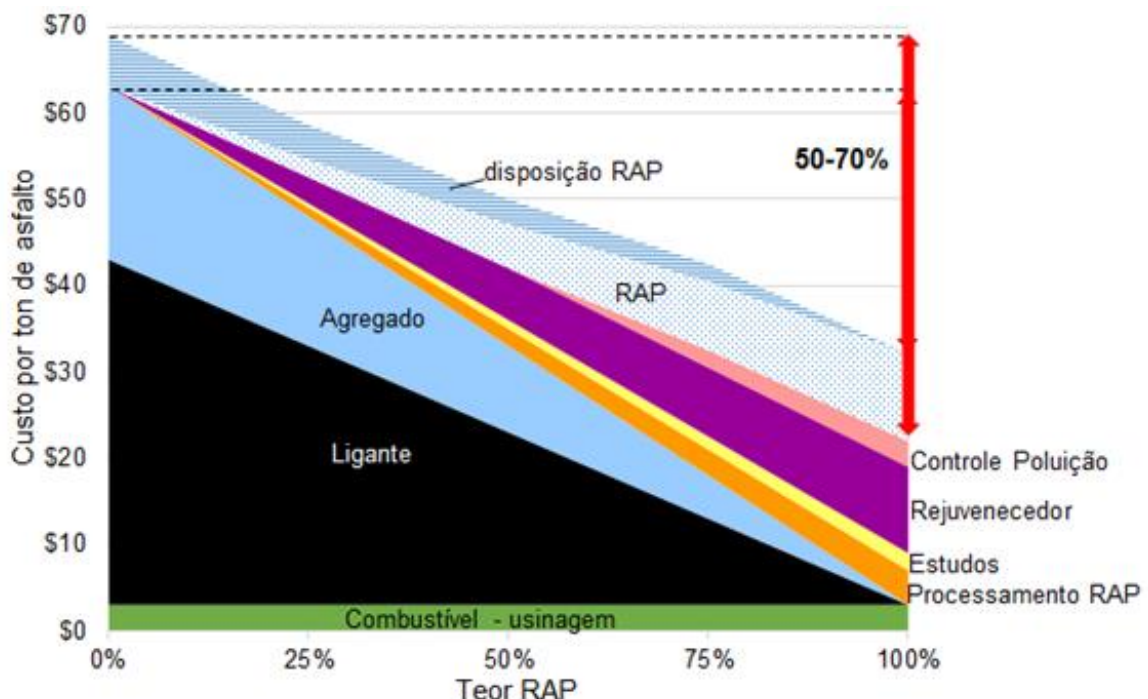


Figura 4 - Custo de uma mistura reciclada com RAP.  
Fonte: Adaptado de Zaumanis, 2016.

Além disso, uma questão inerente à utilização de resíduos, não apenas o RAP, é a heterogeneidade do material. Técnicas de homogeneização e/ou fracionamento do RAP vem sendo estudadas com o intuito de minimizar essa heterogeneidade.

Valdés et al. (2011) atestam a viabilidade técnica de misturas com o uso de porcentagens elevadas de RAP, porém, ressaltam que é indispensável caracterizar e manusear as pilhas de RAP adequadamente de modo a evitar misturas muito heterogêneas. Durante suas pesquisas, Freire et al. (2014) observaram no âmbito nacional a ausência de um levantamento de dados quantitativos da produção de material fresado e de sua reutilização na pavimentação asfáltica. Tais dados seriam relevantes para justificar a importância do tema, uma vez comprovado seu bom desempenho técnico, principalmente em um país como o Brasil que possui uma malha rodoviária tão extensa.

A Associação Nacional de Pavimentação Asfáltica (NAPA) dos EUA publicou em 2015 um relatório técnico baseado nas lições aprendidas de um extenso projeto realizado pelo referido órgão e pela Federal Highway Administration (FHWA), sobre a indústria de pavimentação do Japão. O objetivo do estudo foi a troca de experiências e a busca pelo aprendizado de como o Japão conseguiu atingir uma média de 47% de incorporação de RAP em misturas asfálticas, que era mais que o dobro do teor médio de incorporação utilizado nos EUA na época, de pouco mais de 20%. O projeto, que consistiu em uma ampla turnê de análise da indústria de pavimentação do Japão, se concentrou nas operações de construção, boas práticas aplicadas, gestão da qualidade e tecnologias utilizadas. O grupo de pesquisadores americanos concluiu que vários fatores permitiram que esse teor de incorporação fosse atingido, sendo eles técnicos, políticos e culturais. Os fatores políticos e culturais dizem respeito a uma forte ênfase na necessidade de preservar matérias-primas, a fim de evitar desperdícios e promover a reciclagem. O Japão possui uma série de leis ambientais que exigem a reutilização responsável dos resíduos de materiais de pavimentação. Além disso, as especificações técnicas japonesas não são complexas e incentivam o uso de teores elevados de RAP. Segundo os pesquisadores, os principais aspectos da especificação japonesa para misturas asfálticas recicladas incluem os itens a seguir.

- a) o RAP é processado de várias fontes, sendo que não são feitas restrições quanto à origem do RAP;
- b) a qualidade do RAP é avaliada por três critérios:
  - deve ter um teor mínimo de asfalto de 3,8%;

- o CAP recuperado deve ter uma penetração superior a 20 ou amostras do RAP compactado devem ter um módulo de tração indireta inferior a 1,70 MPa / mm;
  - o agregado extraído do RAP não pode conter mais de 5% de material pulverulento;
- c) o fracionamento do RAP é uma questão de escolha do empreiteiro, e não um requisito. A maioria dos empreiteiros opta por fracionar o RAP;
- d) gráficos de mistura são usados para determinar as proporções de CAP virgem e reciclado ou taxas de dosagem para agentes rejuvenescedores. Os projetistas podem usar CAP virgem ou rejuvenescedores para atingir um valor de penetração alvo para o CAP ou um valor de resistência à tração indireta desejado para a mistura;
- e) os projetos de mistura usam o método Marshall e os critérios obtidos através de teste de desempenho suplementar simples, sendo este a resistência à tração indireta que limita misturas com rigidez muito alta (e baixa resistência à fissuração).

Ainda, os autores afirmam que, em vários aspectos, os empreiteiros japoneses seguem as melhores práticas para o gerenciamento do RAP que foram reconhecidos há anos nos EUA, mas não são efetivamente utilizadas pela maioria dos produtores de misturas asfálticas dos EUA. As boas práticas identificadas são listadas a seguir.

- a) os estoques são cobertos e dispostos em uma superfície pavimentada;
- b) os teores de umidade e poeira do RAP são minimizados durante a britagem, processamento e armazenamento;
- c) o CAP presente no RAP é recuperado e ensaiado para avaliar sua rigidez;
- d) o RAP é fracionado e as plantas estão equipadas com múltiplos recipientes de alimentação de RAP.

Por fim, os pesquisadores concluíram que a diferença mais significativa entre a produção japonesa e americana é o método de aquecimento do RAP em um secador separado, seguido da mistura e condicionamento do RAP seco e quente com um rejuvenescedor durante várias horas antes de ser misturado com os agregados e CAP virgens.

#### 2.4.1.1 Extração e recuperação de ligante do RAP

A norma americana ASTM D2172 estabelece cinco métodos disponíveis para extração de ligantes provenientes das misturas asfálticas, sendo mais utilizados os métodos A e B, extração por centrifugação e refluxo, respectivamente. No caso destes dois métodos, depois da extração do ligante do RAP, é necessária a separação do solvente para recuperação do ligante asfáltico. Para tal, existem basicamente dois métodos, sendo o primeiro conhecido como método de recuperação Abson (ASTM D1856) e o segundo denominado de Evaporador Rotativo ou Rotoevaporador (ASTM D5404).

A NAPA recomenda duas opções para essa extração do agregado e, conseqüentemente, determinação do teor de ligante asfáltico contido no RAP, quais sejam, o método de ignição e a extração por solvente. Segundo o órgão, o método mais popular é o forno de ignição, regulamentado pela AASHTO T308 ou ASTM D6307. As vantagens deste método incluem a rapidez do ensaio e a não necessidade do uso de solventes. De qualquer forma, é necessário possuir um histórico dos agregados da região para determinar o fator de correção dos agregados, necessário para obter o teor de ligante asfáltico com precisão.

Os agregados recuperados pelo método de ignição podem ser utilizados para ensaios de granulometria e outras propriedades, porém, alguns tipos de agregados podem ter mudanças significativas de massa quando aquecidos em fornos de ignição e isto pode alterar a mineralogia dos mesmos. Por conta disso, algumas agências indicam a utilização de extração com solventes para determinação do teor de ligante asfáltico e outras propriedades do agregado recuperado do RAP. No caso da extração por solvente, o método vem sendo utilizado por muitas décadas, porém, seu uso diminuiu devido às preocupações com a saúde e o meio ambiente. Além disso, há relatos de dificuldades durante a extração por solvente no caso de ligantes modificados por polímeros. De maneira geral, a NAPA indica que é prudente verificar as particularidades de cada região para definição do melhor método de extração a ser utilizado.

#### 2.4.1.2 Agentes rejuvenescedores

De acordo com Lesueur (2009), o rejuvenescimento de ligantes asfálticos é um processo empregado para reciclar misturas asfálticas envelhecidas que consiste em recuperar as propriedades iniciais do ligante a partir da adição de um novo produto. A incorporação desse material ao ligante asfáltico promove a diluição dos asfaltenos, que se formaram durante o envelhecimento, por meio da adição de novos maltenos.

Zaumanis et al. (2014) afirmam que o uso adequado de agentes rejuvenescedores (AR) tem o objetivo de reverter o processo de envelhecimento do ligante contido no RAP, restaurando as propriedades do mesmo durante a vida de serviço e o tornando efetivamente disponível para a mistura asfáltica. De acordo com os autores, é necessário selecionar cuidadosamente o AR para fornecer as propriedades necessárias a curto e longo prazo descritas a seguir:

- Curto prazo – Os AR devem permitir a produção de uma mistura de teor elevado de RAP através da difusão rápida no ligante envelhecido e o mobilizando para produzir misturas uniformemente revestidas. Ainda, deve amolecer o ligante para produzir uma mistura viável que possa ser facilmente aplicada e compactada para a densidade requerida, sem o risco de produzir emissões nocivas. A maior parte do processo de difusão deve ser concluída antes da abertura ao tráfego, evitando o desgaste e o aumento da suscetibilidade a deformação permanente.
- Longo prazo - Os AR devem reconstituir as propriedades químicas e físicas do ligante envelhecido e manter a estabilidade durante o período de serviço. A reologia do ligante será alterada para reduzir a fadiga e o potencial de fissuração de baixa temperatura sem amolecer demasiadamente o ligante, o que pode causar problemas de deformação permanente. É necessário ter adesão e coesão adequada na mistura asfáltica, a fim de evitar o dano por umidade e falha de adesividade.

Segundo Osmari (2016), a adição de agentes rejuvenescedores aos ligantes asfálticos tem sido uma técnica frequentemente utilizada para viabilizar a utilização do RAP em teores mais elevados. Os agentes rejuvenescedores comerciais mais comumente utilizados são derivados do petróleo, porém, muitos produtos estão sendo desenvolvidos para garantir o reaproveitamento cada vez melhor de resíduos com potencial rejuvenescedor, como óleo vegetal e óleo de motores, por exemplo.

A especificação brasileira de agentes rejuvenescedores de reciclagem para misturas asfálticas à quente (Portaria DNC nº 44, de 29 de setembro de 1997)



apresenta seis grupos de agentes rejuvenescedores, AR 1, AR 5, AR 25, AR 75, AR 250, AR 500, classificados segundo sua viscosidade cinemática a 60°C, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Especificação brasileira de agentes rejuvenescedores para misturas a quente.

Característica	Especificação					
	AR-1	AR-5	AR-25	AR-75	AR-250	AR-500
	Min-Máx	Min-Máx	Min-Máx	Min-Máx	Min-Máx	Min-Máx
Viscosidade 60°C (cSt)	50-175	176-900	901-4500	4501-2500	12501-37500	37501-60000
Ponto de fulgor VAC <sup>(1)</sup> (°C)	218	218	218	218	218	218
Teor de Saturados (%)	30	30	30	30	30	30
Efeito do calor e do ar a 163°C, (RTFOT ou TFOT)						
Razão da viscosidade	4	4	4	4	4	4
Varição de massa (%)	4	4	3	3	3	3
Densidade 20\4°C	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR

<sup>(1)</sup> VAC - Ponto de fulgor Vaso Aberto Cleveland

Fonte: Portaria DNC nº 44, de 29 de setembro de 1997.

#### 2.4.2 Agregado de resíduo de concreto – ARC

Segundo Mills-Beale e You (2010), os agregados de resíduo de concreto (ARC) têm apresentado resultados promissores quando utilizados como agregado para produção de concretos. Já para produção de misturas asfálticas o uso do ARC é praticado em escala limitada. Esse tipo de agregado difere do natural devido à pasta de cimento que envolve a sua superfície, que é altamente porosa e pode contribuir para que o ARC apresente menor densidade e maior porosidade das partículas, além de aumentar a heterogeneidade entre eles e elevar a absorção de água.

Atualmente, muitos autores vêm pesquisando sobre a utilização do ARC em misturas asfálticas, a fim de propiciar a sua utilização de forma efetiva. Pasandín e Pérez (2015) concluem em seus estudos a viabilidade de utilização de agregados de resíduo de concreto em misturas asfálticas a serem implantadas em rodovias de tráfego reduzido, ressaltando que há a necessidade de uma investigação aprofundada no que diz respeito aos custos de produção desse tipo de mistura, além da criação de especificações próprias. De acordo com os estudos elaborados por Motter et al. (2015), a porosidade dos agregados de resíduo de concreto está relacionada ao aumento do consumo de ligante, e, provavelmente por essa razão, a deformação permanente também pode apresentar índices mais elevados. De qualquer forma, exceto para o teste de dano por umidade induzida, todas as propriedades analisadas

das misturas asfálticas com ARC, atendem às especificações das normas técnicas vigentes. Este fato confirma a possível viabilidade técnica para a implantação desse tipo de mistura em vias com baixo volume de tráfego, em concordância com a maioria das publicações. Os autores ressaltam que esse tipo de mistura contribui para a utilização dos resíduos de construção e demolição, minimizando os problemas relacionados à destinação irregular dos mesmos.

Radević et al. (2017), em seu trabalho sobre a avaliação da viabilidade de utilização de ARC em misturas asfálticas, apresentaram a influência da porcentagem de incorporação de ARC no teor de asfalto das misturas asfálticas, conforme Figura 5. Os autores concluem que o teor de ligante é diretamente proporcional à quantidade de ARC utilizado. A relativa dispersão entre os resultados, segundo os autores, é consequência das particularidades de cada estudo, seja na composição dos resíduos, no tipo de CAP utilizado, nas características dos agregados naturais, no tipo de dosagem, entre outras distinções. De qualquer forma, os autores ressaltam que há um consenso na literatura de que o aumento no teor de incorporação de ARC vai acarretar em aumento no teor de ligante da mistura asfáltica.

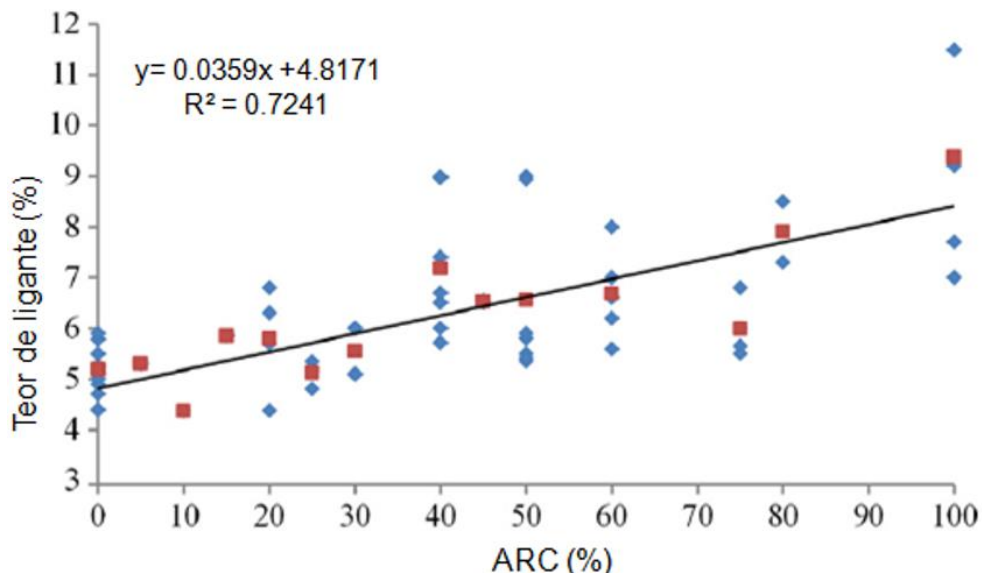


Figura 5 - Correlação entre teor de ligante e % de incorporação de ARC em misturas asfálticas. Fonte: Adaptado de Radević et al., 2017.

Com base na maioria das conclusões dos trabalhos encontrados literatura, é possível afirmar que o tamanho e a quantidade de ARC incorporado têm impacto direto no desempenho da mistura. Existem diversas pesquisas que tratam da incorporação de uma fração específica do material, ora miúda (Chen et al., 2011;

Arabani et al., 2013), ora graúda (Motter et al., 2015; Zulkati et al., 2013; Wu et al., 2013), ou ambas (Mills Beale e You, 2010) a fim de verificar seu potencial. Diante disso, Radević et al. (2017), avaliou além da quantidade de ARC incorporado, a influência da granulometria do resíduo incorporado nas misturas asfálticas. A pesquisa consistiu na produção de 10 amostras, dosadas pelo método Marshall, sendo uma de referência e outras três com incorporação específica em cada fração granulométrica (graúda, miúda ou ambas), nas porcentagens de 15%, 30% e 45%. Os autores concluíram que, em concordância com a literatura, todas as misturas com ARC incorporado, independente da fração, aumentaram o teor de ligante. A composição volumétrica das misturas, bem como a estabilidade Marshall e fluência, atenderam aos requisitos técnicos. A incorporação de ARC graúdo, em geral, melhorou a resistência à deformação permanente, sendo que efeito semelhante foi obtido com a incorporação de até 30% de ARC miúdo. Ainda, os autores ressaltam que o ARC incorporado nas misturas era proveniente de concretos de alta qualidade, sendo que, caso seja utilizado ARC de menor qualidade, pode ser encontrado um desempenho menos favorável do que os obtidos na pesquisa.

Pasandín e Pérez (2015) afirmam que pesquisas adicionais são necessárias para diversificar aplicações de agregados de resíduo de concreto em pavimentação, e promover a sua utilização como uma prática comum. Os autores ressaltam ainda que a maioria das pesquisas realizadas se concentra no uso ARC como um material granular para utilização em camadas de base e sub-base. Este fato se dá principalmente porque nas camadas mais próximas do subleito as especificações para os agregados são menos rigorosas do que nas camadas superiores.

Por fim, uma questão importante pontuada em um estudo realizado na Coreia, é que, segundo os autores, a utilização do método de dosagem Marshall é insuficiente na fabricação de misturas asfálticas com ARC. A razão principal é que a ação do soquete (impacto) durante a compactação no método Marshall pode quebrar partículas graúdas do ARC e, por conseguinte, potencialmente subestimar as propriedades das misturas fabricadas (CHO et al., 2011). A quebra dos agregados modifica a curva granulométrica da mistura fazendo com que muitos agregados tenham faces sem recobrimento de ligante asfáltico, o que resulta em seções com pouca resistência aos esforços.

### 2.4.3 Normas e recomendações

No Brasil, a norma DNIT 033:2005 – ES, define a sistemática a ser empregada na execução de camada do pavimento por meio da confecção de mistura asfáltica reciclada a quente na usina utilizando cimento asfáltico, material de revestimento asfáltico removido de pavimento existente (RAP), agregados minerais e, caso necessário, material de enchimento e agente de reciclagem. Porém, as especificações são generalistas, indicando as mesmas recomendações e diretrizes da norma de misturas asfálticas convencionais (DNIT 031:2006 – ES), sem considerações específicas para diferentes teores de incorporação, particularidades de usinagem, entre outras questões.

Para o caso específico de utilização de agregado de resíduo de concreto em misturas asfálticas, ainda não há registro de normatização brasileira que contemple os requisitos necessários e as condições de aplicação. A NBR 15116:2004 estabelece os requisitos para utilização de agregados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação, porém, apenas nas camadas de reforço de subleito, base, sub-base ou revestimento primário de vias não pavimentadas. Nos Estados Unidos e na Europa, por exemplo, a utilização de RAP em misturas asfálticas é uma técnica bastante difundida e aplicada em campo e, portanto, existem diversas normas e diretrizes que auxiliam os projetistas e construtores na fabricação dessas misturas. A própria especificação Superpave, por exemplo, através da norma AASHTO M323, recomenda modificações nos projetos de misturas conforme teor de incorporação de RAP. As recomendações da norma encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Diretrizes para seleção do ligante asfáltico em misturas com RAP.

<b>Recomendações sobre o grau do ligante virgem</b>	<b>% RAP</b>
Nenhuma mudança no projeto de seleção da mistura	< 15
Selecionar um ligante virgem com baixa viscosidade (selecionar PG 58-28 se for normalmente utilizado um PG 64-22)	15 a 25
Seguir as recomendações dos gráficos de mistura (blending charts)	>25

Fonte: Adaptado da norma AASHTO M 323.

A NCAT (National Center of Asphalt Technology), órgão importante do setor de pavimentação mundial, através da NCHRP Report 752, também faz considerações para melhoria do projeto de misturas asfálticas produzidas com alto teor de RAP.

Outro exemplo de norma com diretrizes específicas para o uso de RAP é a norma francesa NF EN 12697-35 +A1, que indica uma equação para a escolha da temperatura de aquecimento dos agregados novos de uma mistura asfáltica reciclada com teores de até 45% de RAP, a fim de determinar a temperatura de aquecimento dos agregados para fabricação deste tipo de mistura.

Ainda, a NAPA (National Asphalt Pavement Association) possui um guia que reúne as melhores práticas para o gerenciamento de RAP a partir de 2015, fornecendo orientações desde a coleta, processamento, amostragem e ensaios necessários para produção de misturas asfálticas deste tipo. O objetivo do relatório técnico, de acordo com o órgão, é promover a utilização de forma eficaz do RAP como componente de misturas asfálticas. Dentre outras orientações, o órgão indica a realização de ensaios para o RAP, listados a seguir, que são necessários para utilização deste em misturas asfálticas.

- a) teor de ligante asfáltico do RAP;
- b) granulometria do agregado recuperado do RAP;
- c) massa específica aparente do RAP;
- d) propriedades convencionais para o agregado recuperado do RAP;
- e) propriedades do ligante asfáltico recuperado do RAP (para misturas com altos teores de RAP).

#### 2.4.4 Misturas mornas

De acordo com Gennessaux (2015), nos últimos anos, diversos países vêm procurando novas alternativas que contribuam com as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, uma vez que se acredita que estes poluentes sejam os grandes responsáveis pelo aquecimento global. Dessa forma, a União Europeia começou a buscar novas maneiras de honrar tais metas, tendo sido este um grande impulso para o surgimento das primeiras iniciativas de se produzir as chamadas misturas asfálticas mornas.

Conforme o nível de aquecimento no processo de usinagem das misturas asfálticas, há variação da energia consumida, sendo que os processos de secagem e vaporização da água demandam grande quantidade energética para serem efetuados. A Figura 6 apresenta a classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem, com valores aproximados. Esse aquecimento no

processo de usinagem de misturas a quente tem três objetivos: (i) secagem dos agregados pétreos; (ii) manutenção da temperatura da mistura asfáltica; e (iii) redução da viscosidade do asfalto (MOTTA, 2011).

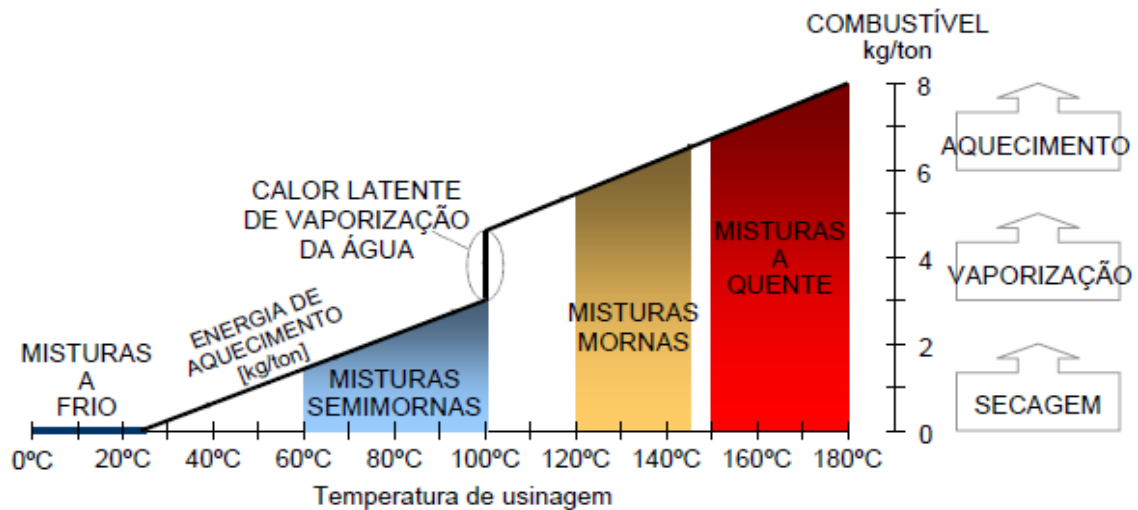


Figura 6 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados).

Fonte: Motta, 2011 adaptado de Olard (2008) e D'Angelo et al. (2008).

Segundo Motta (2011), como a temperatura tem efeito nas características reológicas do ligante, causando seu envelhecimento, o ideal é que o material fresado não seja submetido a altas temperaturas (se comparado às das misturas convencionais) na usinagem de misturas recicladas a quente, a fim de se prevenir um envelhecimento ainda maior do asfalto contido no fresado e a rápida deterioração da mistura. Diante disso, o emprego de misturas mornas e semimornas pode favorecer a adição de maiores quantidades de material fresado na produção de misturas recicladas a quente (OLARD, 2008; PROWELL e HURLEY, 2007).

Ainda, a publicação da Associação Europeia de Pavimento Asfáltico (European Asphalt Pavement Association – EAPA) realizada em 2011 informa que as novas tecnologias de redução de temperatura das misturas asfálticas, ajudam a minimizar a energia necessária para a produção das mesmas e, como consequência, reduzem as emissões de dióxido de carbono em aproximadamente 35%. Além disso, a EAPA afirma que quando a técnica for utilizada em conjunto com incorporação de RAP, as emissões poluentes podem ser ainda menores. Prowell e Hurley (2007) reiteram este fato e complementam que a menor geração de poluentes não se deve apenas ao fato de que são emitidos menos vapores e fumos de asfalto durante a mistura em usina e

a aplicação em campo, mas também porque parte do combustível que seria utilizado na usinagem, deixa de ser queimado.

Almeida e Afonso (2015), concluíram em seus estudos, que a incorporação de RAP nas misturas mornas é uma técnica muito interessante, já que mantém as propriedades mecânicas, em comparação às misturas convencionais, com a vantagem de preservação dos recursos naturais. De qualquer forma, os autores indicam que, a partir do que foi observado no referido estudo, o controle da temperatura de compactação de misturas asfálticas é um fator importante para garantir um bom desempenho dessa técnica.

É importante ressaltar que o potencial de custos adicionais tem retardado o estabelecimento desta prática. Porém, Almeida-Costa e Benta (2016), a partir do estudo de avaliação econômica e ambiental da técnica, concluíram que produzir misturas mornas, juntamente com outras medidas, tais como, armazenagem dos agregados sob cobertura, declive e superfície impermeável, controle da alimentação de combustão, permitindo a redução da perda de calor, além da conversão dos combustíveis fósseis para o gás natural, acarretam em diminuição significativa da energia consumida, redução do CO<sub>2</sub> emitido, além da queda da quantidade de gases nocivos e poeira liberada. Outro autor que corrobora esse fato é Olard (2008) que, em seus estudos, afirma que a economia de energia na produção de misturas asfálticas semimornas pode ser de 35% a 60%, condicionado ao processo, ao tipo de mistura e ao material empregado.

#### 2.4.4.1 Aditivos para produção das misturas mornas

A produção de misturas asfálticas mornas é comumente realizada a partir de três técnicas, quais sejam, espumejo do asfalto, incorporação de aditivos orgânicos (ceras) ou incorporação de aditivos químicos (surfactantes), seja diretamente no ligante ou durante a usinagem das misturas.

O espumejo do asfalto, por exemplo, ocorre com a adição de água. Neste caso, o ligante quente em contato com a água em temperatura ambiente faz com que a mesma se torne vapor e expanda significativamente, a um fator de 1,673. Para tal, a água é introduzida no processo de usinagem por injeção direta, por agregado úmido ou na forma de material hidrofílico como as zeólitas. Assim, quando esta água se dispersa no asfalto aquecido e se torna vapor há a expansão do ligante, resultando

em diminuição da viscosidade da mistura (PROWELL e HURLEY, 2007). De acordo com Motta (2011), dependendo do tipo de tecnologia utilizada para produção da espuma, é possível reduzir a temperatura de usinagem em até 50°C, havendo também a possibilidade de combinação desta tecnologia com aquelas que empregam aditivos surfactantes.

No caso dos aditivos orgânicos ou ceras, quando os mesmos são submetidos a temperaturas acima do seu ponto de amolecimento, estes aditivos interferem nas propriedades do ligante, fazendo com que haja diminuição da viscosidade. Esse tipo de aditivo pode ser introduzido previamente no ligante ou juntamente com este durante a usinagem, possibilitando uma redução da temperatura cerca de 30 a 40°C (MOTTA, 2011). De acordo com Gennessaux (2015), com o resfriamento da mistura asfáltica, estes elementos se cristalizam de modo disperso no asfalto, aumentando a rigidez do ligante e, por consequência, da mistura como um todo.

Por fim, a técnica que utiliza a incorporação de aditivos surfactantes, leva em conta a ação tensoativa do produto na interface agregado/ligante (redução da tensão superficial), auxiliando no processo de recobrimento, podendo atuar ainda como melhoradores de adesividade. Este tipo de aditivo não altera as propriedades de consistência do ligante asfáltico, medidas nos ensaios de viscosidade, penetração e ponto de amolecimento. Dependendo do tipo de tecnologia utilizada, é possível reduzir de 30 a 40°C a temperatura da mistura. Na Figura 7 são ilustrados dois exemplos de aditivos do tipo cera (a) e do surfactante (b).



(a) (b)  
Figura 7 – Aditivos para mistura morna (a) ceras (b) surfactante.  
Fonte: Motta, 2011.



#### 2.4.5 Propriedades mecânicas das misturas recicladas

Nas subseções a seguir são apresentadas as propriedades mecânicas das misturas recicladas avaliadas pela presente pesquisa, por conta de suas características e relevância relativas a cada uma delas, conforme retratado na literatura científica.

De acordo com os registros encontrados na literatura, não somente a quantidade de resíduo incorporado, mas também o tamanho do resíduo, no que diz respeito à fração na qual o agregado natural será substituído, tem influência significativa no desempenho das misturas asfálticas. Por se tratarem de materiais heterogêneos, as conclusões dos trabalhos encontrados na literatura não são unânimes, devendo ser avaliada a particularidade de cada resíduo e do planejamento experimental de cada pesquisa.

##### 2.4.5.1 Vida de fadiga

A fadiga é um processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis, que produzem as fissuras que provocarão a falha após a aplicação de determinado número de ciclos (BERNUCCI et al., 2007). A resistência à fadiga é uma propriedade mecânica essencial nas misturas betuminosas, pois a fadiga é um dos mais frequentes mecanismos de degradação de pavimento. Ocorre que, ao longo do tempo há uma diminuição no desempenho e na capacidade de resistência dos materiais de pavimentação, e estes dependem de fatores que são diretamente responsáveis pela sua degradação (carga de tráfego e condições climáticas), pela qualidade da produção de misturas ou ainda pela qualidade de construção do pavimento (ALMEIDA E AFONSO, 2015).

Segundo Bernucci et al. (2007), embora ainda não normatizado no Brasil, o ensaio de vida de fadiga mais utilizado é o de tração indireta por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos. O ensaio é realizado sob tensão e temperatura controladas, utilizando uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,1 segundo de duração do carregamento repetido. Ainda, é realizado à temperatura de 25°C, sendo os corpos de prova carregados por compressão, atuando paralelamente ao plano diametral vertical desenvolvendo, assim, uma tensão de tração uniforme no

corpo de prova, perpendicular à direção de aplicação da carga e ao longo do plano diametral vertical. Este ensaio tem sido utilizado em todo o mundo (SILVA et al., 2012; PRADYUMNA et al., 2013; ZHAO et al., 2013; GUO et al., 2014; LOPES et al., 2015), devido a sua simplicidade, tanto na execução quanto na preparação de amostras, que podem ser preparadas com o uso do soquete Marshall, compactador giratório Superpave ou extraídas de corpos de prova da própria pista.

Bessa (2017) corrobora o fato de que o método de ensaio por compressão diametral é o mais comum para testes de fadiga no Brasil e acrescenta que a aplicação do nível de tensão é de 10 a 50% do resultado de ensaio de tração indireta por compressão diametral da mistura. Segundo o autor, o critério de finalização do ensaio é quando o corpo de prova atinge a ruptura devido ao aumento do nível de deformação (nos testes por tensão controlada) ou quando a rigidez do corpo de prova diminui a uma porcentagem pré-estabelecida em relação ao módulo inicial (nos testes por deformação controlada). Apesar da ampla utilização, o autor indica que o teste possui algumas desvantagens, como o acúmulo de deformação permanente durante o teste, além da relação direta com a temperatura de ensaio e com o estado de tensões. Além disso, se a amplitude de deformação é muito baixa, algumas misturas asfálticas podem atingir um limite de resistência, que é um ponto onde o corpo de prova pode ser submetido a cargas repetidas e nunca atingir o critério de ruptura proposto.

Zhao et al. (2013) realizaram vários testes de desempenho em laboratório para avaliar algumas propriedades de misturas mornas com alto teor de RAP incorporados, uma utilizando a técnica de asfalto espumado e outra incorporando o aditivo Evotherm. Além disso, o estudo também foi feito variando o local de aplicação da mistura, sendo tanto para camadas de revestimento quanto para camadas de base. O estudo concluiu que a adição de RAP na mistura aumenta a resistência ao trincamento e à fadiga com mistura morna, e diminui com a mistura à quente, independentemente do tipo de técnica de mistura morna utilizada (asfalto espumado ou aditivo) e da camada aplicada (revestimento ou base). Porém, a pesquisa indica que esse resultado pode ser comprometido quando o teor de incorporação de RAP supera os 30%.

Nos estudos elaborados por Genesseeux (2015), que avaliou as técnicas de mistura asfáltica morna (utilizando aditivo surfactante) e o uso de elevado percentual de RAP (50%) na fabricação de misturas asfálticas, no que diz respeito à fadiga das misturas, foram definidas as seguintes conclusões: (i) a adição de RAP melhora a

resistência à fadiga das misturas não envelhecidas; (ii) a adição de RAP não alterou a resistência à fadiga da mistura quente envelhecida; (iii) a adição de RAP reduz a resistência das misturas mornas envelhecidas. No caso do estudo em questão, foi elaborado um protocolo de envelhecimento proposto nesse estudo (RILEM-adaptado), que, no caso, melhorou a resistência à fadiga das misturas de referência e reduziu a resistência à fadiga das misturas recicladas. Uma conclusão importante do estudo é que, apesar de serem mais sensíveis à fadiga que as misturas usinadas a quente, todas as misturas asfálticas mornas avaliadas apresentaram valores de deformação iguais ou superiores ao requeridos por norma.

De acordo com os estudos de Wu et al. (2017), que compararam a vida de fadiga de misturas asfálticas produzidas com ARC, utilizando dois tipos de ensaios de laboratório, concluíram que o aumento da incorporação de ARC afeta negativamente à resistência à fadiga das misturas asfálticas, principalmente quando se tratam de ensaios cíclicos. Já nos estudos de Pasandín e Pérez (2017), os autores concluem que quanto maior a porcentagem de ARC incorporado (até 42%), maior será a vida de fadiga da mistura asfáltica. Sendo assim, de acordo com eles, a incorporação de ARC não só não prejudica o desempenho quanto à fadiga, mas sim, beneficia a mistura quanto à essa propriedade. De acordo com os autores, isso pode ser explicado pela menor rigidez das misturas produzidas com ARC, em função do maior teor de ligante.

#### 2.4.5.2 Deformação Permanente

De acordo com os estudos de Zhao et al. (2013), as misturas mornas mostraram resistência à deformação permanente menor do que as misturas a quente, independentemente do tipo de tecnologia morna utilizada (asfalto espumado ou aditivo), teor de RAP ou camada estrutural aplicada. Essa redução na resistência à deformação permanente, que parece ser uma característica da técnica de misturas mornas, também foi observada por Motta (2011), porém com uma questão particular importante. No referido estudo, Motta concluiu que, quando a compactação por rolagem das misturas de usina foi realizada em temperatura significativamente mais baixa, a densificação dos materiais foi efetiva e o potencial à deformação permanente diminuiu, atendendo aos limites máximos recomendáveis no Brasil.

De qualquer forma, é importante ressaltar que, com a adição de RAP, na pesquisa de Zhao et al. (2013), a resistência à deformação das duas misturas (morna e à quente) foi aumentada independentemente da tecnologia morna utilizada ou camada estrutural onde a mistura foi aplicada.

No que tange à incorporação dos resíduos propriamente dita, de acordo com Wong et al. (2007), o uso de fíler de ARC não tem influência significativa sobre a rigidez e a deformação permanente de misturas asfálticas, ao contrário de Chen et al. (2011) e Arabani et al. (2013), que perceberam o aumento da resistência à deformação permanente das misturas quando o resíduo é incorporado como fíler. Ainda neste contexto, Wu et al. (2013), Shen e Du (2005) e Zhu et al. (2012) afirmam que o uso de 80% a 100% de ARC graúdo melhora a resistência à deformação permanente das misturas, enquanto Arabani et al. (2013) afirma que as misturas com ARC graúdo são mais instáveis que a mistura de controle. Radević et al. (2017) avaliaram 10 misturas com incorporação parcial de ARC (15%, 30% e 45%) nas frações miúda, graúda ou ambas, e concluíram que a adição de ARC graúdo em geral melhora a deformação permanente das misturas asfálticas e a adição de até 30% de ARC miúdo também produz o efeito semelhante. Em seus estudos, os autores avaliaram que os efeitos combinados de aumento do teor de ligante e ARC levam a valores de deformação permanente mais elevados, porém todas as misturas encontraram-se dentro dos requisitos normativos.

Quanto ao revestimento asfáltico fresado, muitos estudos têm mostrado que a resistência à deformação permanente das misturas é satisfatória para misturas com altos teores de RAP por conta da presença de agentes rejuvenescedores. Por outro lado, é preciso cautela na utilização desses agentes rejuvenescedores, no sentido de que eles reduzem a rigidez da mistura e podem causar um aumento da deformação permanente quando utilizados de forma inapropriada. Neste sentido, os autores ressaltam que a dosagem de agentes rejuvenescedores deve ser cuidadosamente desenvolvida para não amolecer demasiadamente o ligante asfáltico, além de atenção especial para que ocorra incorporação suficiente do agente de reciclagem na película de ligante antes da abertura ao tráfego (ZAUMANIS et al., 2014).

#### 2.4.5.3 Resistência ao dano por umidade

A umidade é uma das causas mais graves de deterioração do pavimento e a suscetibilidade à umidade dos pavimentos é muito relevante para verificação do desgaste potencial das misturas, que ocorre quando a coesão entre as partículas de agregado e ligante é perdida (TRAN, 2014).

Segundo Bernucci et al. (2007) a avaliação do dano nas misturas asfálticas causado pela umidade é de grande importância, uma vez que afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. Na realidade o dano por umidade evidencia os possíveis problemas de adesividade agregado-ligante asfáltico. O teste de sensibilidade à ação deletéria da água mais usado no Brasil segue o procedimento descrito em AASHTO T 283.

Segundo Motta (2011), que avaliou as propriedades de uma mistura morna utilizando aditivo surfactante em comparação a uma mistura a quente convencional (sem incorporação de RAP em ambas), a verificação dessa propriedade é importante, uma vez que as misturas mornas poderiam estar mais sujeitas à ação da água, devido ao uso de menor temperatura de aquecimento dos agregados. No referido estudo, as misturas mornas não apresentaram diferenças com relação às misturas convencionais, no que diz respeito ao dano por umidade. Essa verificação indica que o surfactante agiu adequadamente em todas as misturas avaliadas, compostas de agregados do tipo granito/gnaiss. Entretanto, a autora ressalta que não se sabe como seria tal comportamento caso fossem empregados agregados provenientes de outros tipos de rocha.

No caso das misturas com ARC, a porosidade do agregado é indicada como a maior causa do aumento do dano por umidade induzida encontrado nas pesquisas, porém, a maioria delas apresenta resultados dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos vigentes, apesar de serem ligeiramente superiores aos das misturas de referência (Zhang et al., 2016). No caso do RAP, como o agregado é recoberto com ligante, existe menos chance de a água penetrar entre as partículas. Sendo assim, geralmente nas misturas recicladas com altos teores de RAP são esperados resultados melhores quanto à sensibilidade à umidade melhor ou pelo menos igual às misturas de referência.

#### 2.4.5.4 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência é uma das características principais do pavimento, especialmente pavimentos asfálticos. Ele se refere à elasticidade do pavimento, que afeta sua capacidade de resistência e recuperação após as deformações sofridas pela ação do tráfego (TRAN, 2014).

Segundo Behnood et al. (2015), no modelo das teorias elásticas, o módulo de resiliência, juntamente com algumas outras informações é usado como entrada para gerar um projeto de pavimento com espessuras ótimas. Jamshidi et al. (2016) reforçaram também que o módulo de resiliência é uma propriedade significativa na concepção do pavimento do tipo empírico-mecanístico (método comumente utilizado no Brasil para dimensionamento dos pavimentos), e vem sendo utilizado como dado de entrada na teoria elástica das multicamadas ou modelo de elementos finitos para calcular a resposta estrutural a partir do carregamento de tráfego.

Zhao et al. (2013) concluíram que a porcentagem de RAP incorporado ou a camada de pavimento aplicada não interferem no módulo de resiliência, tanto para misturas mornas quanto para misturas quentes, ou seja, os testes realizados pelos autores não produziram diferenças significativas para esse parâmetro. Já nos estudos de Xiao et al. (2009) os resultados indicam um significativo aumento no valor do módulo de resiliência com a adição de RAP, mantidas as condições de temperaturas propostas no referido experimento. Para Shu et al. (2012), que também obteve resultados maiores de módulo de resiliência em amostras com incorporação de RAP, este aumento pode ser atribuído ao efeito de reforço de asfalto envelhecido presente no RAP.

Pasandín e Perez (2015), analisando o estado da arte de misturas betuminosas produzidas com ARC, indicam que os estudos não são unânimes quando se trata do módulo de resiliência das misturas ensaiadas. Enquanto alguns estudos apresentam resultados com módulo de resiliência maior quanto maior for a incorporação de ARC, outros autores indicam que esse valor pode diminuir na medida em que elevados teores de ARC forem adicionados. Essa disparidade está relacionada principalmente ao tratamento ou não que esse tipo de agregado reciclado recebe antes de ser incorporado à mistura asfáltica.

De acordo com Radević et al. (2017), nas misturas asfálticas produzidas com substituição parcial ou total de agregados naturais por ARC o tamanho máximo de

ARC tem grande influência na rigidez das misturas. De acordo com os autores, os resultados das misturas produzidas com 100% de ARC na fração miúda são maiores no que diz respeito à rigidez, quando comparadas às misturas de controle. O contrário ocorre quando a substituição é feita na fração graúda, onde as misturas asfálticas apresentaram valores de rigidez menor do que as misturas de referência. Os autores ainda ressaltam que a quantidade e a fração de ARC incorporado não tem influência significativa no módulo de rigidez das misturas asfálticas, porém, o impacto da fração de substituição (graúda ou miúda) é mais pronunciado em comparação com o impacto da quantidade de ARC incorporado. Por fim, os autores ressaltam a boa qualidade do ARC utilizado, obtido de um concreto de resistência elevada (classe C35/45), que refletiu nos resultados satisfatórios das misturas avaliadas.

Contrariamente aos resultados apresentados por Radević et al. (2017), Zulkati et al. (2013), concluíram que as misturas produzidas com ARC, tanto na fração graúda quanto na miúda, apresentaram rigidez menor do que as misturas de referência, provavelmente devido ao aumento no teor de ligante ótimo que estas misturas requerem.

Analisando o módulo de resiliência das misturas mornas em relação às misturas convencionais a quente, Motta (2011) concluiu que os ensaios de módulo de resiliência indicaram resultados semelhantes entre as misturas a quente e morna, com valores acima do mínimo exigido pela especificação do DNIT, mesmo com um volume de vazios mais elevado.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo apresenta as etapas do programa experimental desenvolvido na pesquisa, bem como os materiais e métodos utilizados. Os ensaios, em sua maioria, foram realizados no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins (LAMP) da UFPR, exceto para o ensaio de deformação permanente, que foi realizado no simulador de tráfego do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Ainda, a recuperação do ligante asfáltico envelhecido do RAP foi realizada no equipamento de evaporação rotativa do Laboratório de Polímeros Paulo Scarpa (LaPPS), no Departamento de Química da UFPR.

É importante ressaltar que a presente pesquisa se limita às misturas asfálticas mornas produzidas com aditivo surfactante, e à substituição, nas frações graúda e miúda, de agregado natural por RAP, ARC ou ambos. Os agregados utilizados são encontrados na região de Curitiba cujas características estão especificadas no item 3.1, portanto, materiais com propriedades diferentes podem ter comportamento distinto ao observado na presente pesquisa. Além disso, a avaliação de desempenho está condicionada a execução dos ensaios de vida de fadiga, deformação permanente, dano por umidade induzida e módulo de resiliência, não sendo objeto da pesquisa outros ensaios para avaliação de propriedades da mistura.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Ligante asfáltico

O ligante utilizado para produção das misturas foi o Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP 50/70, proveniente da Usina Nova Prata (Figura 8), localizada no município de Paranaguá/PR, cuja origem é da Refinaria Presidente Getúlio Vargas da Petrobrás - REPAR, localizada no município de Araucária-PR.





Figura 8 - Coleta CAP – tanque Usina Nova Prata.

A REPAR, no ato de fornecimento de material, disponibiliza um certificado de ensaio com todos os resultados de caracterização, cujas informações encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização CAP 50/70 fornecido pelo fornecedor.

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D5	50 a 70	56	0,1mm
Ponto de amolecimento	D36	46 min	48,1	°C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E102	141 min	166,5	s
Viscosidade Brookfield 135°C SP21 20RPM	D4402	274	322	cp
Viscosidade Saybolt Furol a 150°C	E102	50 min	86,9	s
Viscosidade Brookfield 150°C SP21	D4402	112 min	164	cp
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	E102	30 a 150	34	s
Viscosidade Brookfiel a 177°C SP21	D4402	57 a 285	62	cp
RTFOT Penetração retida	D5	55 min	66	%
RTFOT Aumento do ponto de amolecimento	D36	8 max	5,7	°C
RTFOT Ductilidade a 25°C	D113	20 min	>100	cm
RTFOT Variação em % massa	D2872	-0,50 a 0,50	-0,003	%
Ductilidade a 25°C	D113	60 min	>100	cm
Solubilidade no tricloroetileno	D2042	99,5 min	99,9	% massa
Ponto de fulgor	D92	235 min	214	°C
Índice de Suscetibilidade térmica	X018	-1,5 a 0,7	-1,4	N/A
Densidade relativa a 20/4° C	D70	anotar <sup>(1)</sup>	1,008	N/A
Aquecimento a 177°C	X215	NESP <sup>(2)</sup>	NESP	N/A

(1) Ensaio não faz parte da especificação

(2) Não espuma

Fonte: REPAR, 2016.

### 3.1.2 Agregados naturais

Os agregados naturais foram coletados nas frações brita 1, pedrisco e pó de pedra (Figura 9), de origem granítica, provenientes da Pedreira Nova Prata Mineração, localizada no município de Paranaguá/PR, por questões de disponibilidade.

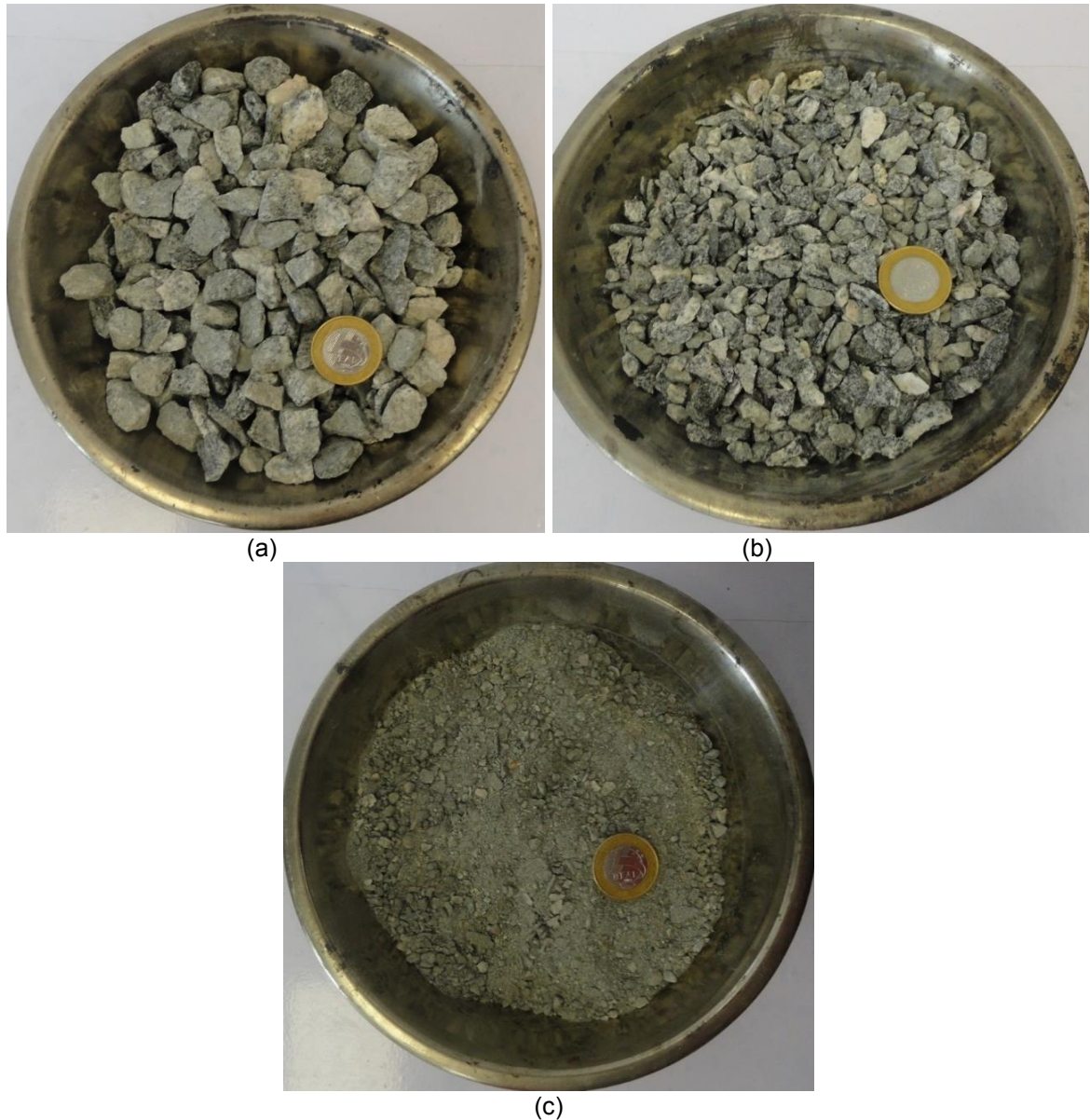


Figura 9 – Agregado natural (a) brita 1; (b) pedrisco; (c) pó de pedra.

### 3.1.3 Agregados de resíduo de concreto - ARC

Os agregados de resíduo de concreto são provenientes da usina de reciclagem Soliforte Reciclagem Ltda., localizada no município de Campo Largo/PR,

coletados nas frações de brita, pedrisco e pó de pedra reciclado (areia reciclada), conforme Figura 10. A usina de reciclagem Soliforte Reciclagem Ltda. foi escolhida pela proximidade geográfica com a universidade, produtora de agregados de resíduo de concreto para comercialização.

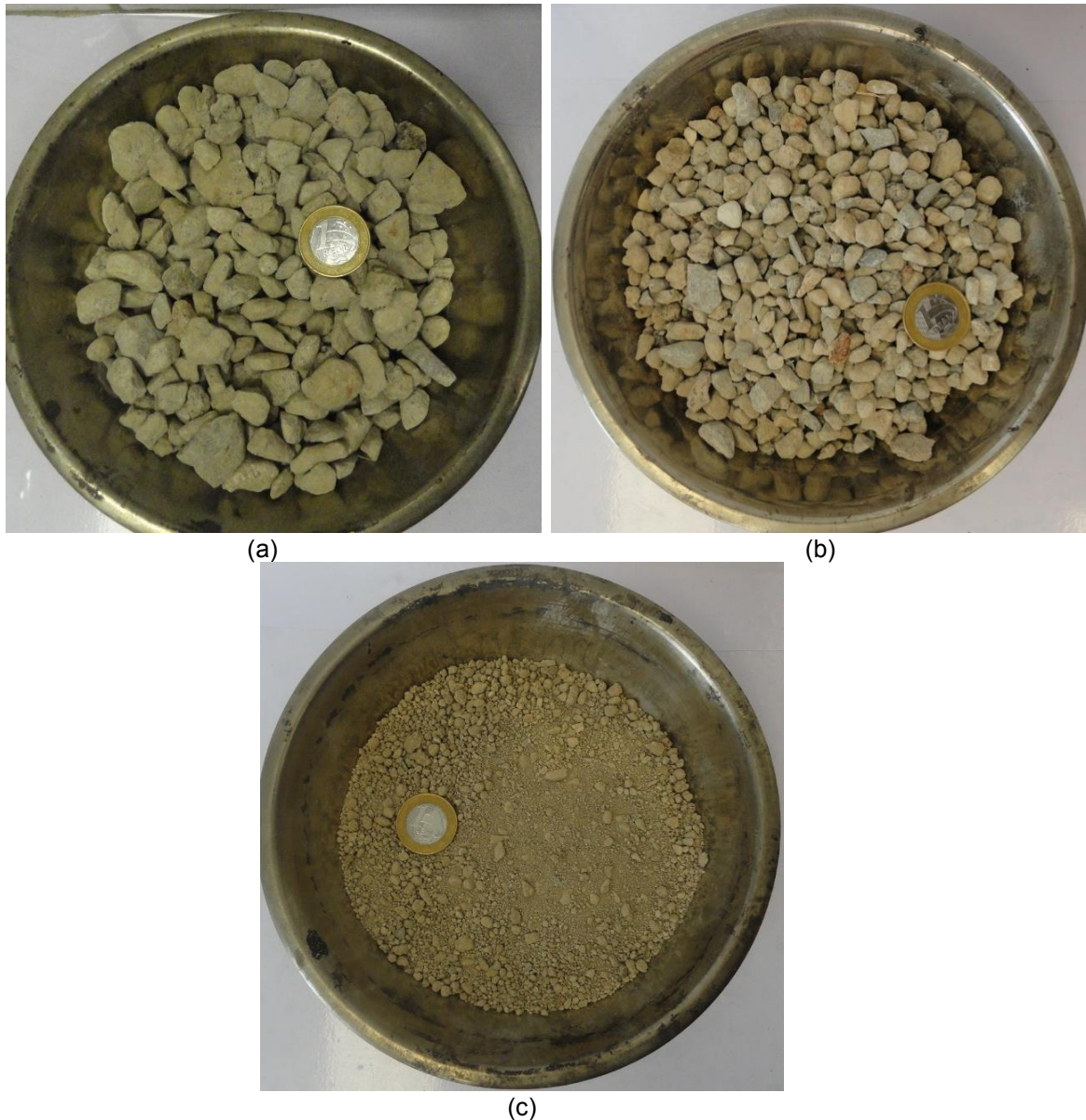


Figura 10 – Agregado reciclado – (a) brita; (b) pedrisco; (c) pó de pedra

#### 3.1.4 Revestimento asfáltico fresado - RAP

O RAP disponibilizado para a presente pesquisa é proveniente de depósito de revestimento asfáltico fresado (Figura 11) localizado nas dependências da empresa Nova Prata Mineração que segundo os responsáveis, é resultante da fresagem de um

trecho da PR-407, entre o km 14 e 15, executado pela concessionária Ecovia Caminho do Mar S/A. Como pode ser observado na Figura 11 o material fresado estava depositado em um local aberto e sem cobertura, no centro de uma pedreira e usina de produção de misturas asfálticas.



Figura 11 - Depósito de material fresado (local de coleta).

### 3.1.5 Aditivo para mistura morna

O aditivo utilizado para confecção das misturas mornas (Figura 12) é do tipo surfactante, que, de acordo com a literatura não altera a viscosidade do ligante asfáltico. Por esse motivo, além da disponibilidade de mercado, o aditivo do tipo surfactante foi escolhido para realização desta pesquisa. De acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, as moléculas que atuam como agentes tensoativos são provenientes de óleos naturais de plantas e a tecnologia permite a redução da temperatura da mistura asfáltica numa faixa de 50 a 75°C.



Figura 12 – Aditivo mistura morna.

### 3.1.6 Agente rejuvenecedor - AR

O agente rejuvenecedor AR utilizado na mistura com 100% de material fresado foi um produto comercial de origem de petróleo denominado CYCLOPAV 900, fornecido pela empresa Betunel Indústria e Comércio Ltda., que se assemelha à classificação do AR-5 conforme diretrizes da especificação brasileira de agentes rejuvenecedores (Portaria DNC nº 44). Na Figura 13 é possível visualizar a consistência do produto a temperatura ambiente.



Figura 13 – Agente rejuvenecedor – CYCLOPAV 900.

A

Tabela 8 apresenta as características CYCLOPAV 900 informadas pelo fornecedor, bem como os valores da classificação AR-5 da especificação brasileira.

Tabela 8 – Características AR – CYCLOPAV 900

<b>Característica</b>	<b>Cyclopav 900</b>	<b>Especificação AR-5</b>
	<b>Min-Máx</b>	<b>Min-Máx</b>
Viscosidade 60°C (cP)	900 +/- 500	176-900
Ponto de fulgor, VAC <sup>(1)</sup> (°C)	220	218
Teor de Saturados (%)	30	30
<b>RTFOT a 163°C</b>	<b>Cyclopav 900</b>	<b>Especificação AR-5</b>
Razão da viscosidade	3	4
Variação de massa (%)	4	4

<sup>(1)</sup> VAC - Ponto de fulgor Vaso Aberto Cleveland

### 3.2 MÉTODOS

A seguir são apresentados os métodos de desenvolvimento da pesquisa que, para efeito didático, foram segmentados em cinco etapas, detalhadas na Figura 14.

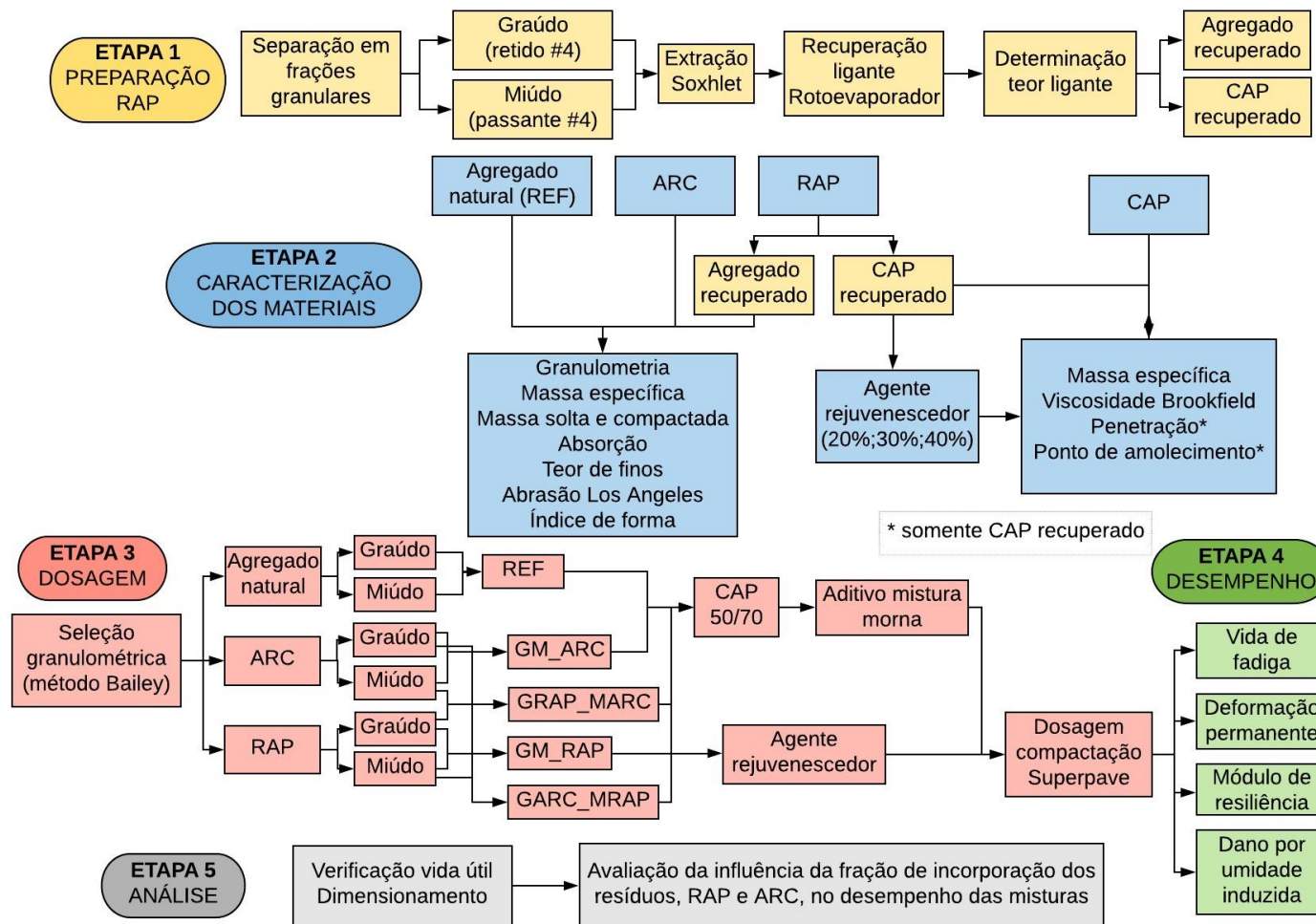


Figura 14 – Etapas de pesquisa.

### 3.2.1 ETAPA 1 – PREPARAÇÃO DO RAP

Inicialmente, o RAP coletado foi disposto sobre uma superfície plana para eliminação da umidade, durante o período mínimo de cinco dias, com homogeneização frequente, conforme Figura 15. Em seguida, devido a presença de grumos, o RAP foi peneirado manualmente na peneira de abertura 25mm, conforme Figura 16, de forma a eliminar esse material que, em escala de campo, deveria ser descartado ou rebitado antes da utilização do mesmo para produção das misturas asfálticas.



Figura 15 – Secagem RAP.

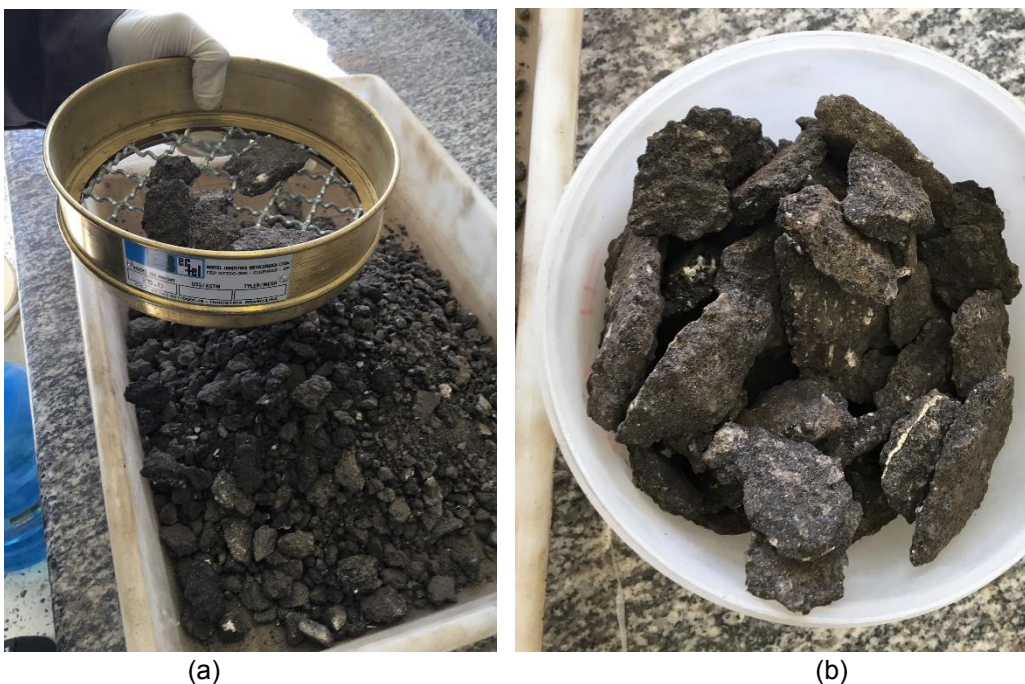


Figura 16 - (a) peneiramento para eliminar grumos (b) grumos maiores 25mm descartados.



Após o peneiramento manual, o material foi quarteado a fim de preparar as amostras para caracterização. Para essa caracterização são necessários procedimentos de extração e posterior recuperação do ligante asfáltico presente no RAP. O método utilizado para extração do ligante asfáltico foi o de extração por solvente, através do extrator Soxhlet, por questões de disponibilidade de equipamento. Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da norma DNIT 158:2011 ME (Figura 17), nas dependências do laboratório da empresa Afirma Engenharia Viária. O solvente escolhido para extração do ligante foi o diclorometano, ou cloreto de metileno, devido ao seu baixo ponto de ebulição, de aproximadamente 40°C, minimizando assim o incremento no envelhecimento do asfalto por conta das altas temperaturas, às quais o ligante asfáltico poderia ser submetido caso outro tipo de solvente fosse utilizado para a extração. A extração foi realizada até quando, após várias descargas pelo sifão, o solvente retornava límpido (cor clara) ao balão, o que, em média, acontecia após 6-8 horas de extração.

Sabe-se que o ligante asfáltico contido em uma mistura é distribuído entre os grãos de acordo com a sua superfície específica, que é a relação entre a área total da superfície dos grãos e sua massa. Dessa forma, a parte fina de uma mistura é mais rica em ligante que a parte graúda, devido a maior superfície específica dos finos. Na prática, se as frações graúdas e miúdas ficarem estocadas na mesma pilha, pode haver segregação, que resulta em problemas de heterogeneidade quando amostradas, não só em termos de granulometria da mistura reciclada resultante, mas também no teor final de ligante. Esta segregação pode ser reduzida quando as partículas de uma pilha possuem tamanhos uniformes. Diante disso, de acordo com a pesquisa de Gennessaux, publicada em 2015, é de fundamental importância à divisão de uma pilha de RAP em pelo menos duas frações, principalmente para o reuso do RAP em elevadas taxas, graduação uniforme, teor de ligante e outras propriedades.



Figura 17 - (a) molde de papel filtro; (b) colocação amostra no molde; (c) extrator Soxhlet com amostra e solvente; (d) extração em andamento; (e) etapa final de extração-solvente límpido; (f) secagem superficial; (g) amostra após secagem em estufa.

Diante dessas considerações e do objetivo da pesquisa de avaliar a influência de frações granulométricas distintas nas propriedades das misturas, o RAP foi separado em duas frações, através da peneira #4. O material retido na peneira #4 foi chamado de fração graúda e o material passante na peneira #4 foi denominado de fração miúda. Sendo assim, para determinação do teor de ligante foram ensaiadas duas amostras de cada uma das frações, graúda, miúda e total (sem separação da peneira #4). Na Figura 18 é possível visualizar as frações utilizadas neste estudo, graúda (a) e miúda (b), bem como a fração total (c).

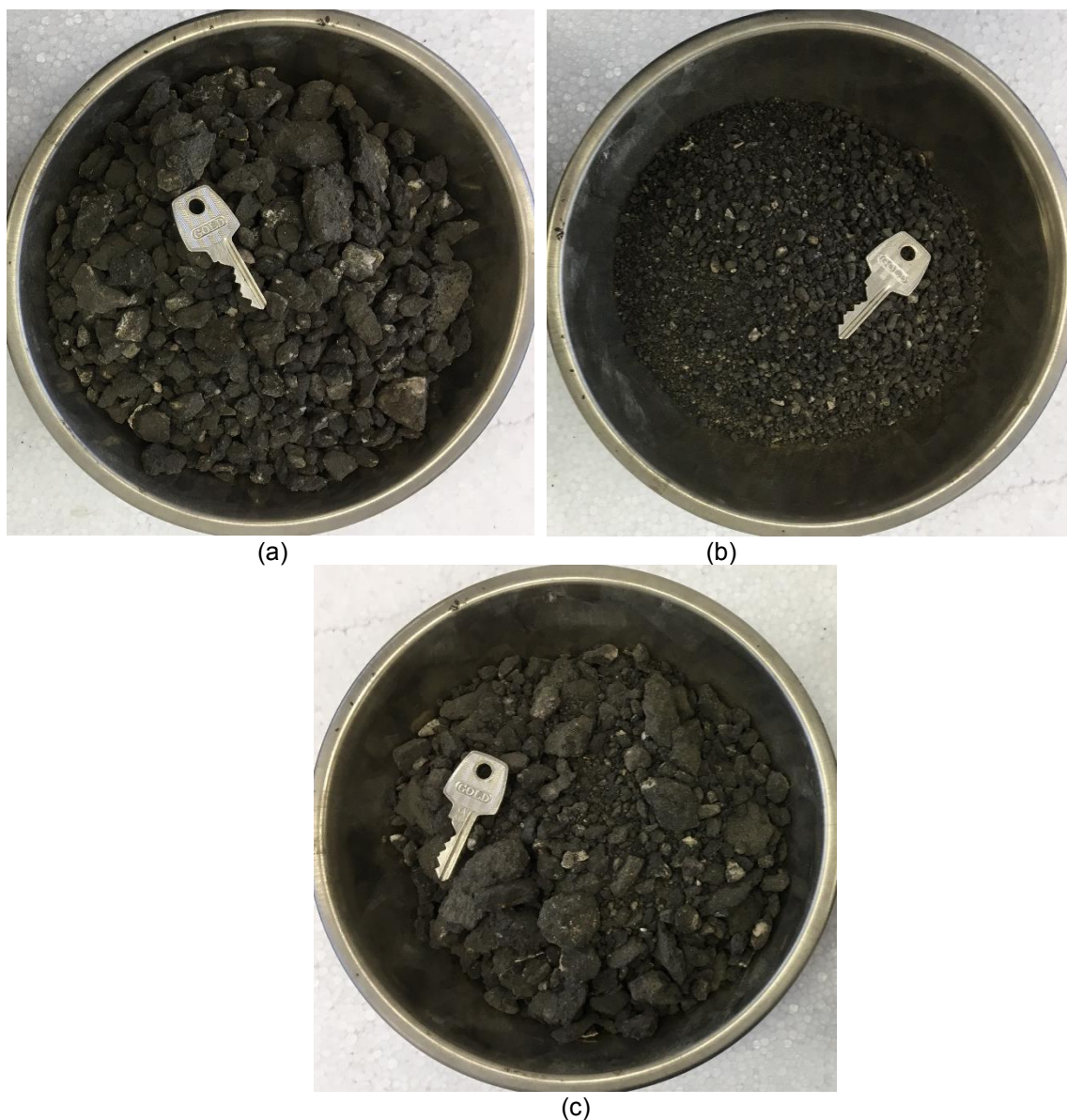


Figura 18 – Frações do RAP - (a) graúda; (b) miúda; (c) total.

Após a extração do ligante asfáltico do RAP, o agregado “lavado” foi caracterizado, nas mesmas propriedades ensaiadas para o agregado natural e o ARC.

A única diferença na metodologia de ensaio foi aplicada na determinação das massas unitárias solta e compactada, onde foi utilizado o cilindro Proctor tanto para o agregado graúdo, quanto para o agregado miúdo. A AASHTO T19 estabelece que, para agregados com TMN acima de 4,75mm deve ser utilizado um recipiente metálico maior, cujo volume do recipiente é determinado em função do tamanho nominal máximo da mistura. Neste caso, por conta do volume reduzido de material graúdo resultante após a extração, o ensaio foi realizado também no cilindro Proctor, conforme Figura 19.



Figura 19 - Determinação massa unitária solta e compactada - RAP graúdo após extração.

A extração e a recuperação do ligante asfáltico é um ponto importante na dosagem de misturas recicladas, principalmente no que diz respeito à adoção de um método que consiga realizar tais procedimentos sem alterar as propriedades do ligante asfáltico. Neste sentido, a utilização de equipamento do tipo evaporador rotativo, conhecido como rotoevaporador ou rotavapor, é bastante interessante, já que o princípio básico de funcionamento do equipamento leva em conta a utilização de vácuo no sistema, fazendo com que o ponto de ebulição diminua, podendo manter o solvente (e a amostra como um todo) em uma temperatura baixa e constante. Sendo assim, para o caso de amostras de solvente misturado a ligantes asfálticos, como é o caso, a possibilidade de manter a temperatura da amostra em patamares abaixo do ponto de ebulição em condições normais, faz com que esse equipamento seja interessante e totalmente aplicável, sendo inclusive, normatizado pela ASTM D5404. Sendo assim, foi utilizado o rotoevaporador do Laboratório de Polímeros Paulo Scarpa

(Figura 20), departamento de Química da UFPR, onde o CAP contido no RAP, ainda misturado ao solvente, foi submetido à destilação.



Figura 20 - Separação do solvente e do CAP utilizando o Rotoevaporador.

### 3.2.2 ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta segunda etapa, foi realizada a caracterização física dos materiais coletados para desenvolvimento da pesquisa. Os agregados foram caracterizados quanto aos ensaios de granulometria (NBR NM 248:2003), absorção de água (NBR NM 30:2001), massa específica real e aparente (NBR NM 53:2009 e NM 52:2009), massa unitária solta e compactada (AASHTO T19), teor de finos (NBR NM 46:2003), abrasão Los Angeles (NBR NM 51:2001) e índice de forma (NBR 7809:2006). Com exceção do ensaio de abrasão Los Angeles, por conta da quantidade de material insuficiente após extração do ligante, todos os ensaios citados foram realizados para o agregado natural, o ARC e o agregado recuperado do RAP.

O ligante asfáltico novo foi ensaiado quanto à viscosidade dinâmica utilizando o viscosímetro Brookfield (ABNT NBR 15184:2004) a massa específica e a densidade relativa (ABNT NBR 6296:2012). Quanto ao ligante recuperado do RAP após a destilação, o mesmo foi caracterizado quanto a penetração, ponto de amolecimento e viscosidade Brookfield de acordo com as normas NBR 6576:2007, NBR 6560:2016, e NBR 14950:2003, respectivamente. Ocorre que, o viscosímetro Brookfield não

conseguiu registrar a rotação do spindle. Sendo assim, fez-se necessária a adição de AR a fim de restaurar as propriedades do ligante asfáltico e possibilitar a realização da caracterização do mesmo. O método de dosagem de AR mais tradicional empregado nas misturas asfálticas recicladas está relacionado com o teor capaz de recompor as características do ligante quanto à parâmetros empíricos como penetração e ponto de amolecimento, por exemplo.

No presente estudo, foram adicionados teores de 20% a 40% de AR, em peso ao ligante envelhecido. O AR foi adicionado em temperatura ambiente ao ligante aquecido a 150°C, de forma manual em cadinhos metálicos, conforme Figura 21. Os teores elevados são em razão dos resultados da caracterização do ligante, que se mostrou bastante envelhecido. Após a adição, foram realizados os ensaios de viscosidade Brookfield e penetração em cada uma das amostras. A determinação do teor ótimo de AR foi realizada em função do teor que apresentou resultados de ensaio de viscosidade e penetração, mais próximos possíveis dos resultados de ensaio do ligante original (CAP 50/70).



Figura 21 – Ligante recuperado RAP com adição de AR em teores de 20 a 40%.

### 3.2.3 ETAPA 3 – DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O presente estudo tem seu experimento planejado a partir da confecção de cinco misturas produzidas com a incorporação de RAP e ARC, em diferentes frações granulométricas (graúda e/ou miúda). O tipo de CAP, a faixa granulométrica escolhida, o aditivo para produção de misturas mornas e as demais variáveis dos respectivos ensaios para avaliação de desempenho, foram mantidos constantes. A variável de controle do estudo é a fração em que cada resíduo foi incorporado, ora graúda, ora miúda ou ambas. A nomenclatura das amostras foi estabelecida a partir dos materiais que as compõem e, para as misturas com incorporação dos dois resíduos (RAP e

ARC), a partir da fração onde foi adicionado cada um deles. Sendo assim, além da mistura de referência, denominada REF, foi confeccionada uma mistura com 100% de ARC, denominada GM\_ARC, e uma mistura com 100% de RAP, denominada GM\_RAP. A mistura com incorporação de RAP na fração miúda e ARC na fração graúda foi denominada de GARC\_MRAP e, por fim, a mistura com incorporação de RAP na fração graúda e ARC na fração miúda foi chamada de GRAP\_MARC. Os corpos de prova foram produzidos de forma a atender as especificidades de geometria e volumetria exigidos em cada ensaio. Diante da inerente heterogeneidade da produção de misturas asfálticas com resíduos, os corpos de prova que não atendiam às especificações citadas foram descartados sendo que a quantidade de corpos de prova efetivamente ensaiados está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Quantidade de corpos de prova ensaiados.

Ensaio	Quantidade de CP's (unidade)				
	REF	GM_ARC	GARC_MRAP	GRAP_MARC	GM_RAP
Fadiga	12	12	12	11	10
Deformação Permanente	2	2	2	2	2
Dano por umidade induzida	6	6	6	6	6
Módulo de resiliência	15	15	15	15	15

### 3.2.3.1 Seleção granulométrica

Conforme já mencionado, uma das premissas da presente pesquisa é a utilização de um método de seleção granulométrica mais analítico e menos empírico que, por consequência, deve otimizar as propriedades da mistura asfáltica. Sendo assim, na presente pesquisa foi utilizado a metodologia Bailey para seleção granulométrica, em substituição à faixa granulométrica comumente utilizada na execução de camadas de rolamento (Faixa “C” do DNIT), por se tratar de um método de seleção mais analítico. A granulometria das misturas foi selecionada seguindo as diretrizes do método, sendo que os percentuais de incorporação das frações de agregados foram ajustados de modo que a atingir um valor médio entre os limites de proporção AG (agregado graúdo) propostos pelo método, considerando essa como premissa dos projetos de dosagem. No Apêndice A consta um roteiro para seleção granulométrica de uma mistura pelo método Bailey, detalhando os procedimentos de cálculo utilizados para composição das misturas produzidas na presente pesquisa.

Em termos gerais, inicialmente, foi preciso definir a massa unitária escolhida que corresponde ao grau de intertravamento do agregado graúdo desejado para a mistura e tem relação com o tipo de mistura a ser dosada. A porcentagem adotada para a massa unitária escolhida de todas as misturas foi de 100% da massa unitária solta, a fim de garantir à mistura um comportamento graúdo. Posteriormente, foram definidas as peneiras de controle do método (PCP, PCS, PCT e PM), em função do TMN, que foi de 19mm para todas as misturas, exceto para as duas onde o agregado graúdo do RAP controlava a mistura. Neste caso (mistura GM\_RAP e mistura GRAP\_MARC), o TMN foi de 9,5mm, haja visto a granulometria muito fina do RAP estudado, condição esta herdada das misturas virgens que originaram este material, agravada ainda pela fresagem do mesmo.

A partir das diretrizes propostas pelo método e, conforme roteiro detalhado no Apêndice A, foi feita a análise da mistura de agregados combinada, realizada por meio do parâmetro de proporção de agregado graúdo (AG).

#### 3.2.3.2 Usinagem das misturas

A partir da seleção granulométrica e da composição das misturas, as mesmas foram dosadas segundo a metodologia Superpave, utilizando os critérios de projeto nível 1 (critério volumétrico). A dosagem foi feita inicialmente por tentativa e erro a fim de definir o teor ótimo de ligante. Por se tratar de um estudo com resíduos, sendo o ARC um material que é notadamente definido por sua alta porosidade, os teores de ligante não seguem os valores convencionais de 4% a 6% comumente determinados para misturas com granulometria densa Faixa C do DNIT. No caso da mistura GM\_ARC, por exemplo, o estudo foi iniciado com esses teores de 4% a 6%, porém, com essa quantidade os agregados não foram cobertos totalmente pelo ligante (Figura 22) fato este possivelmente causado pela alta absorção do agregado reciclado, principalmente do agregado miúdo.





(a) (b)  
Figura 22 - Agregados com falta de recobrimento do ligante - mistura ARC- (a) teor de ligante 4,0%;  
(b) teor de ligante 6,0%.

Ainda, na dosagem das misturas foram confeccionados três corpos de prova para cada um dos cinco teores de ligante asfáltico estudados, além de duas amostras (Figura 23), também de cada um dos teores, para determinação da massa específica máxima medida da mistura solta (Gmm) pelo método RICE obedecendo a norma AASHTO T209-05, normatizado no Brasil pela NBR 15619:2016.



Figura 23 – Amostra para o ensaio RICE.

Inicialmente o material foi peneirado e fracionado de acordo com os percentuais em massa definidos para produção de cada mistura. Em seguida, os agregados foram

aquecidos em estufa a uma temperatura de 10°C acima da temperatura de usinagem, conforme recomendações normativas. Depois de aquecidos, os agregados foram misturados ao ligante asfáltico previamente aquecido e, homogeneizados até completa cobertura dos agregados. Essa etapa foi realizada em um misturador mecânico da marca infraTest, modelo Bituminous Laboratory Mixer, com capacidade máxima de 30 litros, 230V 60Hz, conforme Figura 24. A sequência de usinagem, para as misturas REF e GM\_ARC, consistiu na colocação dos agregados (miúdos e graúdos) no misturador, homogeneização por 100 segundos, adição do ligante asfáltico e, por fim, homogeneização por 400 segundos. Essa sequência foi alterada somente para as misturas onde o material fresado foi incorporado, já que o mesmo possui particularidades com relação a remobilização do ligante asfáltico envelhecido e a inserção de agente rejuvenescedor (para a mistura GM\_RAP). Neste caso, os detalhes de produção dessas misturas estão descritos no item 3.3.3.



Figura 24 - Misturador mecânico utilizado para produção das misturas.

Após a usinagem e a adequada homogeneização, a mistura foi porcionada nas massas de cada corpo de prova e foi mantida em estufa na temperatura de compactação por um período de duas horas, a fim de simular o tempo decorrido entre a usinagem e aplicação em campo, ou seja, o envelhecimento de curto prazo.

Em seguida os corpos de prova foram moldados no compactador giratório Superpave (CGS), conforme Figura 25(a), que tem a capacidade de moldar corpos de prova de diâmetros de 100 mm e 150 mm. A especificação Superpave requer molde de 150 mm, entretanto, o método admite a utilização dos moldes com 100mm de diâmetro. Em função da otimização na quantidade de agregado e da possibilidade de ensaios convencionais com amostras desse diâmetro, no presente trabalho os corpos de prova foram confeccionados a partir dos moldes de 100mm de diâmetro (Figura 25(b)). A compactação no CGS foi realizada com tensão de compressão vertical durante a rotação de 600 kPa, ângulo de rotação externo de  $1,25^\circ$  e velocidade constante de 30 rpm. A dosagem foi realizada para um N de projeto de 100 giros, indicada para tráfego médio à pesado de vias urbanas, equivalente à carga de eixo simples entre  $3 \times 10^6$  e  $3 \times 10^7$ . Nesta análise inicial os teores ótimos de ligante de cada mistura foram escolhidos com base nas misturas que resultassem em 4% de vazios no N de projeto. Ocorre que, com a utilização do aditivo surfactante, para cumprimento deste requisito, foi necessário reduzir o número de giros para 70, conforme detalhado no item 3.3.4.

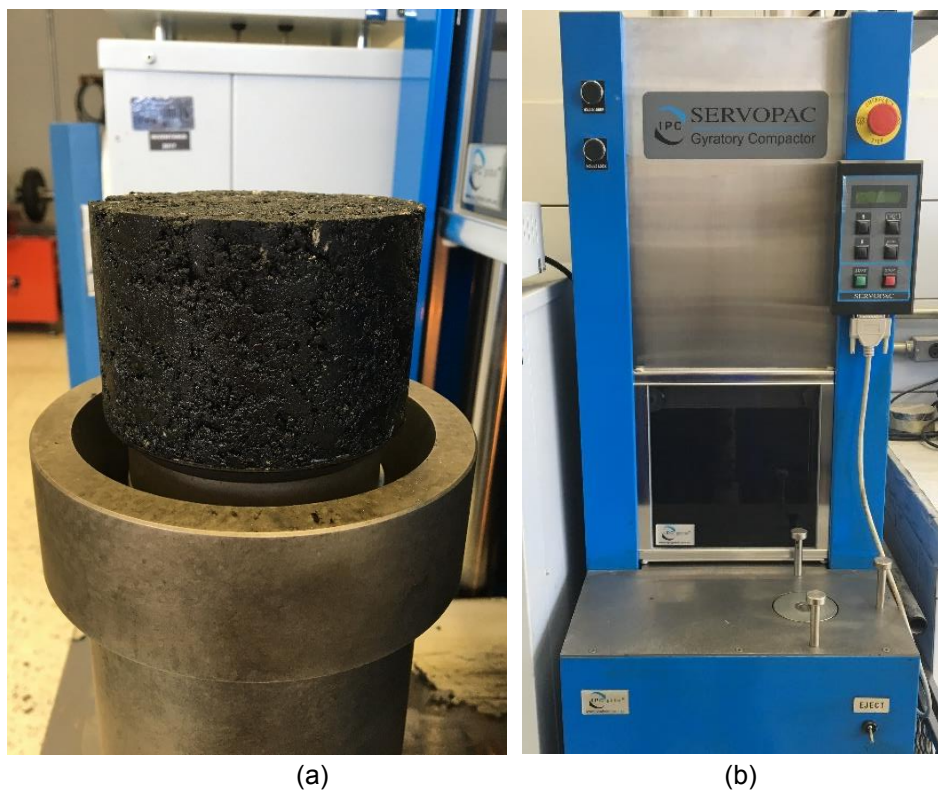


Figura 25 – (a) compactador giratório utilizado para produção dos corpos de prova; (b) corpo de prova compactado

A partir da pesagem dos corpos de prova, considerando o volume como a diferença entre a massa na condição de superfície saturada seca e a massa da mistura nesta condição e depois submersa em água, foi possível calcular os parâmetros volumétricos de cada um dos teores. Foram calculados os parâmetros de massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) da mistura compactada, a massa específica máxima da mistura solta ( $G_{mm}$ ), o volume de vazios ( $V_v$ ), os vazios do agregado mineral (VAM) e a relação betume x vazios (RBV). A escolha do teor de ligante ótimo foi realizada para atender ao critério de 4% de vazios, para camada de rolamento, condicionado ao atendimento dos limites estabelecidos para o RBV, conforme a norma DNIT 031:2006-ES.

### 3.2.3.3 Incorporação do RAP

Para produção das misturas com incorporação do RAP foi necessária a adoção de certas premissas que são relatadas a seguir.

- a) Para a formulação das misturas asfálticas que continham RAP (GM\_RAP, GRAP\_MARC e GARC\_MRAP) foi utilizada a granulometria do material após extração, ou seja, sem ligante, considerando que 100% do ligante asfáltico contido no RAP está sendo remobilizado para a mistura. Essa condição acarreta em curvas com maior quantidade de finos, já que antes da extração a curva contém “falsos” grãos, que são formados pela aglomeração de agregado com ligante asfáltico. Em especial, o material fresado estudado apresenta característica bastante fina, sendo provável a herança da granulometria mais fina das misturas antigas e ainda agravado pelo fato da execução da fresagem propriamente dita, que quebra as partículas dos agregados maiores.
- b) Na mistura GM\_RAP, que tem 100% de material fresado, foi utilizado AR a fim de recuperar as propriedades do ligante envelhecido. Neste caso, conforme indicação do fabricante, o aditivo surfactante foi incorporado ao AR, ambos em temperatura ambiente, no mesmo teor utilizado nas demais misturas (0,4% em peso). Com relação a sequência de dosagem desta mistura, inicialmente o RAP foi colocado no misturador em temperatura ambiente, sendo aquecido na temperatura de usinagem por 15 minutos. Na

sequência foi adicionado o AR e o tempo de mistura foi de 500 segundos, 100 segundos acima das misturas sem incorporação de material fresado, a fim de garantir a completa homogeneização e remobilização adequada do ligante asfáltico.

- c) No caso das misturas GRAP\_MARC e GARC\_MRAP, levando em conta que o percentual de material fresado incorporado na mistura não ultrapassou 50% do total de agregados, não foi utilizado AR, assim como outras pesquisas com condições similares (GENNESSAUX, 2015; OLIVEIRA, 2013). A sequência de usinagem foi análoga à mistura GM\_RAP, sendo que o material fresado foi colocado no misturador à temperatura ambiente e mantido em aquecimento (temperatura de usinagem) por 15 minutos. Em seguida foi adicionado o ARC e os agregados foram misturados por 200 segundos. Com a homogeneização completa dos agregados foi adicionado o ligante virgem no teor previsto na dosagem (previamente mistura com o aditivo surfactante) e, então, os materiais foram misturados por 500 segundos. A Figura 26 apresenta a sequência de produção da mistura GARC\_MRAP, como exemplo.

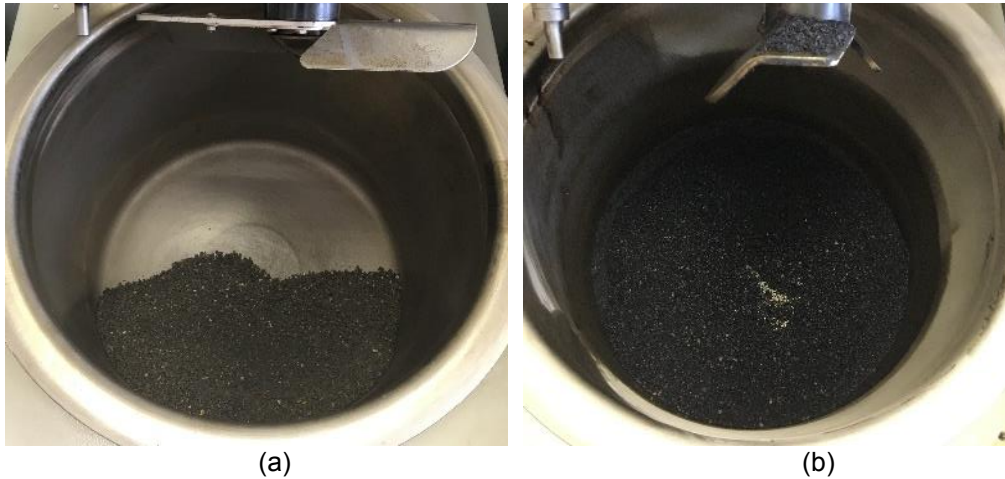




Figura 26– (a) RAP temp. ambiente; (b) RAP aquecido por 15 minutos; (c) incorporaç o de ARC; (d) mistura dos agregados 200s; (e) adiç o de ligante virgem; (f) mistura completa 500s.

#### 3.2.3.4 Aditivo surfactante

Para confec o das misturas mornas foi utilizado um aditivo do tipo surfactante. O aditivo foi incorporado na proporç o de 0,4% sobre o peso do ligante, conforme orienta es do fabricante. De acordo com as recomenda es, o aditivo foi incorporado no ligante aquecido na mesma temperatura utilizada na mistura a quente, sendo agitado mecanicamente durante aproximadamente 2 minutos para homogeneiza o adequada, conforme Figura 27.



Figura 27 - Equipamento utilizado para mistura mecânica do ligante com o aditivo surfactante.

As temperaturas de trabalho foram estabelecidas com relação às temperaturas de usinagem e compactação de uma hipotética mistura a quente, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante asfáltico CAP 50/70 utilizado na pesquisa, obtidas nas três temperaturas do ensaio de viscosidade Brookfield (ASTM D2493, 2009), 135°C, 150°C e 177°C. As temperaturas de usinagem e compactação, caso as misturas fossem usinadas a quente seriam de 150°C e 140°C, respectivamente. Para a mistura GM\_RAP foram verificadas as temperaturas de usinagem e compactação a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante asfáltico com adição de AR no teor ótimo (40%) conforme a dosagem. As curvas, provenientes do ensaio de viscosidade Brookfield, estão representadas na Figura 28. A partir dessa definição, com a utilização do aditivo de mistura morna inicialmente foi considerada a redução de 30°C nas temperaturas de usinagem e compactação de todas as misturas, redução esta que é comum entre os trabalhos da literatura (MOTTA, 2011; PROWELL e HURLEY, 2007; GENNESSAUX, 2015), independente da técnica utilizada.

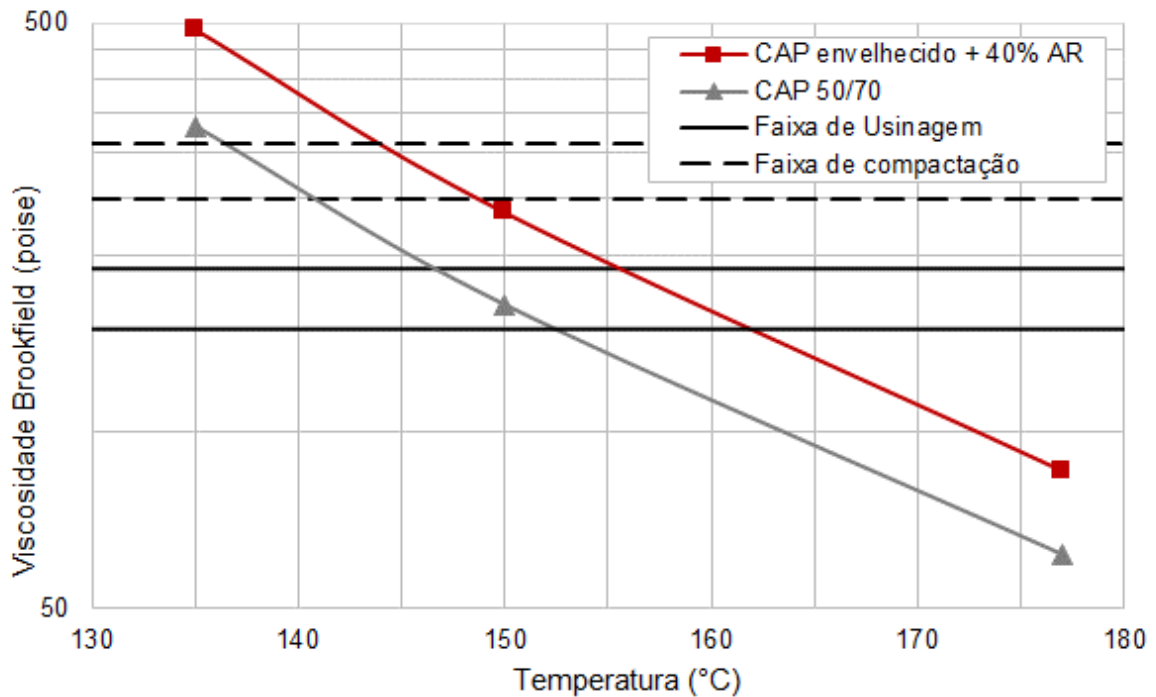


Figura 28 - Curva viscosidade (Brookfield) versus temperatura – CAP 50/70 e CAP envelhecido + 40% AR.

Ocorre que, este tipo de aditivo tem por princípio ativo a alteração da adesão entre o agregado e o ligante, diminuindo sua tensão superficial, promovendo uma melhor lubrificação da mistura mesmo a temperaturas mais baixas e possibilitando assim, uma melhora na trabalhabilidade. Por esta razão, inicialmente a dosagem foi realizada para um N de projeto de 100 giros, indicada para tráfego médio a pesado de vias urbanas, equivalente à carga de eixo simples entre  $3 \times 10^6$  e  $3 \times 10^7$ , porém, após a incorporação do aditivo de mistura morna o número de vazios reduziu expressivamente em relação à mesma mistura usinada a quente e compactada com 100 giros. Sendo assim, foram moldados corpos de prova da mistura REF com 50, 75 e 100 giros, para verificação de qual seria a energia de compactação necessária para atingir o mesmo volume de vazios da mistura a quente compactada com 100 giros. Conforme demonstrado na Figura 29, com 70 giros a mistura atendeu aos requisitos volumétricos quanto a porcentagem de vazios, demonstrando uma melhora na trabalhabilidade e facilidade de compactação, mesmo com redução de 40°C na temperatura. Esse fato também foi observado nos estudos de Johnston et al. (2015), que observaram uma redução de 34% da energia de compactação necessária para atingir os mesmos patamares de volume de vazios do projeto de referência (mistura a quente), quando da incorporação do aditivo surfactante, passando de 100 para 66



giros. Em razão do exposto, todas as misturas foram compactadas com 70 giros e com redução de temperatura de 40°C.

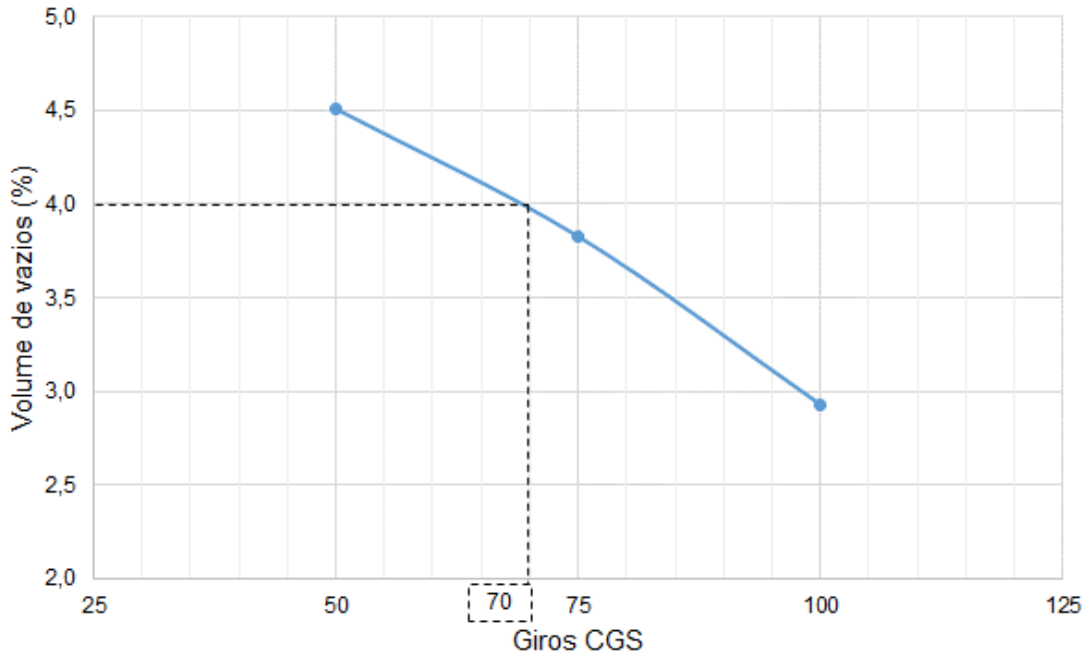


Figura 29 - Volume de vazios em função do número de giros (CGS) – misturas mornas.

No caso das misturas com incorporação de RAP e outro agregado, no caso ARC, foi utilizada a equação da norma NF EN 12697-35+A1, para determinação da temperatura de aquecimento dos agregados novos. De acordo com as recomendações da norma, a equação 5 deve ser utilizada na fabricação de misturas asfálticas recicladas com teores até 45% de RAP. Na presente pesquisa, como o RAP foi aquecido por 15 minutos na temperatura de usinagem (120°C), pela equação 5, os agregados novos também foram inseridos nesta mesma temperatura. A Tabela 10 apresenta as temperaturas de usinagem, compactação e aquecimento de agregados de todas as misturas mornas (WMA) produzidas na presente pesquisa.

$$T_{ag} = \frac{T_{fab} - \%RAP \times T_{RAP}}{1 - \%RAP} \quad (5)$$

Onde:

Tag = Temperatura dos agregados novos

Tfab = Temperatura de fabricação das misturas

TRAP = Temperatura do RAP

%RAP = Taxa de reciclagem

Tabela 10 - Temperaturas de usinagem e compactação das misturas.

Misturas	Temperatura HMA*		Temperatura WMA		Diferença temp.	Temp. ligante novo	Temp. agregados
	Usin.	Compact.	Usin.	Compact.	Usin. e Compact.		
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
REF	150	140	110	100	40	150	120
GM_ARC	150	140	110	100	40	150	120
GM_RAP	160	150	120	110	40	-	120
GRAP_MARC	160	150	120	110	40	150	120
GARC_MRAP	160	150	120	110	40	150	120

\*temperatura caso as misturas fossem usinadas a quente; obtidas pelo ensaio de viscosidade Brookfield

### 3.2.4 ETAPA 4 – DESEMPENHO E PROPRIEDADES MECÂNICAS

#### 3.2.4.1 Vida de fadiga

Na presente pesquisa, os ensaios de fadiga foram realizados na prensa universal triaxial, da marca IPC Global modelo UT500g, localizada no LAMP. Durante o ensaio foi possível monitorar a magnitude da carga aplicada, a deformação horizontal e o módulo de resiliência (MR) em função do número de ciclos. Durante a realização do ensaio a frequência de aplicação da carga foi de 1 Hz (60 ciclos por minuto), com tempo de carregamento de 0,1 segundo e 0,9 segundo de descarregamento. Além disso, a carga inicial foi mantida controlada e o deslocamento total inicial foi lido com o LVDT (Linear Variable Differential Transducers). Para cálculo do MR, foram utilizados os dados dos primeiros 60 ciclos, analisados a cada 15 aplicações de carga, sendo os últimos 5 ciclos de cada 15 considerados no cálculo da deformação resiliente.

O ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos, de 10 cm de diâmetro, compactados no CGS. Previamente à realização do ensaio de fadiga, foram ensaiados três corpos de prova para verificar o valor da resistência à tração estática por compressão diametral (RT), em uma prensa Marshall elétrica (Figura 30), seguindo as diretrizes da norma DNIT 136:2010-ME.



Figura 30 - Prensa Marshall – determinação da resistência à tração estática.

A partir da obtenção dos valores de RT de cada uma das misturas foi possível iniciar o ensaio de fadiga, onde os corpos de prova foram submetidos a diferentes níveis de tensão, proporcionais à RT, quais sejam, 20%, 30% e 40%, sendo no mínimo dois CP para cada nível de tensão. O critério adotado para finalização do ensaio foi a redução em 50% do MR inicial. No caso das misturas GRAP\_MARC e GARC\_MRAP não foi possível atingir o critério de ruptura quando aplicada a carga correspondente a tensão de 20% da RT. De acordo com Thompson e Carpenter (2006), há um ponto definido no qual a curva de tensão por número de ciclos de cada mistura se desvia da relação de linha reta típica e assume um declive relativamente plano, e o fenômeno é chamado de “limite de resistência à fadiga” das misturas, conhecido pelo termo em inglês “Fatigue Endurance Limit” (FEL). Essa inclinação plana indica que as deformações mais baixas produzem vidas de fadiga extraordinariamente longas. Ainda, segundo os autores, esse limite de resistência à fadiga representa o ponto de equilíbrio entre dano e cura em uma mistura asfáltica. Para os níveis de tensão acima desse limite, o dano causado é consideravelmente maior do que o potencial de cura da mistura. Já quando estão abaixo, o dano é igual ou menor que o potencial de cura, sendo que é pequeno o suficiente para ser potencialmente reparado durante o ciclo de descarga. No caso das duas misturas, GRAP\_MARC e GARC\_MRAP, os corpos

de prova testados no nível de tensão de 20% ultrapassaram os 150000 ciclos e mais de 45 horas de ensaio cada e não havia sinais de redução no módulo de resiliência, conforme pode ser observado na Figura 31 e Figura 32. Sendo assim, para essas duas misturas, foi adicionado o nível de tensão de 50% para composição da curva de fadiga, além dos níveis de 30% e 40% ensaiados.

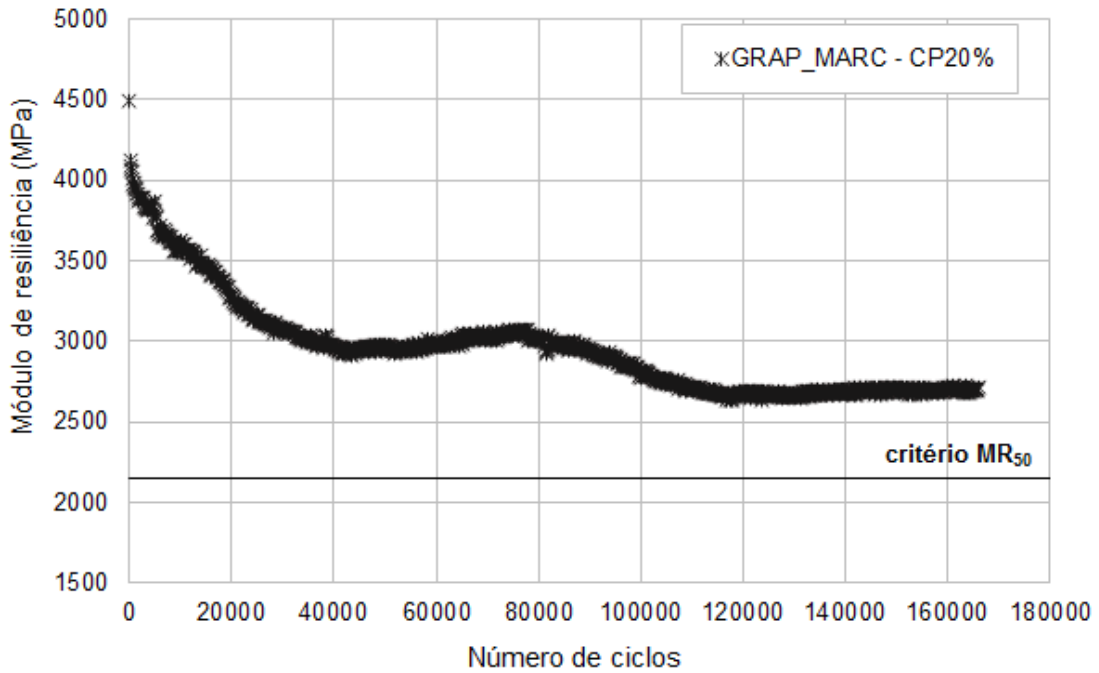


Figura 31 – Ensaio de fadiga tensão 20% da RT: não cumprimento critério de ruptura – mistura GRAP\_MARC.

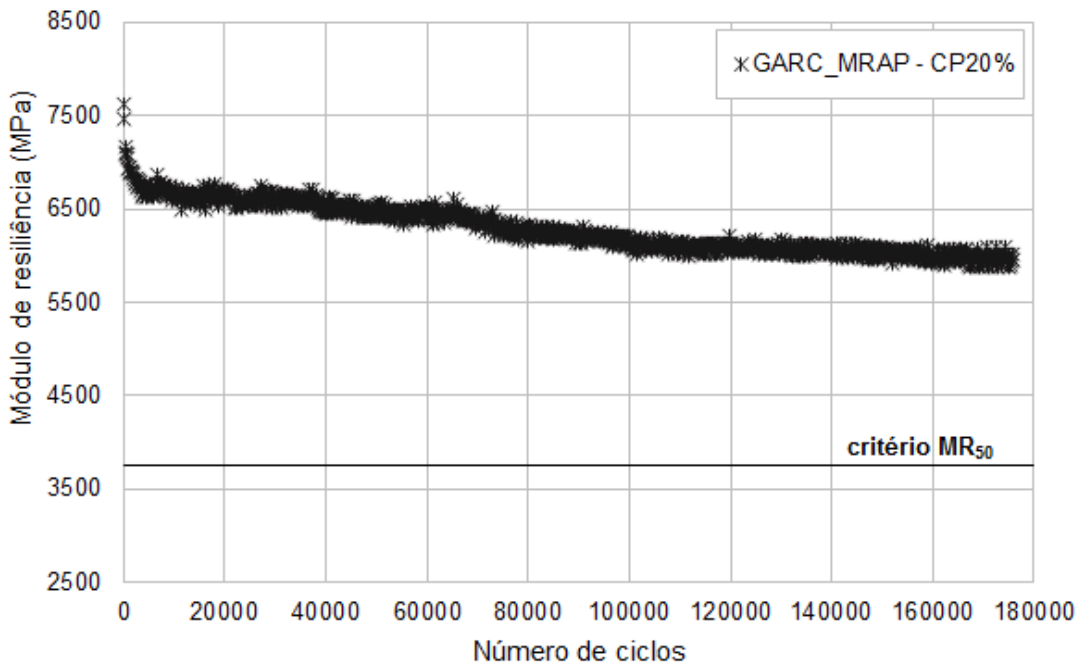


Figura 32 - Ensaio de fadiga tensão 20% da RT: não cumprimento critério de ruptura – mistura GARC\_MRAP.

A forma de carregamento empregada foi semiseno-verso (haversine) e o coeficiente de Poisson foi fixado em 0,30 para temperatura de 25°C. Ainda, os ensaios foram realizados sob temperatura de 25°C. Na Figura 33(a) está apresentado o equipamento (prensa universal) onde foi realizado o ensaio de fadiga e na Figura 33(b) o corpo de prova montado no sistema de carregamento.

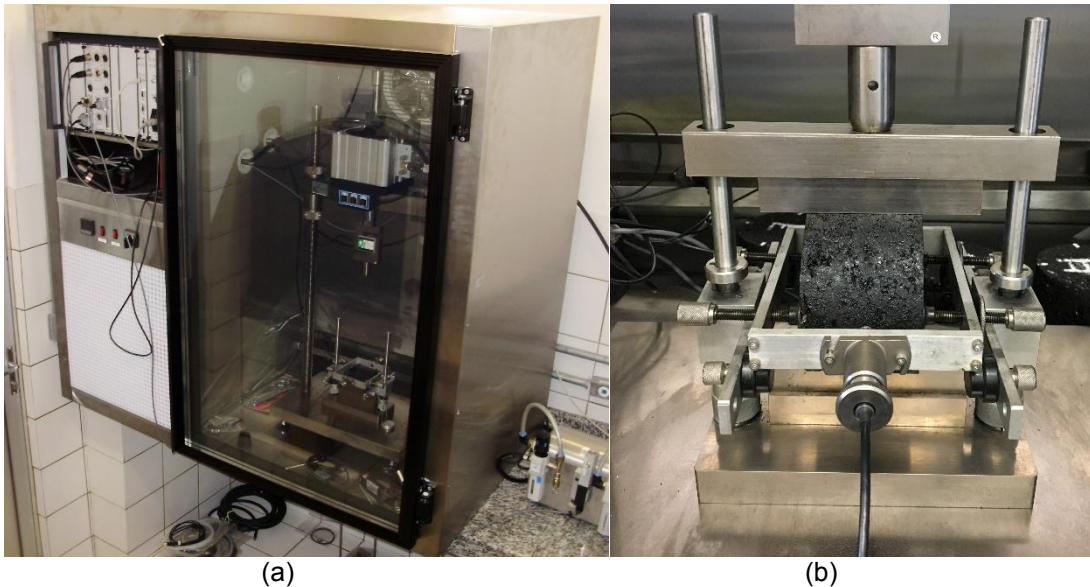


Figura 33 - Ensaio vida de fadiga (a) prensa universal (b)carregamento.

A vida de fadiga das misturas, expressa pelo número  $N$  de solicitações necessárias para o fim do ensaio, foi relacionada à diferença de tensões no centro da amostra ( $\Delta\sigma$ ) e à deformação específica resiliente, em dois gráficos regidos por modelos do tipo log-log. Para tal, foram utilizados os dados obtidos pelo software da prensa universal para cálculo dos parâmetros através da equação 6.

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_t}{MR} \quad (6)$$

Onde:

$\varepsilon_i$  = deformação inicial do corpo de prova;

$\sigma_t$  = tensão de tração no centro do corpo de prova;

MR = módulo de resiliência

As tensões de tração no centro do CP foram calculadas com as equações 7, 8 e 9.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi t d} \quad (7)$$

$$\sigma_c = \frac{-6F}{\pi t d} \quad (8)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_c - \sigma_t = 3\sigma_t - (-\sigma_t) = 4\sigma_t \quad (9)$$

Onde:

$\sigma_c$  = tensão de compressão no centro do corpo de prova;

$\sigma_t$  = tensão de tração no centro do corpo de prova;

F = carga aplicada;

t = espessura do corpo de prova

d = diâmetro do corpo de prova

O módulo resiliente considerado para o cálculo da deformação inicial foi calculado a partir da equação 10.

$$MR = \frac{F}{\Delta * t} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (10)$$

Onde:

$\varepsilon_i$  = deformação inicial do corpo de prova;

F = carga aplicada;

MR = módulo de resiliência;

$\mu$  = coeficiente de Poisson (adotado 0,3);

t = espessura do corpo de prova;

$\Delta$  = deslocamento resiliente inicial do corpo de prova obtido pelo LVDT;

#### 3.2.4.2 Deformação permanente

O ensaio de deformação permanente, que simula a passagem de roda de um veículo no pavimento, foi executado na mesa compactadora (moldagem das placas) e simulador de tráfego de laboratório (ensaio propriamente dito) desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts Chaussées* (LCPC), atual *Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux* (IFSTTAR). A moldagem das placas foi realizada no LAMP na UFPR e o ensaio no simulador de tráfego foi realizado no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de

Santa Catarina (UFSC).

Inicialmente as misturas foram compactadas através de rolagem por roda de pneu com cargas e pressão de inflação reguláveis, na temperatura de compactação, realizada por equipamento denominado mesa compactadora (Figura 34). O equipamento também permite selecionar o local das passadas do pneu, o que permite sobrepor parcialmente a área de uma passada em relação à anteriormente aplicada, como normalmente ocorre na compactação de campo. A compactação seguiu a especificação francesa NF 98-250-2 e foi produzido um par de placas (2 unidades) para cada mistura estudada, com as dimensões de 18cm x 50cm x 5cm.



Figura 34 - Mesa compactadora de placas para ensaio de deformação permanente.

Após a preparação das placas, as mesmas foram posicionadas no simulador de tráfego, denominado *Orniereur*. O ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes da NF 98-253-1, em duas placas simultaneamente, colocadas uma em cada lado do equipamento, munido de um eixo com dois pneumáticos. O pneumático fica permanentemente em contato com a placa asfáltica, calibrado com 0,6 MPa e aplicando carregamento de 5kN em movimento longitudinal de ida e vinda. A frequência de ensaio foi de 1Hz, ou seja, em 1 ciclo ocorreram duas passadas. Inicialmente as placas foram submetidas a passagem de 1000 ciclos em temperatura

ambiente, sendo esta a leitura inicial do corpo de prova. Posteriormente, seguindo as diretrizes da norma francesa, o sistema de aquecimento do equipamento foi acionado e as placas foram condicionadas à temperatura de 60°C por 12h para, então, iniciar o ensaio propriamente dito. As medidas de afundamento são realizadas em 15 pontos distribuídos em toda a área solicitada pelo pneu e o resultado é a média dessas medições, conforme Figura 35.



Figura 35 - Registro dos afundamentos – ensaio de deformação permanente.

As medições foram realizadas em 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos, tendo o ensaio como concluído quando a placa foi submetida a um número máximo de 30.000 ciclos (60.000 passadas) ou quando a mistura asfáltica se deformou excessivamente de maneira a prejudicar as leituras de afundamento. As diretrizes francesas para deformação permanente têm limitado o valor obtido no simulador de tráfego em 10% como sendo o limite aceitável para camadas de concreto asfáltico utilizadas como revestimentos, com espessuras entre 6 a 8 cm, em condições de tráfego severas.



### 3.2.4.3 Dano por umidade induzida

Na presente pesquisa o ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da AASHTO T 283 e NBR 15617:2015, que é a norma brasileira para o ensaio em questão. Para tal, foram confeccionados seis corpos de prova com volume de vazios de 7% (+/-1%) e, três deles, após saturação parcial dos vazios, sofreram condicionamento severo através de congelamento e posterior aquecimento. Os outros três corpos de prova, sem condicionamento, foram ensaiados quanto à resistência à tração seguindo as recomendações normativas. A Figura 36 demonstra as etapas de ensaio para determinação do dano por umidade induzida.



Figura 36 - (a) saturação parcial CP's; (b) congelamento (-18°C) por 16h; (c) banho a 60°C por 24h; (d) rompimento CP resistência à tração.

A especificação de serviço de concretos asfálticos do DNIT (DNIT ES 031:2006) determina que a resistência mínima retida à tração após a exposição à água, deve ser no mínimo 0,7, ou seja, a perda máxima de resistência deve ser de 30% após o condicionamento em relação aos valores de referência (sem condicionamento).

#### 3.2.4.4 Módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram executados por compressão diametral de carga repetida, de acordo com as recomendações da norma DNER ME 135/2010. Os testes foram realizados em prensa universal triaxial, do mesmo modo que para o ensaio de vida de fadiga (Figura 33) por meio de carregamento cíclico indireto, com temperatura constante de 25°C, aplicando-se carga à frequência de 1Hz e obtendo as leituras dos deslocamentos através de um LVDT (Linear Variable Differential Transducers). Para determinação do MR de cada mistura foram moldados 12 corpos de prova de 10cm de diâmetro, compactados com o CGS, sendo a média destes o resultado do ensaio para cada amostra.

#### 3.2.5 ETAPA 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de desempenho e de caracterização mecânica das misturas estudadas, foi aplicado o tratamento estatístico dos dados, através da análise de variância, que permite, no caso de experimentos onde se tenha repetibilidade, verificar se há diferença estatística entre as amostras. Para tal, foi aplicado o teste de Tukey, com 95% de confiança, no intuito de verificar a existência de diferenças estatísticas entre os valores obtidos nos ensaios para as diferentes composições de agregados das misturas estudadas. A análise foi realizada através do Software ASSISTAT Versão 7.7 (2017) desenvolvido pelo Professor Francisco Silva da Universidade Federal de Campina Grande.

Além disso, a partir dos resultados dos ensaios da presente pesquisa, foi possível avaliar de forma mais realista as misturas estudadas. Sendo assim, foi modelada uma estrutura de pavimento flexível hipotética, tendo como variável apenas o módulo de resiliência (MR) do revestimento asfáltico, utilizando os resultados de MR de cada uma das misturas. A análise mecanicista foi feita através do software Elsym5,

onde foi possível determinar as deformações de tração ( $\epsilon_t$ ) na fibra inferior do revestimento para cada uma das misturas estudadas. A partir desse resultado, foi possível aplicar este parâmetro no modelo de vida de fadiga obtido no ensaio de fadiga por compressão diametral de cada uma das misturas, que é baseado no modelo do tipo log-log, que expressa o número  $N$  de solicitações necessárias para o fim do ensaio, com a deformação de tração inicial ( $\epsilon_i$ ), conforme Equação 11.

$$N = k_2 \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{n_2} \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

$N$  = número de repetições de carga necessárias ao atendimento do critério de ruptura;

$\epsilon_i$  = deformação inicial do corpo de prova;

$k_i$  e  $n_i$  = parâmetros experimentais.

A estrutura do pavimento flexível analisada, bem como as espessuras e as características aplicadas estão apresentadas na Figura 37. Para composição do carregamento da estrutura foi simulada a carga do eixosimples de roda dupla de 8,2 toneladas considerando-se duas cargas de roda de 2050 kgf, com pressão de contato pneu/pavimento de 5,65 kgf/cm<sup>2</sup>, separadas por uma distância de 31 centímetros, na Figura 38 estão ilustradas a composição de carregamento bem como os pontos de análise da estrutura. Os dois pontos de análise considerados situam-se na fibra inferior da camada de revestimento, um sob a roda e outro na metade da distância entre rodas, sendo utilizado o maior valor entre as duas medidas.

REV. ASFÁLTICO	Camada	MR (MPa)	Espessura (cm)
BRITA GRADUADA SIMPLES	Revestimento	Variável	8
MACADAME SECO	Base	350	15
	Sub-base	250	20
	Subleito	100	-

Figura 37 – Características da estrutura de pavimento utilizada para o dimensionamento.

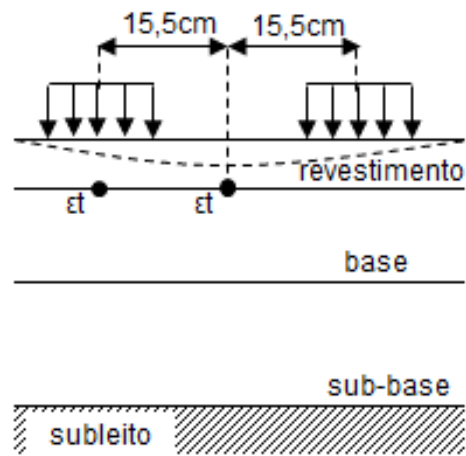


Figura 38 – Características do carregamento aplicado no dimensionamento e pontos de análise.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo do trabalho serão apresentados e discutidos os resultados das etapas de trabalho descritas no Capítulo 3.

### 4.1 ETAPA 1 – PREPARAÇÃO DO RAP

A Tabela 11 apresenta os resultados do teor de ligante asfáltico presente nas amostras de RAP, obtidos a partir do ensaio utilizando o extrator Soxhlet.

Tabela 11 - Resultados extração Soxhlet – teor de ligante asfáltico.

Fração	Amostra	Identificação do filtro	Massa filtro (g)	Massa filtro + amostra (g)	Massa filtro + agreg. após extração (g)	% betume $\frac{(B-A)-(C-A)}{(B-A)}$	% betume MÉDIA
			(A)	(B)	(C)		
MIÚDO	1	2b	63,94	945,62	892,19	6,06%	6,06%
	2	2a	62,01	973,54	918,29	6,06%	
GRAÚDO	1	3a	70,21	1173,28	1124,09	4,46%	4,44%
	2	3b	69,22	1368,16	1310,85	4,41%	
TOTAL	1	1a	65,67	1559,65	1485,19	4,98%	5,00%
	2	1b	62,77	1527,76	1454,38	5,01%	

Fonte: A autora, 2017.

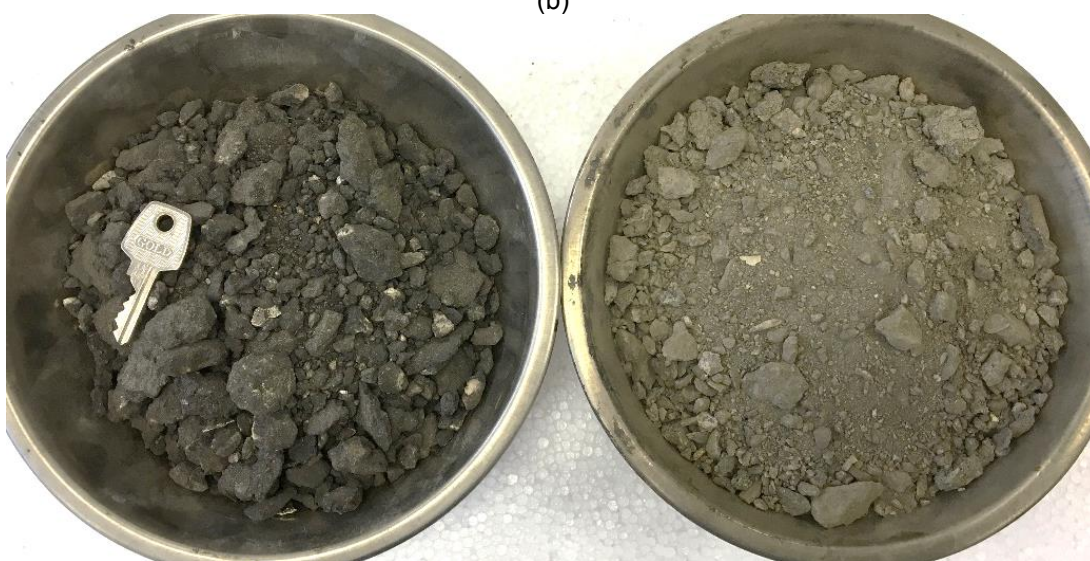
É possível observar que as duas amostras de cada uma das frações apresentaram teores de ligante muito próximos, o que demonstra adequada preparação da amostra e execução do ensaio. Como esperado, a fração miúda é a mais rica em ligante asfáltico (6,06%), seguida da fração total (5,00%) e por último, a fração graúda com menor teor de ligante (4,44%). Esse fato, explicado pela maior superfície específica dos finos, é interessante do ponto de vista prático, no sentido de viabilizar a separação do RAP em pilhas com frações granulares distintas (graúda e miúda, por exemplo), a fim de minimizar a variabilidade do teor de ligante, obter maior controle na dosagem de misturas e, ainda, possibilitar a otimização da utilização do RAP em aplicações diversas. A Figura 39 apresenta os agregados antes e após a extração, na fração graúda (a), fração miúda (b) e fração total (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 39 – RAP antes e após extração - (a) fração graúda; (b) fração miúda; (c) fração total.

Diante da Figura 39, os “falsos grãos”, como são retratados na literatura, são claramente entendidos, onde os aglomerados graúdos formados por ligante e agregado são desfragmentados após a extração, gerando uma quantidade de finos elevada.

## 4.2 ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.2.1 Agregado natural

Os resultados da caracterização dos agregados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados caracterização agregado natural.

Parâmetro	Agregado Natural		
	Brita	Pedrisco	Pó de pedra
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,400	2,590	2,510
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,570	2,660	2,550
Absorção de água (%)	2,74	1,03	1,14
Teor de finos (%)	0,18	0,45	10,01
Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )	1,321	1,296	1,807
Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,487	1,454	2,070
Índice de forma	2,5	2,7	-
Abrasão Los Angeles (%)	26,8	26,6	-

Diante dos resultados, é importante ressaltar a maior absorção de água e massa específica menor da brita com relação ao pedrisco e ao pó de pedra natural, que pode influenciar o teor ótimo de ligante na mistura asfáltica. De acordo com norma DNIT 031:2006 – ES que estabelece as diretrizes para produção de concretos asfálticos usinados à quente, os agregados graúdos devem apresentar desgaste Los Angeles inferior ou igual a 50%, o que foi plenamente atendido no caso dos agregados naturais. Quanto ao índice de forma, a referida especificação faz menção à requisitos medidos através de outro ensaio, que não o método do paquímetro utilizado na presente pesquisa. A norma NBR 12948:1993 que fixa as condições exigidas para os materiais a serem utilizados na execução de camada de concreto asfáltico usinado a quente, estabelece que o agregado graúdo deve ter um índice de forma igual ou inferior a 2,0, item este não atendido pelos agregados naturais. O índice é função da geometria do agregado (comprimento e espessura da partícula), de tal modo que um

índice próximo a três define o material como lamelar e próximo a um define o material como cúbico.

A curva granulométrica de cada uma das frações do agregado natural está apresentada na Figura 40.

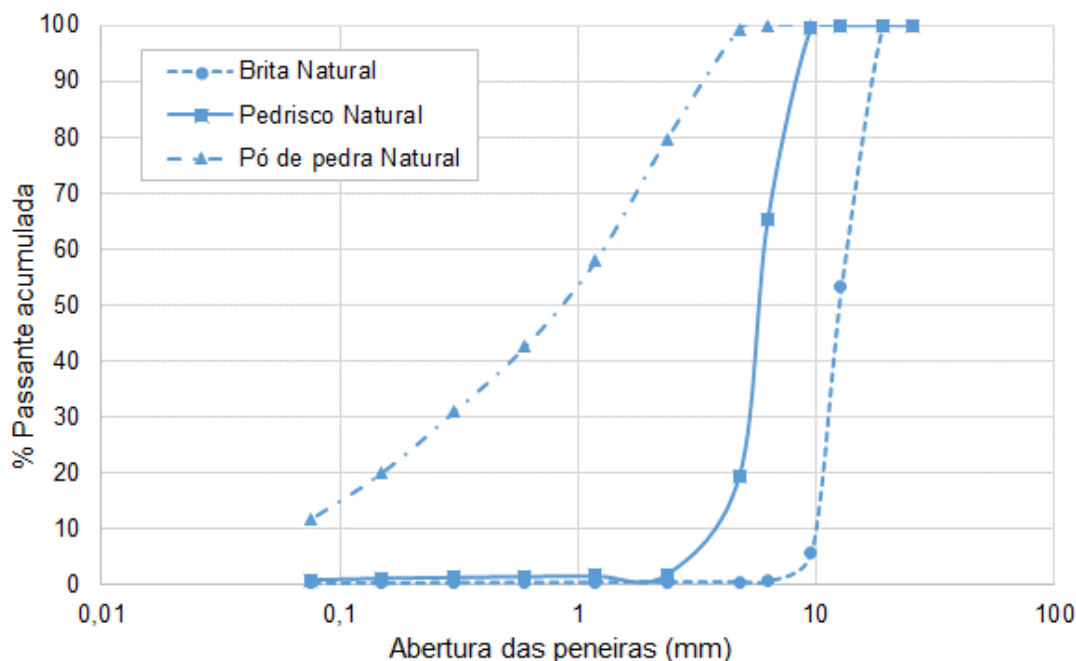


Figura 40 – Curva granulométrica agregado natural – brita, pedrisco e pó de pedra.

#### 4.2.2 Agregado de resíduo de concreto – ARC

Os resultados de caracterização dos ARC, nas três frações granulométricas coletadas (brita, pedrisco e pó de pedra) estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados caracterização ARC.

Parâmetro	ARC		
	Brita	Pedrisco	Pó de pedra
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,330	2,180	2,080
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,610	2,550	2,610
Absorção de água (%)	4,65	6,52	10,88
Teor de finos (%)	1,48	1,77	8,91
Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )	1,275	1,230	1,409
Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,459	1,369	1,625
Índice de forma	2,1	2,2	-
Abrasão Los Angeles (%)	32,7	34,6	-



Apesar da característica porosa e da baixa resistência da argamassa aderida no ARC, comumente retratada na literatura, as frações graúdas atenderam as exigências da norma DNIT 031:2006 quanto ao desgaste medido no ensaio de abrasão Los Angeles. Quanto ao índice de forma, as frações apresentaram índices maiores do 2,0, o que indica uma configuração mais lamelar, extrapolando os limites estabelecidos pela norma NBR 12948:1993 ( $IF \leq 2,0$ ). Ainda, é importante destacar os valores elevados de absorção de água, principalmente do agregado miúdo reciclado, fato esse retratado na grande maioria das pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica. De acordo com a literatura, essa absorção de água está diretamente ligada ao consumo de ligante na mistura asfáltica.

A curva granulométrica de cada uma das frações do ARC está apresentada na Figura 41.

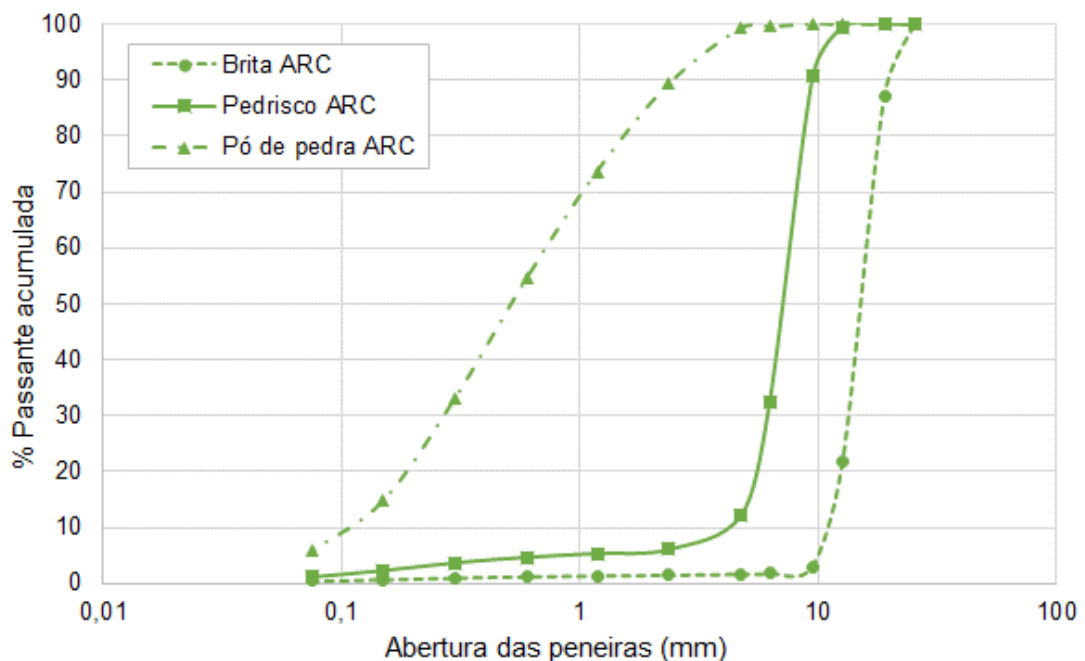


Figura 41– Curva granulométrica ARC – brita, pedrisco e pó de pedra.

#### 4.2.3 Revestimento asfáltico fresado – RAP

A Tabela 14 apresenta os resultados de caracterização do agregado miúdo (passante na #4) e graúdo (retido na #4), após a extração do ligante asfáltico. É possível perceber que os valores da massa específica aparente e real são similares aos valores encontrados para o agregado natural, assim como a absorção de água. A massa unitária solta e compactada do agregado miúdo também é bastante

semelhante aos valores correspondentes para o agregado natural, porém, a massa unitária solta e compactada do agregado graúdo do RAP é maior do que o do agregado natural, possivelmente pela maior quantidade de partículas finas.

Tabela 14 – Resultados de caracterização do RAP após extração – fração graúda e miúda.

Parâmetro	RAP após extração	
	graúdo retido #4	miúdo passante #4
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,486	2,536
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,627	2,627
Absorção de água (%)	2,15	1,45
Teor de finos (%)	4,80	2,34
Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )	1,503	1,815
Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,712	2,051
Parâmetro	Antes extração	Após extração
Índice de forma	2,80	2,30

O índice de forma foi determinado a partir da avaliação dos agregados antes da extração, que resultou em índice 2,8, e após a extração que resultou em índice 2,3. Pode-se dizer que os agregados antes da extração são classificados como lamelares e, após a extração, perdem parcialmente esta condição, na medida em que o ligante é mobilizado e os agregados são descobertos, conforme pode ser observado na Figura 42.

A Figura 43 apresenta a granulometria das frações graúda, miúda e total do RAP, antes e após a extração de ligante asfáltico. É possível observar que as curvas obtidas após a extração são mais ricas em finos, pelo fato dos “falsos grãos” compostos de agregados e ligante asfáltico que são separados após a lavagem com solvente, fazendo com que a curva se desloque para cima. Essa situação é claramente entendida com o exemplo da fração graúda que, antes da extração tem 100% dos grãos retidos na peneira #4 e, após a extração tem 59% do material passante na peneira #4. A Figura 44 apresenta esse exemplo da granulometria da fração graúda, onde o material após a extração foi segmentado para melhor visualização.



(a)



(b)

Figura 42 – RAP – Forma dos agregados do RAP antes e após extração.

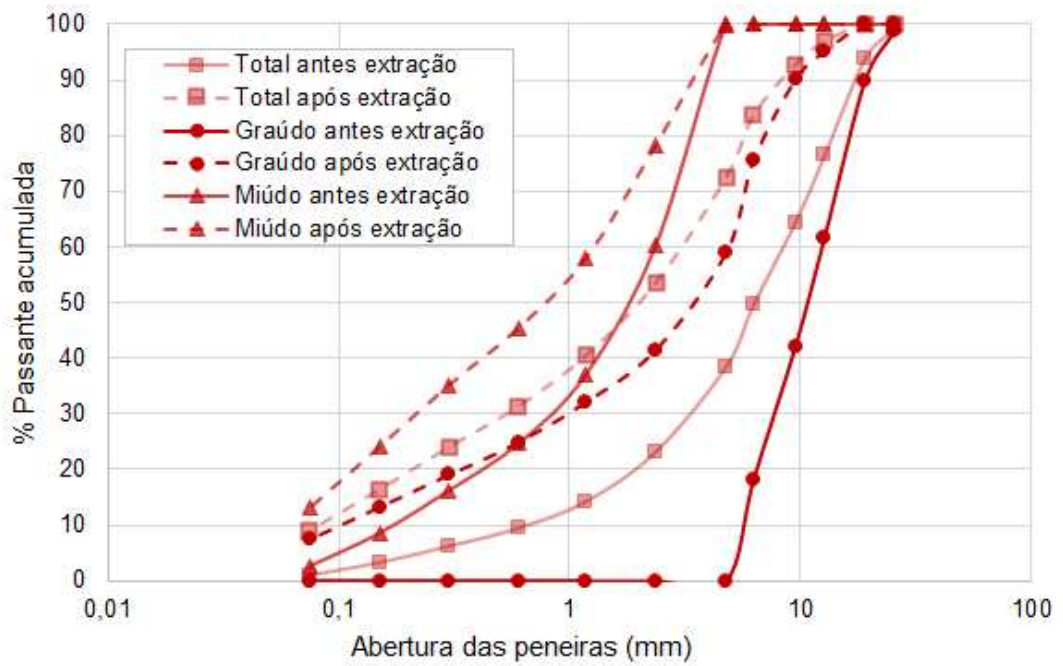


Figura 43 – Granulometria RAP – antes e após extração.

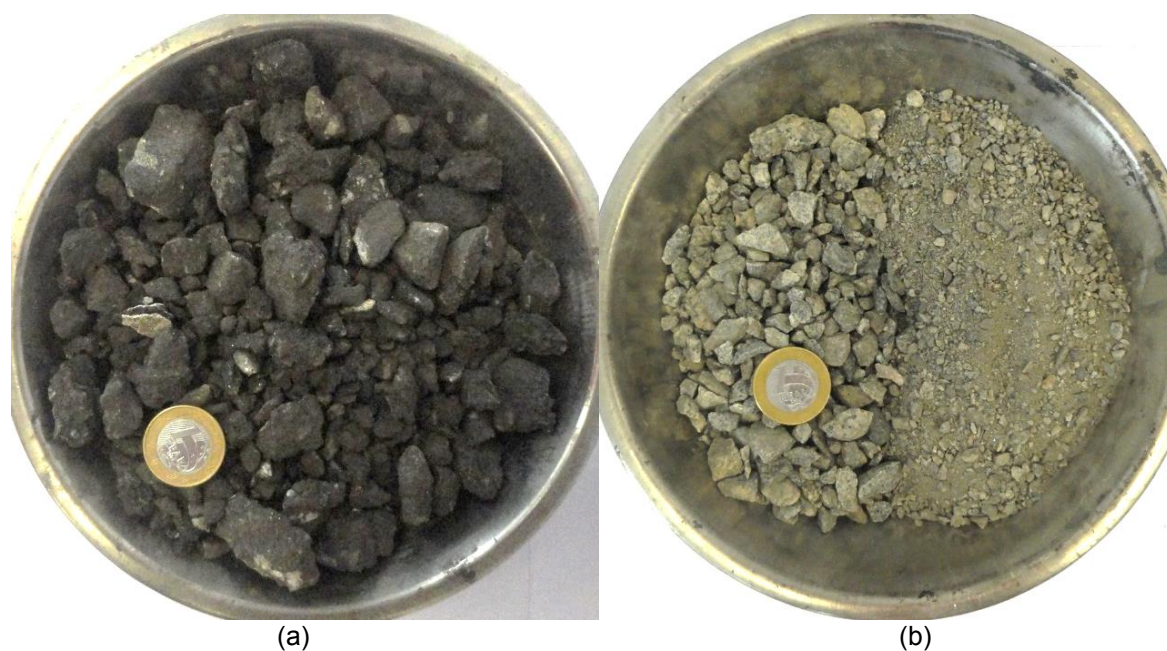


Figura 44 – RAP fração graúda (a) antes extração; (b) após extração – elevada quantidade de finos após extração.

#### 4.2.4 Ligante asfáltico

A Tabela 15 apresenta os resultados de caracterização dos ligantes asfálticos utilizados na pesquisa, tanto do ligante novo quanto do ligante recuperado do RAP puro e com AR.

Tabela 15 – Resultados caracterização ligante asfáltico – CAP 50/70 e recuperado do RAP.

Característica		Ligante novo	Ligante recuperado			
		CAP 50/70	0% AR	20% AR	30% AR	40% AR
Viscosidade Brookfield	135°C (cP)	333,3	*	903,3	830,0	486,7
	150°C (cP)	165	*	427,3	344,7	237,0
	177°C (cP)	61,8	*	144,2	119,3	85,8
Penetração (0,1mm)		56	3	26	30	53
Ponto de amolecimento (°C)		48,1	79,5	-	-	-
Densidade relativa		1,007	-	-	-	-
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		1,004	-	-	-	-

\*A viscosidade muito elevada inviabilizou a coleta de dados independente da temperatura ou velocidade de realização do ensaio.

A partir dos resultados de caracterização do ligante recuperado do RAP é possível verificar o alto grau de oxidação do mesmo, tendo em vista a impossibilidade de realização do ensaio de viscosidade Brookfield nas temperaturas padronizadas, não registrando leitura no aparelho. Com a adição do AR, como era previsto, o ligante asfáltico foi recuperando as propriedades do ligante convencional (o que pode ser

verificado a partir da observação dos resultados do ligante novo CAP 50/70) no que diz respeito à viscosidade e penetração.

A adição de 40% de AR (em peso) ao ligante envelhecido permitiu que o mesmo atingisse valores de viscosidade próximos aos do ligante convencional novo CAP 50-70. Se comparado com o teor de AR adicionado ao ligante envelhecido registrado por outras pesquisas como a de Nabizadeh et al. (2017), Arámbula-Mercado (2018) e Menapace (2018), que utilizaram em suas pesquisas até 12,5% de AR, o teor encontrado na dosagem da presente pesquisa é considerado elevado. Esse fato está relacionado ao nível de envelhecimento do RAP pesquisado ou à eficiência do produto rejuvenescedor, ou ainda, a soma desses dois fatores.

De qualquer forma é importante ressaltar que esse é o teor capaz de devolver ao ligante as características medidas através dos ensaios de penetração e, principalmente, de viscosidade, que vai proporcionar temperaturas de usinagem e compactação similares aquelas determinadas quando da utilização do ligante novo. Menores teores de AR não conseguiriam reduzir a viscosidade do ligante envelhecido de forma adequada, fazendo com que fossem necessárias temperaturas excessivamente altas de usinagem e de compactação, conforme pode ser observado na Figura 45.

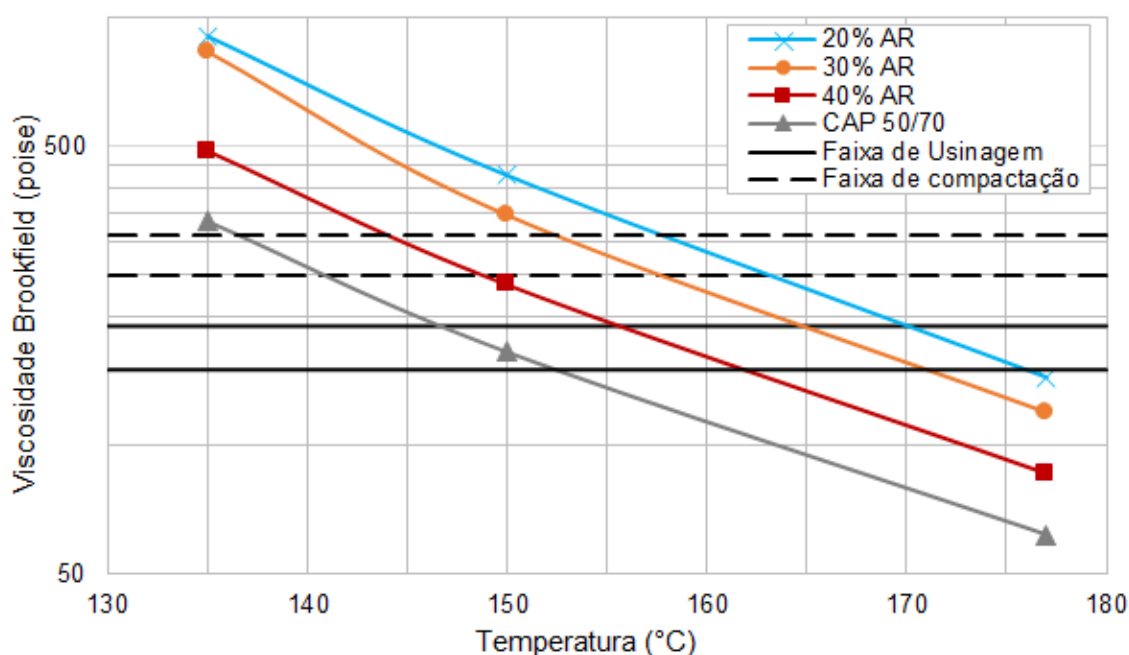


Figura 45 – Curva viscosidade (Brookfield) versus temperatura – CAP 50/70; CAP envelhecido com 20%, 30% e 40% de AR.

No caso de 20% de adição de AR, por exemplo, a temperatura de usinagem seria de aproximadamente 173°C e, mesmo utilizando um aditivo surfactante para redução da temperatura, a mistura ainda corresponderia a uma mistura a quente, e não morna. Sendo assim, o teor ótimo de AR foi definido em 40%, ainda que isso acarrete incremento do teor de ligante, em relação ao agregado, da mistura GM\_RAP.

### 4.3 ETAPA 3 - DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

#### 4.3.1 Seleção granulométrica

A Tabela 16 apresenta os valores de proporção AG, conforme diretrizes do método Bailey de seleção granulométrica. Como premissa do estudo, a granulometria de cada mistura foi ajustada para que se enquadrasse no valor médio dos limites propostos pelo método em função do TMN da mistura. Esse princípio foi rigorosamente aplicado a todas as misturas, com exceção da mistura com 100% RAP que, pela característica muito fina do material após extração e, com a premissa de não adição de nenhum material virgem, a proporção AG não atingiu o valor médio dos limites do método mas ficou dentro dos limites propostos.

Tabela 16 - Proporção AG (Bailey) das misturas estudadas.

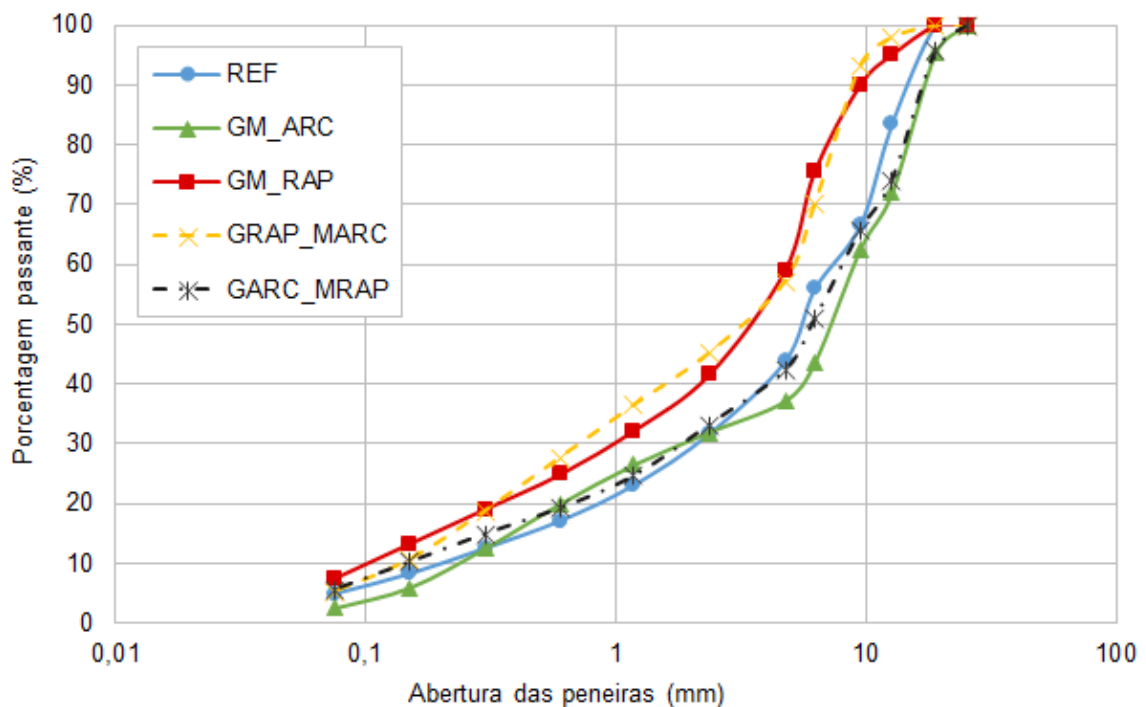
Misturas	TMN (mm)	Proporção AG	
		Calculado	Especificação
REF	19	0,68	0,60-0,75
GM_ARC	19	0,68	0,60-0,75
GARC_MRAP	19	0,68	0,60-0,75
GRAP_MARC	9,5	0,48	0,40-0,55
GM_RAP	9,5	0,43	0,40-0,55

A Figura 46 apresenta as curvas granulométricas das cinco misturas, bem como os dados apresentados na Tabela 17. É possível perceber a proximidade de todas as curvas, selecionadas a partir do parâmetro AG do método Bailey, exceto as curvas granulométricas das misturas GM\_RAP e GRAP\_MARC que se distanciam das demais em razão da já mencionada característica fina do material fresado. É importante ressaltar que, alinhado com o objetivo da presente pesquisa de avaliar a incorporação dos resíduos em frações controladas, não foi feito nenhum ajuste

granulométrico com agregados virgens, o que poderia descaracterizar e incorporar variáveis nos resultados.

Tabela 17 - Composição granulométrica das misturas estudadas.

Peneira (nº)	Abertura (mm)	REF	GM_ARC	GM_RAP	GRAP_MARC	GARC_MRAP
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19	100,0	95,4	100,0	100,0	95,7
1/2"	12,7	83,5	71,9	95,1	97,9	74,0
3/8"	9,5	66,6	62,5	90,1	93,2	65,6
1/4"	6,25	55,9	43,6	75,7	70,0	50,8
4	4,75	43,8	37,1	59,0	57,1	42,3
8	2,36	31,7	31,9	41,5	45,1	33,1
16	1,18	23,1	26,4	32,2	36,4	24,6
30	0,6	17,1	19,9	24,9	27,6	19,2
50	0,3	12,5	12,4	19,1	18,7	14,9
100	0,15	8,3	5,9	13,3	10,6	10,2
200	0,075	4,9	2,4	7,5	5,2	5,5



A composição das misturas ficou limitada à quantidade de material graúdo proveniente do RAP. Conforme já mencionado no item 4.2.3 e demonstrado na Figura 44, mesmo com 100% de RAP graúdo antes da extração foi possível obter um teor máximo de 41% de material graúdo após a extração. Sendo assim, as misturas com incorporação de RAP graúdo (GM\_RAP e GRAP\_MARC) ficaram condicionados a

esse teor, sempre com a premissa de atingir o valor médio da proporção AG especificada pelo método Bailey. A Tabela 18 apresenta os resultados de proporção em massa de agregados utilizados nas misturas.

Tabela 18 - Proporções em massa de agregados para dosagem das misturas.

COMPOSIÇÃO (%)		REF	GM_ARC	GARC_MRAP	GRAP_MARC	GM_RAP
Natural	Graúdo	53,5				
	Miúdo	41,7				
ARC	Graúdo		56,8	54,6		
	Miúdo		33,6		53,1	
RAP	Graúdo				39,9	38,4
	Miúdo			39,9		55,4

Ainda, considerando esta condição do RAP, seria interessante a determinação da granulometria após a moldagem das amostras, a fim de verificar se a granulometria é semelhante aquela determinada na dosagem, haja visto que a composição granulométrica está diretamente relacionada ao desempenho das misturas. Ainda, se há quebra de agregados durante o processo de compactação, além da evidente alteração da granulometria, existirão faces de agregados que não estarão recobertas por ligante.

#### 4.3.2 Mistura REF

A partir dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados na dosagem das misturas (Tabela 19), foram plotadas cinco curvas em função do teor de asfalto, para determinação do teor ótimo, conforme apresentado na Figura 47. As linhas tracejadas em vermelho nos gráficos de Vv e RBV indicam o teor ótimo de ligante, de 4,8%, escolhido a partir do critério de 4% de Vv condicionado ao atendimento aos requisitos do RBV, definidos pela norma DNIT 031:2006-ES.

Tabela 19 - Parâmetros volumétricos mistura REF.

Parâmetros	Teor de ligante (%)				
	4	4,5	5	5,5	6
Massa específica máxima, Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	2,511	2,500	2,479	2,473	2,443
Volume de vazios, Vv (%)	6,0	4,7	3,5	2,4	1,5
Massa específica aparente, Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	2,359	2,382	2,393	2,414	2,407
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	15,4	15,4	15,4	15,6	15,8
Relação betume/vazios, RBV (%)	60,9	69,3	77,5	84,8	90,8



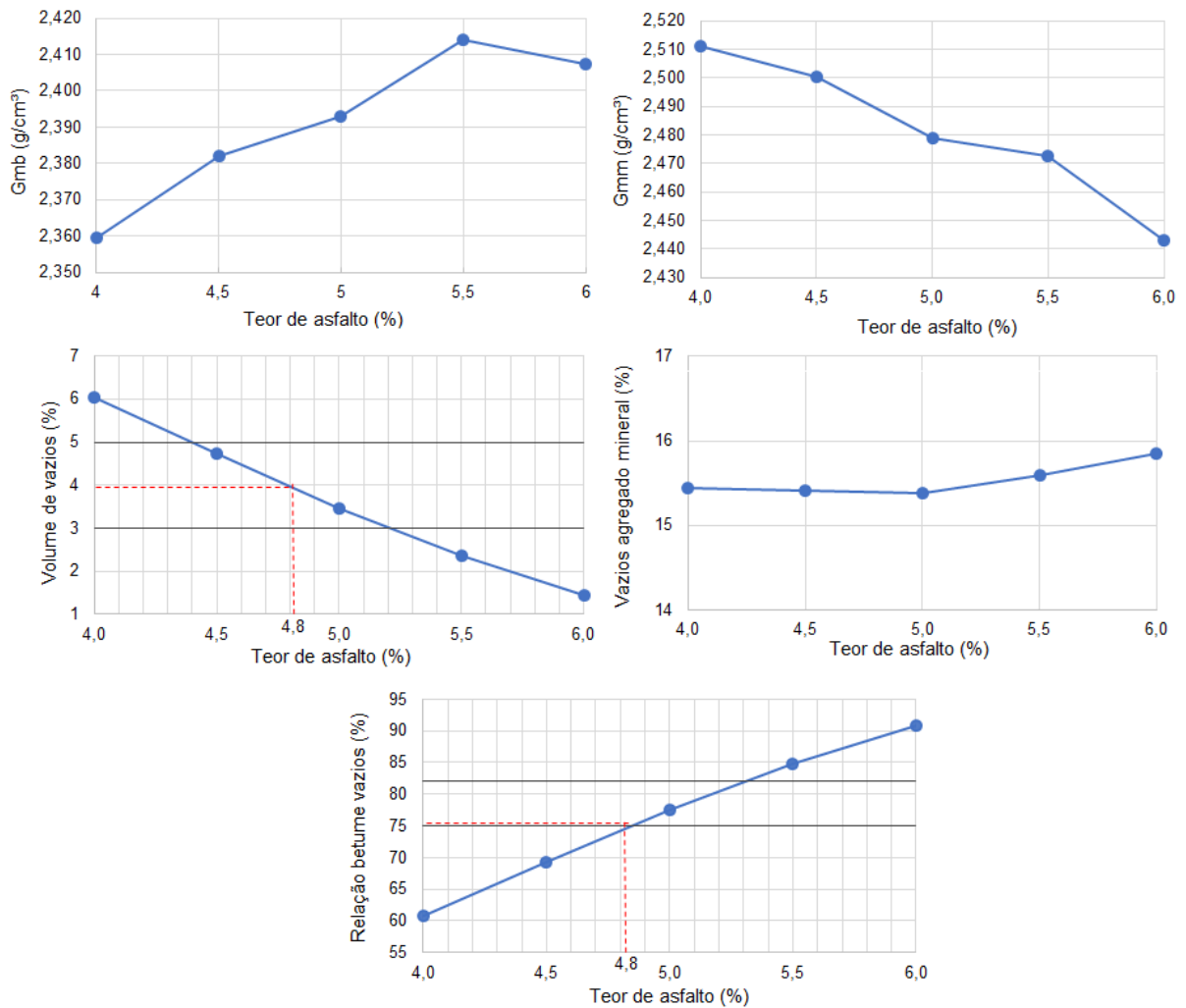


Figura 47 - Curvas dos parâmetros determinados na dosagem – mistura REF.

#### 4.3.3 GM\_ARC

A partir dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados na dosagem das misturas (Tabela 20), foram plotadas cinco curvas em função do teor de asfalto, para determinação do teor ótimo, conforme apresentado na Figura 48. As linhas tracejadas em vermelho nos gráficos de Vv e RBV indicam o teor ótimo de ligante, de 9,6%, escolhido a partir do critério de 4% de Vv condicionado ao atendimento aos requisitos do RBV, definidos pela norma DNIT 031:2006-ES.

Tabela 20 – Parâmetros volumétricos mistura GM\_ARC.

Parâmetros	Teor de ligante (%)				
	8	8,5	9	9,5	10
Massa específica máxima, Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	2,303	2,281	2,268	2,244	2,226
Volume de vazios, Vv (%)	7,4	6,2	5,2	4,9	3,2
Massa específica aparente, Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	2,131	2,141	2,151	2,135	2,140
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	24,4	25,5	24,5	25,1	24,6
Relação betume/vazios, RBV (%)	69,5	75,8	78,9	80,6	86,8

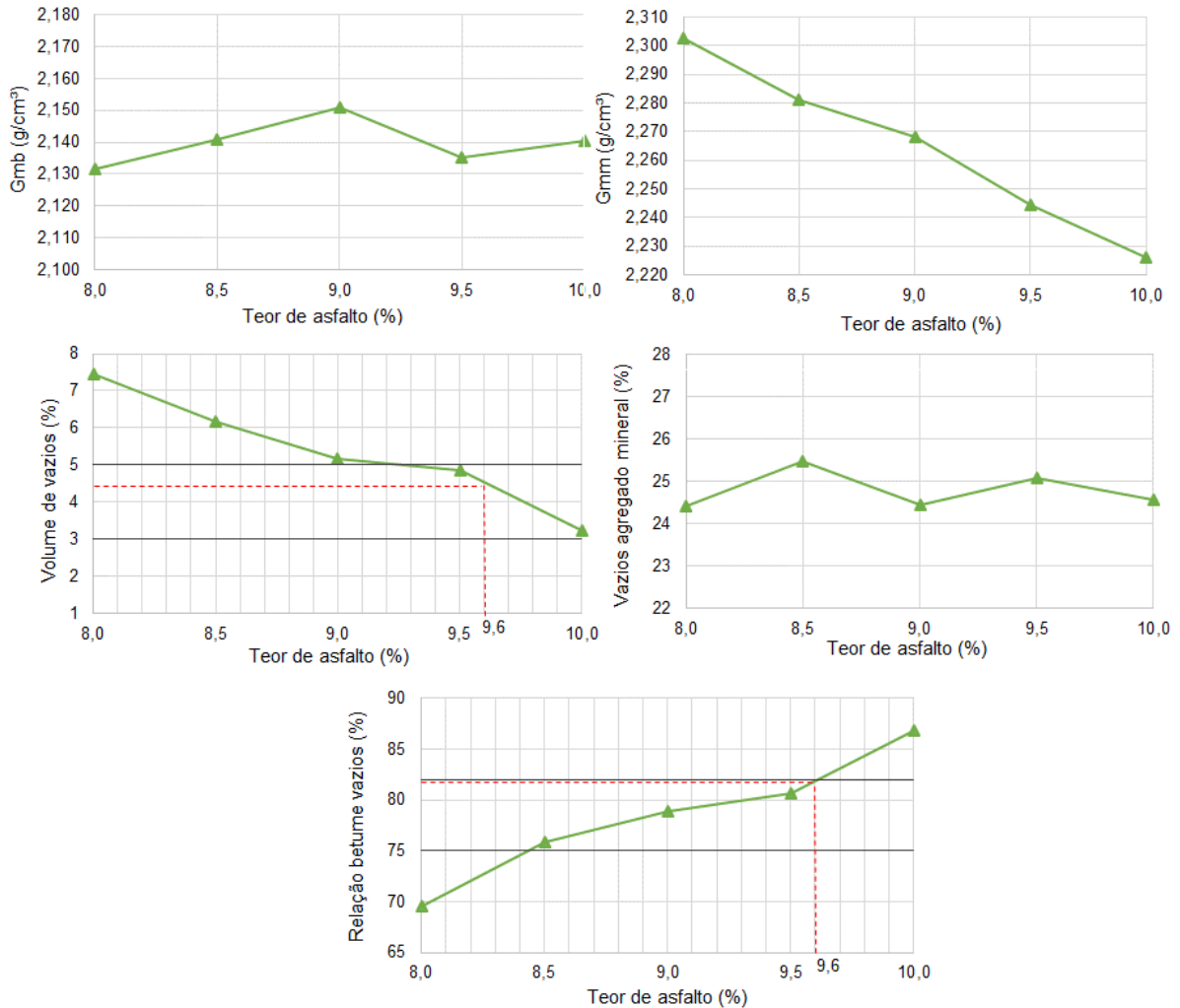


Figura 48 – Curvas dos parâmetros determinados na dosagem – mistura GM\_ARC.

#### 4.3.4 GRAP\_MARC

A partir dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados na dosagem das misturas (Tabela 21) foram plotadas cinco curvas em função do teor de asfalto, para determinação do teor ótimo, conforme apresentado na Figura 49. As linhas tracejadas em vermelho nos gráficos de Vv e RBV indicam o teor ótimo de ligante, de

7,0%, escolhido a partir do critério de 4% de Vv condicionado ao atendimento aos requisitos do RBV, definidos pela norma DNIT 031:2006-ES.

Tabela 21 - Parâmetros volumétricos mistura GRAP\_MARC.

Parâmetros	Teor de ligante (%)				
	7	7,5	8	8,5	9
Massa específica máxima, Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	2,343	2,326	2,284	2,252	2,230
Volume de vazios, Vv (%)	4,1	3,3	3,3	3,1	2,4
Massa específica aparente, Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	2,247	2,248	2,216	2,191	2,177
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	19,8	20,1	20,9	21,6	22,0
Relação betume/vazios, RBV (%)	79,3	83,4	84,4	85,9	88,9

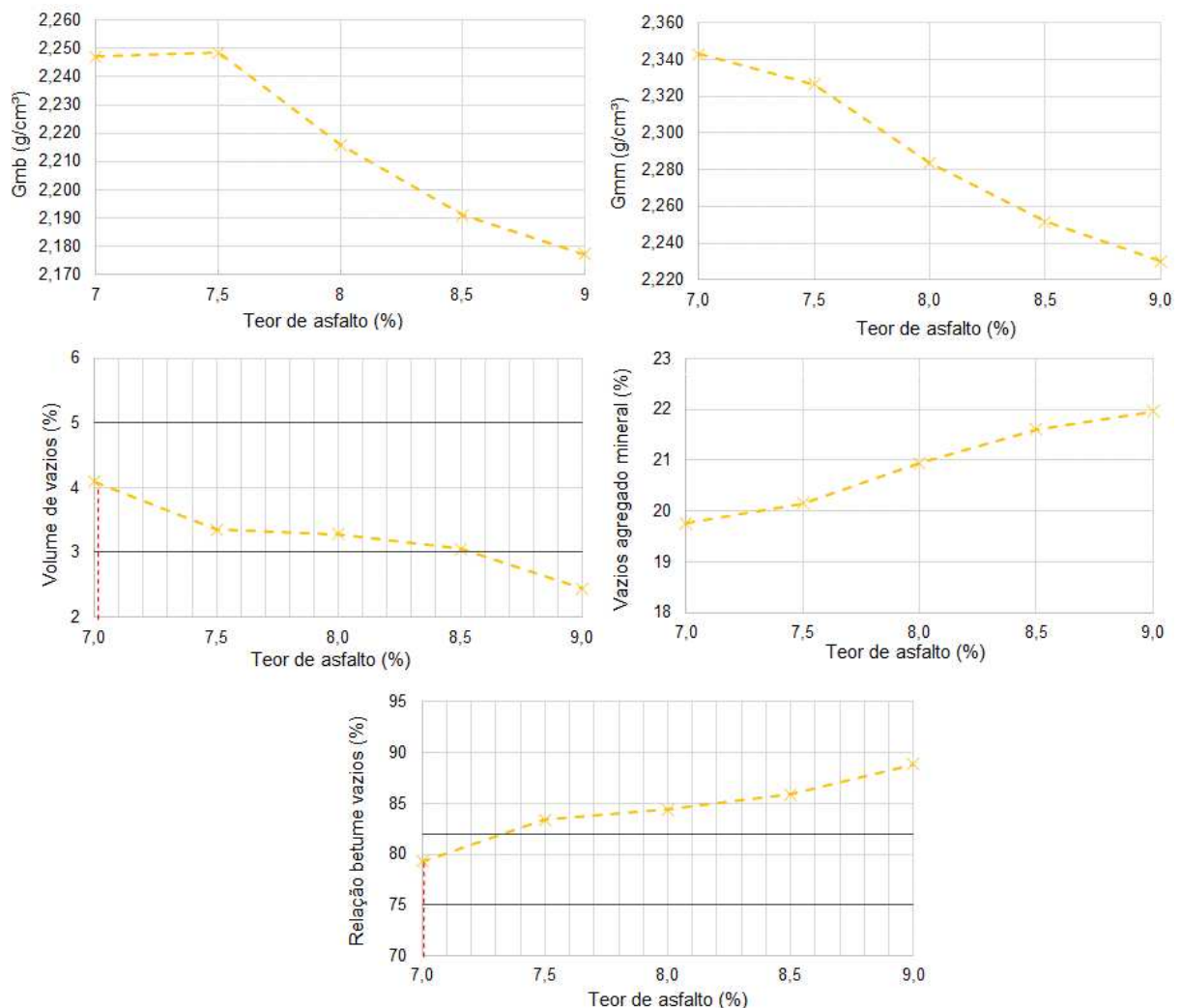


Figura 49 - Curvas dos parâmetros determinados na dosagem – mistura GRAP\_MARC.

#### 4.3.5 GARC\_MRAP

A partir dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados na dosagem das misturas (Tabela 22), foram plotadas cinco curvas em função do teor de asfalto,

para determinação do teor ótimo, conforme apresentado na Figura 50. As linhas tracejadas em vermelho nos gráficos de Vv e RBV indicam o teor ótimo de ligante, de 5,5%, escolhido a partir do critério de 4% de Vv condicionado ao atendimento aos requisitos do RBV, definidos pela norma DNIT 031:2006-ES.

Tabela 22 - Parâmetros volumétricos mistura GARC\_MRAP.

Parâmetros	Teor de ligante (%)				
	4,5	5	5,5	6	6,5
Massa específica máxima, Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	2,409	2,350	2,335	2,327	2,324
Volume de vazios, Vv (%)	6,3	4,5	3,7	2,9	2,8
Massa específica aparente, Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	2,257	2,244	2,253	2,258	2,254
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	16,4	15,7	16,0	16,4	17,4
Relação betume/vazios, RBV (%)	61,6	71,2	77,1	82,1	84,0

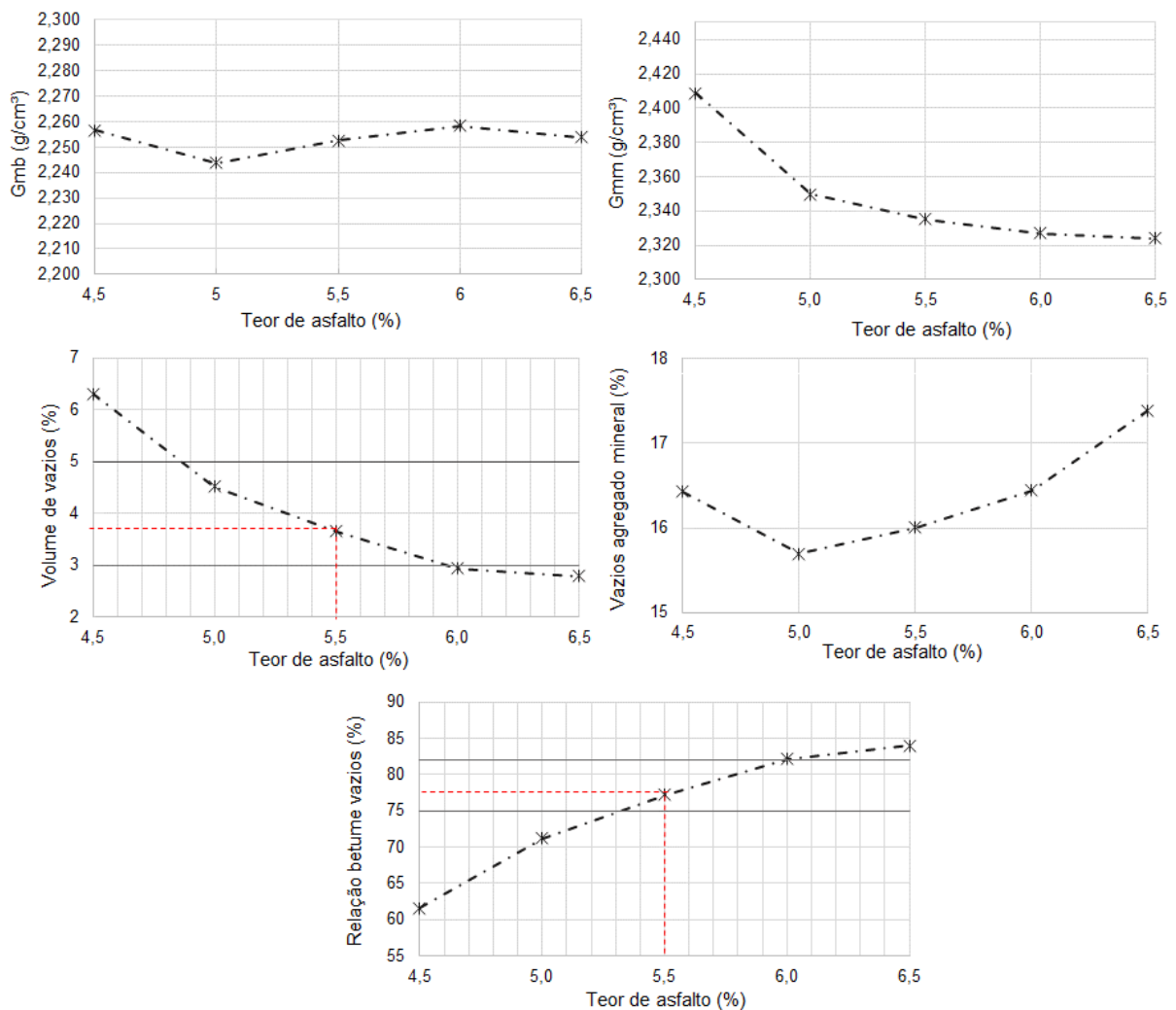


Figura 50 - Curvas dos parâmetros determinados na dosagem – mistura GRAP\_MARC.

#### 4.3.6 GM\_RAP

A dosagem da mistura GM\_RAP não seguiu o protocolo de volumetria conforme demonstrado nos itens anteriores para as demais misturas. Ainda há pouca experiência prática e mesmo acadêmica com relação a misturas com altos teores de RAP e, mais ainda, com misturas com 100% deste resíduo. Neste contexto, uma das lacunas de conhecimento diz respeito ao processo de rejuvenescimento do ligante recuperado do RAP. Muitos estudos avaliam o efeito rejuvenescedor em termos da melhoria das propriedades reológicas do ligante rejuvenescido, entretanto, o mecanismo de rejuvenescimento fundamental nas misturas propriamente ditas ainda não é totalmente claro. Diante do exposto, após a seleção granulométrica da mistura GM\_RAP a dosagem foi estabelecida seguindo o método mais usual retratado na literatura, ou seja, em função do teor de AR necessário para recuperar as propriedades físicas, de penetração e viscosidade, do ligante envelhecido.

Ocorre que, conforme já mencionado, o ligante recuperado do RAP apresentou medidas de penetração e viscosidade muito baixas e, pelo método de dosagem, o teor de AR estabelecido para recuperar as propriedades do ligante foi de 40%. Essas características do ligante asfáltico recuperado do RAP estão ligadas ao grau de envelhecimento do mesmo, porém, esses valores tão expressivos levantam a hipótese de contaminação do material. Conforme Figura 11, o RAP estava disposto em um local totalmente vulnerável às intempéries, na região central de uma pedreira e usina de asfalto, onde circulam caminhões com muita frequência. Sendo assim, há a possibilidade de que o material possa ter sido contaminado e que isso possa ter contribuído para o desempenho ruim do ligante recuperado do RAP.

O teor de ligante do RAP graúdo, que compõe a granulometria da mistura, é de 4,4%, sendo assim, adicionando mais 40% de AR (em peso do ligante), a mistura final foi produzida com 6,2% de ligante. Pelo excesso de ligante, a mistura apresentou, após densificação no CGS, volume de vazios abaixo dos limites estabelecidos, de 3 a 5%. Em caráter experimental, foram produzidos corpos de prova de misturas 100% RAP, com a mesma granulometria, porém, com 10 e 20% de AR, mesmo sabendo que estaria em desacordo com os registros da literatura já que, em tese, o ligante asfáltico recuperado não teria suas características restabelecidas com esse teor de AR. A Tabela 23 apresenta os parâmetros volumétricos das misturas com 10, 20 e 40% de AR. Conforme Figura 51 e Figura 52, que apresentam os gráficos de Vv e

RBV em função do teor de AR, respectivamente, caso esse tipo de mistura fosse dosada seguindo apenas a volumetria das misturas, o teor de AR seria de 27,5%.

Tabela 23 – Parâmetros volumétricos mistura GM\_RAP x teor de AR

Parâmetros	Teor de AR		
	10%	20%	40%
Massa específica máxima, Gmm (g/cm³)	2,485	2,476	2,452
Volume de vazios, Vv (%)	6,0	5,0	2,4
Massa específica aparente, Gmb (g/cm³)	2,328	2,348	2,393
Vazios do agregado mineral, VAM (%)	17,3	17,4	17,2
Relação betume/vazios, RBV (%)	65,3	71,5	86,0

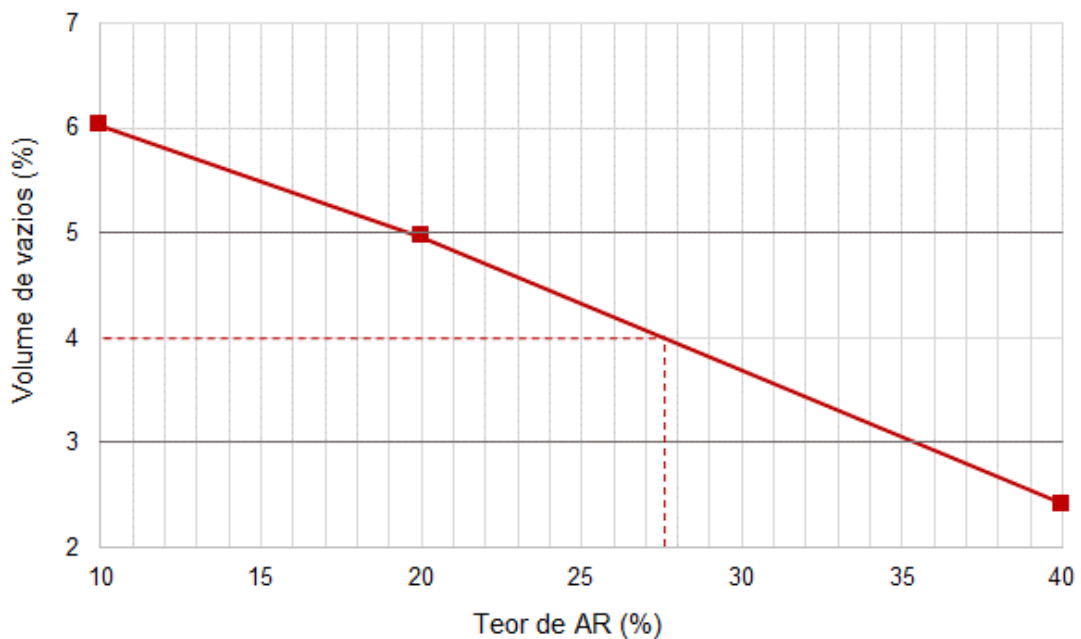


Figura 51 – Volume de vazios da mistura GM\_RAP com diversos teores de AR.

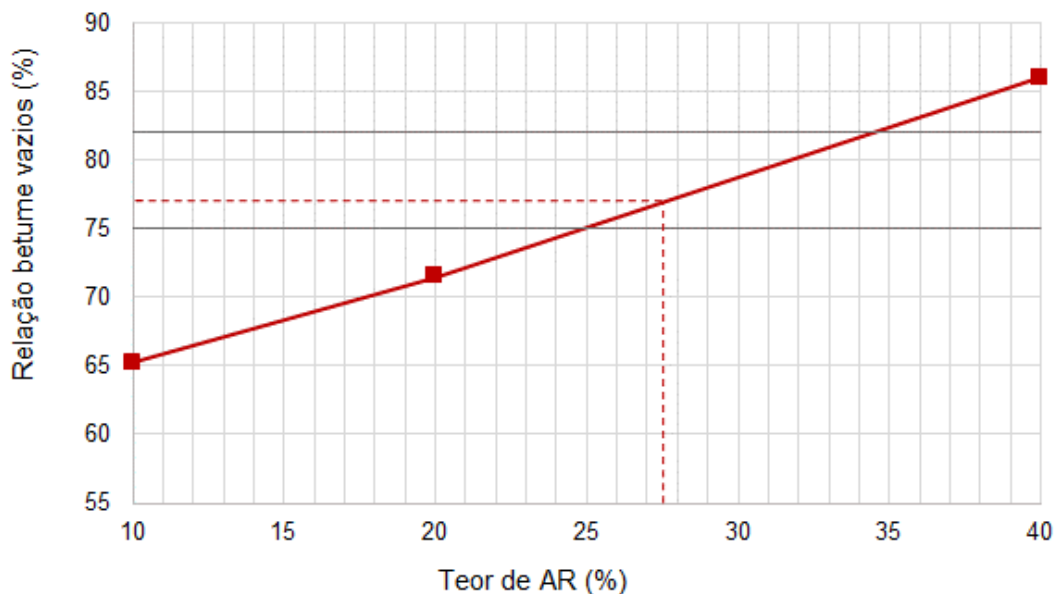


Figura 52 – Relação betume/vazios da mistura GM\_RAP com diversos teores de AR.

Embora o teor de adição de AR de 27,5% pareça adequado do ponto de vista de volume de vazios, é preciso levar em conta a aplicação deste tipo de mistura com relação às temperaturas de usinagem e compactação. Conforme já mencionado no item 4.2.4, com esse teor de AR a mistura GM\_RAP teria que ser usinada e compactada em temperatura extremamente alta, podendo causar, por exemplo, ainda mais envelhecimento no ligante contido no RAP.

Em função da disponibilidade de AR para a presente pesquisa, não foi possível produzir misturas para avaliação de desempenho com as duas formas de dosagem de AR, com 40% (necessária para recuperar a penetração e viscosidade similar ao do ligante novo) e 27,5% (necessário para atingir os requisitos de volumetria de uma mistura para camada de rolamento). Sendo assim, diante do exposto, para a mistura GM\_RAP foi adotado teor de AR de 40% o que, somado ao teor de ligante já contido no RAP acarretou em um teor de ligante de 6,2% para a mistura. Para cumprimento dos requisitos volumétricos a mistura GM\_RAP foi compactada com um número reduzido de giros no CGS, a fim de atingir o volume de vazios de 4%, igualmente as demais misturas. Seria interessante manter o teor de ligante da mistura GM\_RAP próximo ao teor de ligante da mistura REF, de 4,8%, porém, diante da quantidade de AR necessário isso só seria possível com a incorporação de agregados virgens, o que descaracterizaria o objetivo da pesquisa de avaliar uma mistura com 100% de RAP.

#### 4.3.7 Resumo – composição das misturas

Na Tabela 24 estão compilados os dados de composição das misturas, com relação aos seus materiais constituintes e o volume de vazios das misturas estudadas.

Tabela 24 – Composição e Vv das misturas estudadas.

COMPOSIÇÃO (%)		REF	GM_ARC	GARC_MRAP	GRAP_MARC	GM_RAP	
Agreg.	Nat.	Graúdo	53,5				
		Miúdo	41,7				
	ARC	Graúdo		56,8	54,6		
		Miúdo		33,6		53,1	
	RAP	Graúdo				39,9	38,4
		Miúdo			39,9		55,4
Ligante Asphalt.	CAP 50/70		4,8	9,6	3,1	5,3	
	CAP remob. RAP				2,4	1,7	4,4
	AR						1,8
	<b>Ligante total</b>		<b>4,8</b>	<b>9,6</b>	<b>5,5</b>	<b>7,0</b>	<b>6,2</b>
<b>Volume de vazios</b>		<b>3,7</b>	<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>3,8</b>	

Para apresentação dos dados a definição dos agregados graúdos e miúdos foi baseada na peneira #4 (4,75mm), sendo o que ficou retido na mesma considerado como graúdo e o material passante, classificado como miúdo.

#### 4.4 ETAPA 4 – DESEMPENHO E PROPRIEDADES MECÂNICAS

##### 4.4.1 Dano por umidade induzida

A Tabela 25 apresenta os resultados médios obtidos a partir dos corpos de prova ensaiados quanto ao dano por umidade induzida das cinco amostras estudadas.

Tabela 25 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida.

Parâmetros	REF	GM_ARC	GARC_MRAP	GRAP_MARC	GM_RAP
RT grupo <b>não</b> condicionado (MPa)	0,758	0,455	1,596	0,983	0,837
Vv grupo <b>não</b> condicionado (%)	7,6	6,3	6,7	7,6	6,6
RT grupo condicionado (MPa)	0,583	0,352	1,411	0,870	0,689
Vv grupo condicionado (%)	7,5	6,3	7,1	7,6	6,4
<b>Razão de RT (RRT)</b>	<b>0,77</b>	<b>0,77</b>	<b>0,88</b>	<b>0,89</b>	<b>0,82</b>

Os resultados de cada um dos corpos de prova do grupo condicionado e não condicionado estão apresentados no Apêndice B. Foi realizada análise estatística aplicada através do teste de Tukey entre todos os resultados de RT do grupo com condicionamento e sem condicionamento, indicando igualdade estatística entre os todas as misturas. Sendo assim, a incorporação dos resíduos nas frações graúda, miúda ou em substituição total à mistura, não representa influência no que diz respeito ao dano por umidade induzida em comparação à mistura de referência. O coeficiente de variação apresentado pelos dados analisados foi de 6,69% indicando a baixa dispersão dos valores obtidos no ensaio de dano por umidade induzida das misturas estudadas.

De acordo com a norma DNIT 031:2006 – ES, a razão da resistência à tração por compressão diametral estática do grupo não condicionado e condicionado deve ser superior a 0,7. Todas as amostras atenderam aos requisitos de norma, inclusive a mistura com 100% de ARC (GM\_ARC), mesmo o agregado de resíduo de concreto sendo tipicamente citado na literatura como tendo características de elevada



sensibilidade à água. Esse desempenho pode estar relacionado ao teor de ligante elevado, pela absorção do mesmo através dos poros do agregado reciclado, que permite uma ancoragem mecânica entre ligante e agregados.

Ainda, é importante destacar que todas as misturas com RAP (GM\_RAP, GRAP\_MARC e GARC\_MRAP) apresentaram resultados que demonstram uma menor suscetibilidade ao dano por umidade induzida. Zaumanis et al. (2014), que analisaram as propriedades de misturas com altos teores de RAP corroboram este fato. De acordo com os autores, pelo fato de que os agregados do RAP já estão recobertos com asfalto, há menor chance de que a água penetre nas partículas e, portanto, as misturas com alto teor de RAP normalmente apresentam resistência ao dano por umidade induzida igual ou melhor do que as misturas de referência.

Na mistura REF (Figura 53) e na GM\_RAP (Figura 54) a falha se deu de forma prioritária na interface entre ligante e agregado. Na mistura GM\_RAP a quantidade aparente de agregados quebrados é pequena se comparada à mistura REF que, inclusive, apresenta alguns pequenos descolamentos de partículas. Esse último fato pode estar relacionado com o tempo em que o agregado está aderido ao ligante, que é mais recente na mistura REF do que na mistura GM\_RAP, já que a adesão física entre ligante e agregado no RAP ocorreu há muito mais tempo.



Figura 53 – CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura REF.



Figura 54 - CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura GM\_RAP.

Nas misturas com incorporação de ARC (GM\_ARC, GARC\_MRAP e GRAP\_MARC) a fratura se deu particularmente neste tipo de agregado. Neste sentido, a mistura GM\_ARC deveria apresentar maior quantidade aparente de agregados quebrados, porém, conforme Figura 55 é possível perceber que a quantidade de ARC fraturado não é tão significativa. Possivelmente, o alto teor de ligante, que proporciona uma ancoragem mecânica com os agregados, compensou essa fragilidade do agregado e contribuiu para o desempenho satisfatório da mistura.

Nas outras duas misturas onde o ARC foi incorporado, a falha se deu essencialmente na fração em que ele foi incorporado, ou seja, na mistura GARC\_MRAP é possível perceber a quebra dos agregados grãos reciclados (Figura 56), e na mistura GRAP\_MARC nota-se fratura dos miúdos (Figura 57).



Figura 55 - CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura GM\_ARC.



Figura 56 - CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura GARC\_MRAP.



Figura 57 - CP rompido ensaio de resistência à tração (DUI) – mistura GRAP\_MARC.

#### 4.4.2 Deformação permanente

As placas foram compactadas de maneira que o volume de vazios fosse o mais próximo possível a 4% e, principalmente, que as duas placas da mesma mistura tivessem volume de vazios próximos. O volume de vazios obtido em cada placa está apresentado na Tabela 26. Na Tabela 27 estão apresentados os valores de afundamento de trilha de roda obtidos no ensaio de deformação permanente. A Figura 58 apresenta a evolução da deformação permanente, em porcentagem de afundamento de trilha de roda, entre 100 e 30.000 ciclos para cada mistura estudada, sendo a linha de cada mistura a média entre os dois corpos de prova ensaiados.

Tabela 26 – Volume de vazios das placas de deformação permanente.

Parâmetro	REF		GM_ARC		GARC_MRAP		GRAP_MARC		GM_RAP	
	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
Volume de vazios	5,3	4,8	3,9	4,5	4,9	4,8	5,1	5,5	5,7	5,7

Tabela 27 – Medidas de afundamento em trilha de roda das misturas estudadas.

Ciclos	Afundamento em trilha de roda (%)									
	REF		GM_ARC		GARC_MRAP		GRAP_MARC		GM_RAP	
	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
100	4,1	5,2	20,6	21,5	0,9	1,2	3,3	2,5	4,1	5,2
300	6,6	8,1	27,1	27,1	1,6	1,8	5,2	4,2	6,6	8,1
1000	10,9	12,6	-	-	2,6	3,0	8,8	6,3	10,9	12,6
3000	22,3	24,1	-	-	4,6	4,7	19,1	11,6	22,3	24,1
10000	25,8	28,5	-	-	8,9	8,4	30,7	15,2	25,8	28,5
30000	-	-	-	-	12,5	12,2	-	-	-	-

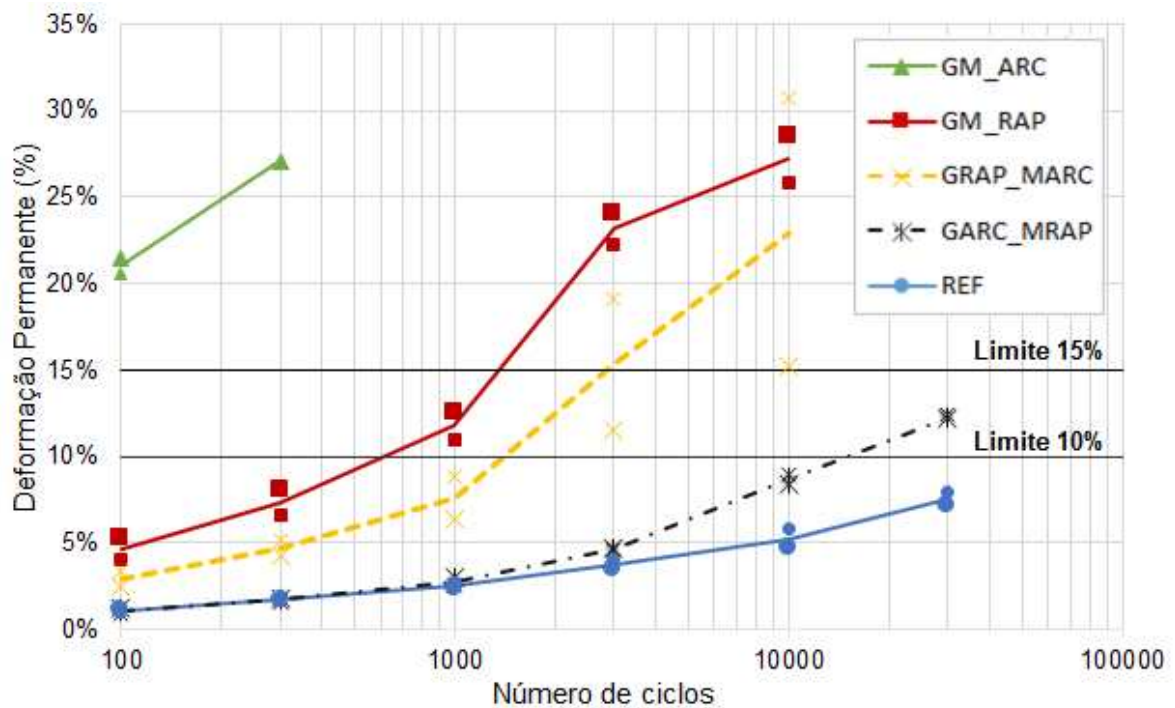


Figura 58 – Resultado dos ensaios de deformação permanente das misturas estudadas.

As diretrizes francesas estabelecem que as placas compactadas que apresentarem valores abaixo de 10% de afundamento representam que não há risco de deformação permanente das misturas sob condições severas de tráfego. Pensando exclusivamente nesta condição apenas a mistura REF (Figura 59) atendeu as exigências.

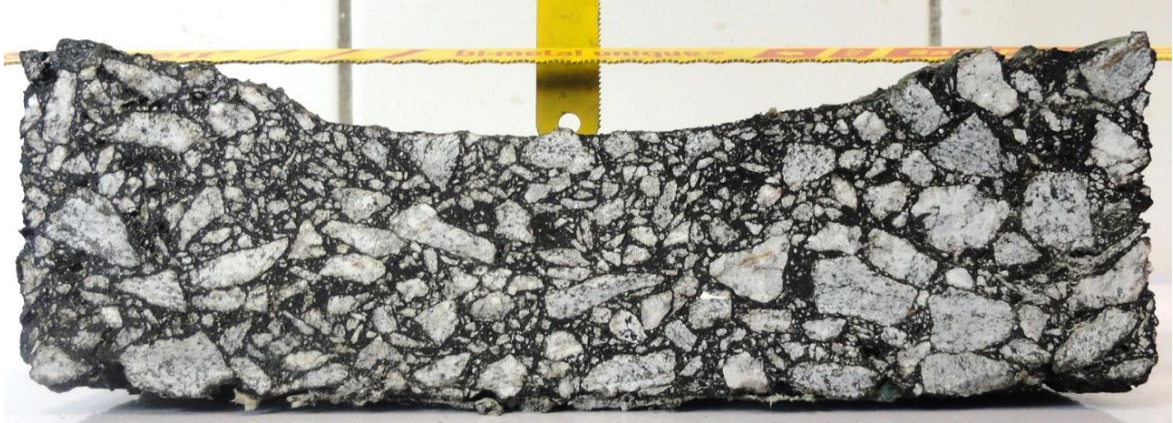


Figura 59 – Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura REF.

De qualquer forma, a mistura GARC\_MRAP apresentou resultados muito similares à mistura REF até os 3000 ciclos, aumentando ligeiramente o afundamento aos 10000 e 30000 ciclos. Ao final do ensaio a mistura apresentou valores médios de 12% de afundamento e, apesar de acima dos 10% requeridos pelas diretrizes francesas, entende-se que o resultado é promissor e positivo, ao levar em conta que a mistura é produzida com 100% de resíduos. Além disso, vale destacar que o valor limite está condicionado a misturas aplicáveis em vias de alto volume de tráfego, o que não inviabiliza a mistura para aplicações em vias de baixo ou médio volume de tráfego. Conforme diretrizes da norma francesa NF EN-13108-2/2006, para algumas misturas delgadas ou ultra delgadas aplicadas em vias de baixo volume de tráfego são aceitáveis valores de 15% de afundamento em 10000 ciclos e, inclusive, para algumas classes de mistura, até 15% de afundamento em 3000 ciclos. Sendo assim, para vias de tráfego leve a mistura GARC\_MRAP tem sua viabilidade comprovada quanto à deformação permanente.

Outro fator importante é o teor de ligante, que tem influência direta nos ensaios de deformação permanente, portanto, já era esperado que a mistura REF, que tem 4,8% de ligante, apresentasse deformação permanente menor do que a mistura GARC\_MRAP, que tem 5,5% de ligante asfáltico. A Figura 60 apresenta um dos corpos de prova da mistura GARC\_MRAP após o ensaio de deformação permanente.

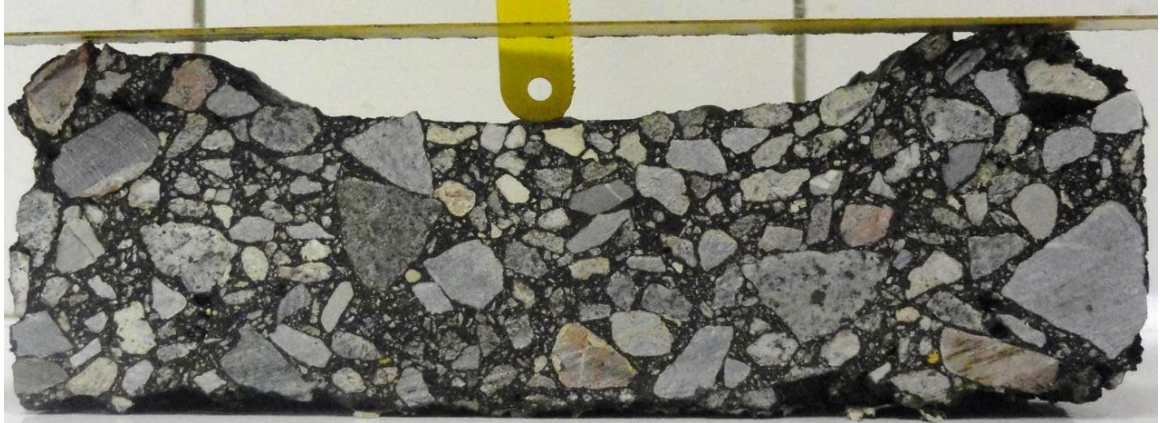


Figura 60 - Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura GARC\_MRAP.

No caso da mistura GM\_ARC o ensaio precisou ser finalizado logo após os 300 ciclos por conta da elevada deformabilidade da mistura. Pelo alto teor de ligante na mistura (9,6%) foi possível observar uma condição de deformação bastante expressiva logo nos 1000 ciclos iniciais (condicionamento), conforme pode ser observado na Figura 61. Na Figura 62 é possível perceber a predominância do mastique em relação aos agregados graúdos, além da heterogeneidade do ARC que, possui agregados de diversas origens, inclusive uma quantidade significativa de material cerâmico, identificado pela coloração avermelhada. De acordo com a NBR 15116:2004, para que sejam classificados como agregados de resíduo de concreto, os agregados devem ter sua fração graúda composta de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.



Figura 61 – Deformação excessiva logo após condicionamento mistura GM\_ARC.

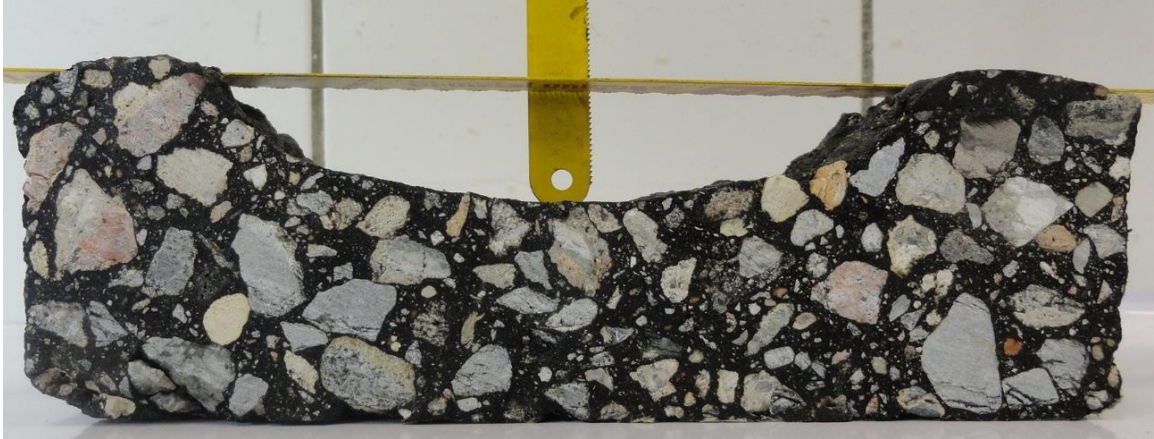


Figura 62 – Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura GM\_ARC.

A mistura GM\_RAP também apresentou deformações expressivas, acima de 25% após os 10000 ciclos e, portanto, o ensaio foi finalizado nesta etapa. Esse fato está diretamente ligado à necessidade de incorporação de um alto teor de AR na mistura a fim de recuperar as propriedades do ligante envelhecido. Conforme detalhado no item 4.3.6 esse alto teor de AR somado ao ligante contido no RAP acarretou em um elevado teor ótimo de ligante na mistura GM\_RAP. De acordo com Zaumanis et al. (2014) esse é um dos problemas encontrados em misturas com alto teor de RAP, quando há problemas na dosagem ou na escolha do AR, provocando a redução da rigidez da mistura e causando um aumento da deformação permanente. No caso da presente pesquisa, diante do grau de envelhecimento do RAP estudado, seria necessária a utilização de um AR com maior eficiência, no sentido de recuperar as propriedades do ligante recuperado com uma menor quantidade de produto. Osmari (2016), que comparou a utilização de agentes rejuvenescedores de origem distintas, concluiu que o AR de origem vegetal, como o resíduo de óleo de cozinha e óleo de mamona, por exemplo, é mais eficiente na redução da rigidez (módulo de cisalhamento dinâmico) das amostras, se comparado ao agente rejuvenescedor de origem de petróleo (AR utilizado na presente pesquisa).

Na Figura 63 é possível verificar a deformação sofrida pela mistura após os 10000 ciclos de ensaio. Além disso, é possível observar também a característica fina do RAP estudado, conforme já amplamente discutido em itens anteriores. Ainda, é importante destacar que o método de dosagem do AR utilizado, a partir dos parâmetros empíricos de penetração e viscosidade, mesmo comumente difundido em pesquisas desta natureza, se mostrou ineficaz. A dosagem do AR a partir de parâmetros reológicos do ligante ou ainda levando em conta o ensaio de deformação



permanente na etapa inicial, como é o caso da metodologia francesa, por exemplo, poderia acarretar em melhora do desempenho de misturas com 100% RAP.

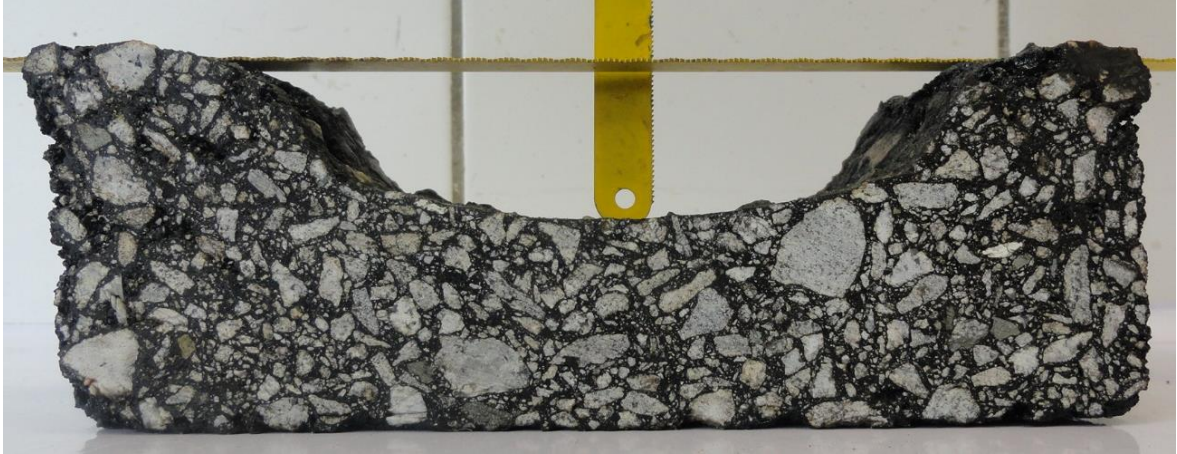
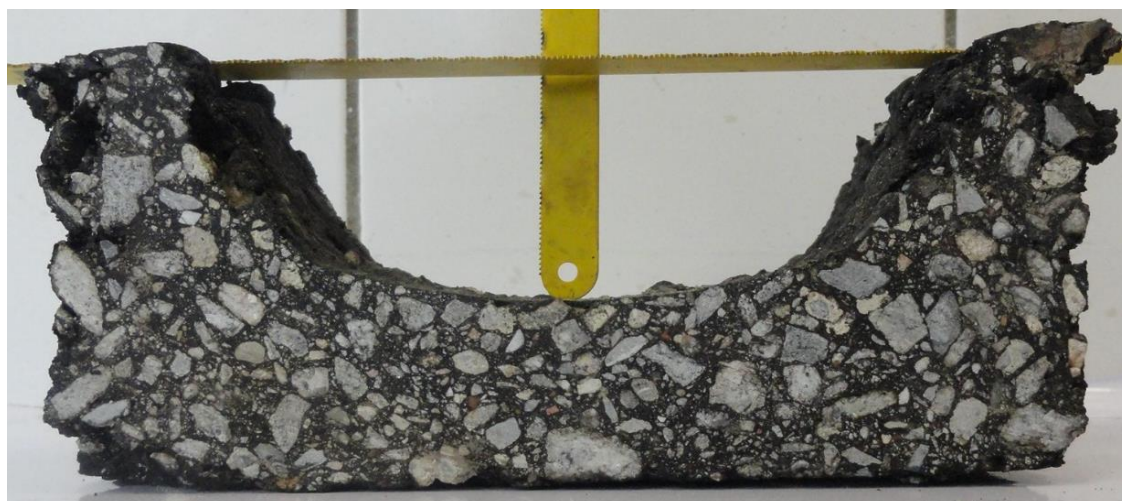
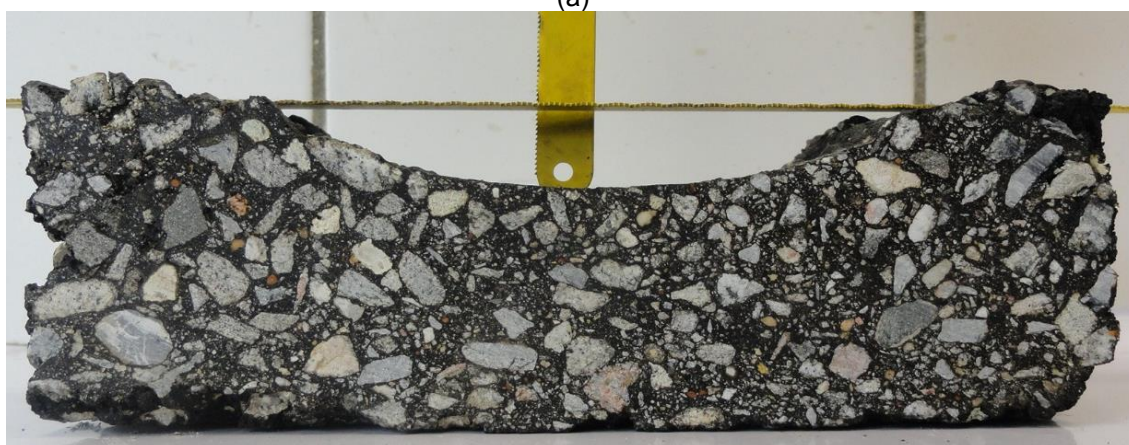


Figura 63 - Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura GM\_RAP.

A mistura GRAP\_MARC, dentre todas as misturas, foi a que apresentou um comportamento bastante díspar entre as duas placas, sendo que após os 3000 ciclos, o afundamento da placa 1 era quase o dobro do afundamento da placa 2. O ensaio foi finalizado aos 10000 ciclos e o resultado, bastante heterogêneo entre as duas placas, pode ser observado na Figura 64. É possível observar a variabilidade da forma do agregado graúdo do RAP, com agregados tanto lamelares quanto cúbicos, característica esta que tem influência direta no comportamento das misturas. Apesar de todas as demais misturas serem compostas de essencialmente de resíduos, exceto a mistura REF, essa foi a única mistura que apresentou essa disparidade. De qualquer forma, considerando o valor médio de afundamento das duas amostras, e uma possível adequação da mistura para atendimento às classes de mistura ultra delgada previstas na norma francesa NF EM 13108-2/2006, a mistura atenderia ao limite de 15% de afundamento aos 3000 ciclos, sendo uma solução apropriada para vias locais, por exemplo.



(a)



(b)

Figura 64 - Corpo de prova após ensaio de deformação permanente – mistura GRAP\_MARC – (a) Placa 1; (b) Placa 2.

#### 4.4.3 Módulo de resiliência

A Figura 65 apresenta os valores médios obtidos a partir do ensaio de módulo de resiliência dos 12 corpos de prova ensaiados, bem como o desvio padrão das amostras. Os resultados individuais de cada corpo de prova obtidos no ensaio de módulo de resiliência encontram-se no Apêndice C.

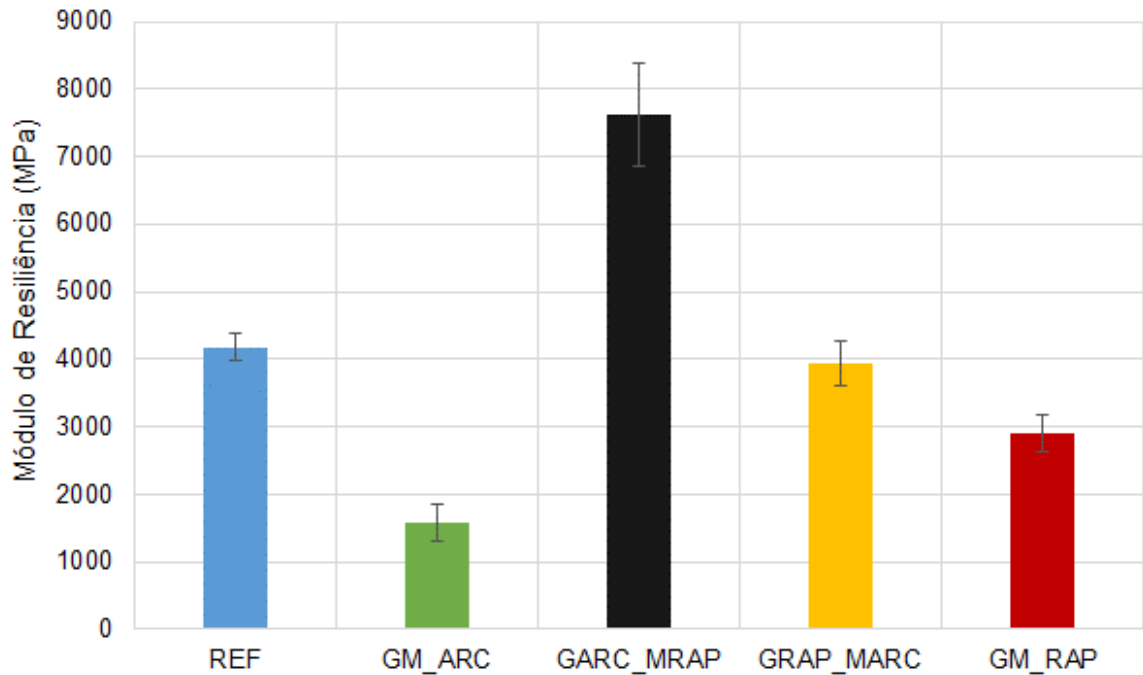


Figura 65 – Resultado dos ensaios de MR misturas estudadas.

A análise estatística aplicada através do teste de Tukey realizou a comparação de todas as médias dos resultados de MR e indicou igualdade estatística entre os resultados da mistura REF com a mistura onde o ARC foi incorporado na fração miúda (GRAP\_MARC). Sendo assim, na presente pesquisa, a incorporação de ARC miúdo não influenciou na rigidez das misturas quando incorporado em conjunto com RAP graúdo, se comparado à mistura de referência. No caso da mistura GM\_ARC é possível concluir que a adição de 100% de ARC nas misturas asfálticas tem influência significativa no módulo de resiliência, diminuindo seu valor, diretamente relacionado ao fato do maior consumo de ligante em função da porosidade dos agregados. O coeficiente de variação apresentado pelos dados analisados foi de 10,35% indicando a baixa dispersão dos valores obtidos no ensaio de MR das misturas estudadas.

Ainda, é importante ressaltar que o RAP tem influência significativa na rigidez das misturas. O ligante envelhecido mais duro, menos elástico, do RAP tipicamente aumenta a rigidez das misturas asfálticas com incorporação desse resíduo (ZAUMANIS et al. 2014). Isso pode ser observado na mistura com GARC\_MRAP, onde o teor de ligante proveniente do RAP (maior teor de ligante na parte fina) é maior e que apresentou a maior rigidez de todas as misturas estudadas. A mistura GM\_RAP teve seu módulo de resiliência influenciado pela ação do agente rejuvenescedor, que deixou o ligante envelhecido menos rígido e, conseqüentemente, diminuiu a rigidez da mistura como um todo. Somado a isso, houve influência também do elevado teor

de ligante da mistura, que acarretou em maior deformação resiliente e, conseqüentemente, menor módulo.

Para a mistura GRAP\_MARC, que possui teor de ligante de 7% é plausível destacar que a incorporação de ligante novo em um teor mais elevado, como é o caso, pode atuar como “agente rejuvenescedor” da mistura, diminuindo a rigidez que seria aumentada pela incorporação do RAP. De maneira análoga, a mistura GARC\_MRAP com 5,5% não obteve esse ganho de “rejuvenescimento” pelo ligante novo devido ao menor teor de ligante, acarretando em um maior módulo de resiliência (maior rigidez).

#### 4.4.4 Vida de fadiga

Nas Tabela 28 e Tabela 29 estão apresentadas as características dos corpos de prova das misturas GM\_ARC e GM\_RAP, respectivamente, utilizados no ensaio de fadiga por compressão diametral.

Tabela 28 – Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura GM\_ARC.

Descrição CP	Nível de Tensão (%)	Carga Aplicada (kgf)	MR (MPa)	Tensão de tração $\sigma_t$ (MPa)	Deformação específica resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Número de aplicações
F	20	103,9	1506	0,09	6,08E-05	0,37	43828
K	20	104,7	1694	0,09	5,41E-05	0,37	57244
G	20	105,0	1470	0,09	6,23E-05	0,37	58111
N	30	156,9	1218	0,14	1,13E-04	0,55	15845
O	30	156,2	1259	0,14	1,09E-04	0,55	15758
P	30	156,6	1052	0,14	1,31E-04	0,55	13327
M	40	207,3	1433	0,18	1,28E-04	0,73	9524
R	40	208,7	1026	0,18	1,79E-04	0,73	2825
S	40	208,7	1214	0,18	1,51E-04	0,73	3853

Tabela 29 - Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura GM\_RAP.

Descrição CP	Nível de Tensão (%)	Carga Aplicada (kgf)	MR (MPa)	Tensão de tração $\sigma_t$ (MPa)	Deformação Específica resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Número de aplicações
D'	20	166,8	2644	0,17	6,53E-05	0,69	26672
B	20	164,3	2853	0,17	6,06E-05	0,69	24136
C	20	163,6	2447	0,17	7,06E-05	0,69	11150
E	30	254,2	2347	0,26	1,10E-04	1,04	6208
F	30	254,9	2884	0,26	9,06E-05	1,04	9620
M	30	256,5	2367	0,26	1,10E-04	1,04	6669
H	40	357,1	2674	0,35	1,30E-04	1,39	5267
K	40	353,9	2660	0,35	1,31E-04	1,39	2092
L	40	343,6	2977	0,35	1,17E-04	1,39	2382

Na Tabela 30 está apresentado o resumo das características dos corpos de prova da mistura REF utilizadas no ensaio de fadiga por compressão diametral.

Tabela 30 - Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura REF.

Descrição CP	Nível de Tensão (%)	Carga Aplicada (kgf)	MR (MPa)	Tensão de tração $\sigma_t$ (MPa)	Deformação Específica resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Número de aplicações
B	20	220,9	3465	0,22	6,29E-05	0,87	3915
D	20	220,9	4323	0,22	5,12E-05	0,88	6106
E	20	220,9	4019	0,23	5,60E-05	0,90	9556
F	30	331,3	3939	0,33	8,32E-05	1,31	1329
G	30	331,3	4407	0,33	7,43E-05	1,31	2163
H	30	331,3	4031	0,33	8,16E-05	1,32	1692
I	40	441,8	3608	0,44	1,21E-04	1,75	535
L	40	441,8	3801	0,46	1,20E-04	1,82	1092
M	40	441,8	3996	0,44	1,10E-04	1,76	898

As Tabela 31 e Tabela 32 apresentam o resumo das características dos ensaios realizados nos corpos de prova das misturas GRAP\_MARC e GARC\_MRAP. Nessas misturas, os níveis de tensão foram de 30%, 40% e 50% devido ao não cumprimento do critério de ruptura para o nível de tensão de 20%, possivelmente pelo surgimento do fenômeno FEL, conforme relatado no item 3.2.4.1.

Tabela 31 - Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura GRAP\_MARC.

Descrição CP	Nível de Tensão (%)	Carga Aplicada (kgf)	MR (MPa)	Tensão de tração $\sigma$	Deformação Específica resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Número de aplicações
H	30	355,1	3694	0,33	8,92E-05	1,32	36585
I	30	355,1	4315	0,35	8,11E-05	1,40	42561
J	30	355,1	3290	0,34	1,04E-04	1,36	44761
N	40	473,5	3034	0,45	1,49E-04	1,80	6373
O	40	473,5	3367	0,45	1,34E-04	1,81	9019
P	40	473,5	3211	0,46	1,43E-04	1,83	6001
E	50	532,7	3023	0,52	1,71E-04	2,07	1806
G	50	532,7	3099	0,51	1,64E-04	2,03	2050

Tabela 32 - Resultado dos ensaios de vida de fadiga – mistura GARC\_MRAP.

Descrição CP	Nível de Tensão (%)	Carga Aplicada (kgf)	MR (MPa)	Tensão de tração $\sigma$	Deformação Específica resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Número de aplicações
M	30	488,6	7008	0,48	6,85E-05	1,92	78811
N	30	488,6	6347	0,48	7,58E-05	1,93	71680
O	40	651,5	6448	0,65	1,01E-04	2,60	11321
U	40	651,5	7088	0,63	8,95E-05	2,54	15240
W	40	651,5	7198	0,63	8,73E-05	2,51	17578
S	50	814,4	6582	0,78	1,19E-04	3,13	8182
J	50	814,4	6850	0,82	1,19E-04	3,27	8296

Diante dos dados apresentados, é possível comparar os resultados díspares das duas misturas que apresentaram MR estatisticamente iguais, REF e GRAP\_MARC. Para uma carga similar (30% da RT), 331,3KPa para a mistura REF e 355,1KPa para a mistura GRAP\_MARC, por exemplo, a primeira resistiu a um número de solicitações de carga quase 24 vezes menor do que a segunda. Esse desempenho tem relação direta com o teor de ligante da mistura REF (4,8%), sendo o mais baixo teor entre as misturas estudadas. Além disso, o fato pode estar ligado com a aderência entre agregados e ligante, que na mistura GRAP\_MARC foi favorecida pela porosidade do ARC que proporciona ancoragem mecânica e pelo RAP já estar coberto de ligante há bastante tempo gerando uma forte adesão. De qualquer forma, os valores encontrados para a mistura REF são da mesma magnitude dos resultados de Johnston et al. (2015) que avaliou a fadiga por compressão diametral de misturas mornas com aditivo surfactante, utilizando também o critério de ruptura de redução de 50% do MR inicial.

A Figura 66 e a Figura 67 apresentam o comparativo das misturas estudadas, quanto a fadiga por compressão diametral, sendo a primeira considerando a diferença de tensões (MPa) e a segunda considerando a deformação específica resiliente ( $\epsilon_i$ ). Além disso, nas duas figuras estão expressas, para cada mistura estudada, as equações dos modelos log-log que correlacionam as duas propriedades (diferença de tensões e deformação específica resiliente, respectivamente) com o número de solicitações necessárias para o fim do ensaio.

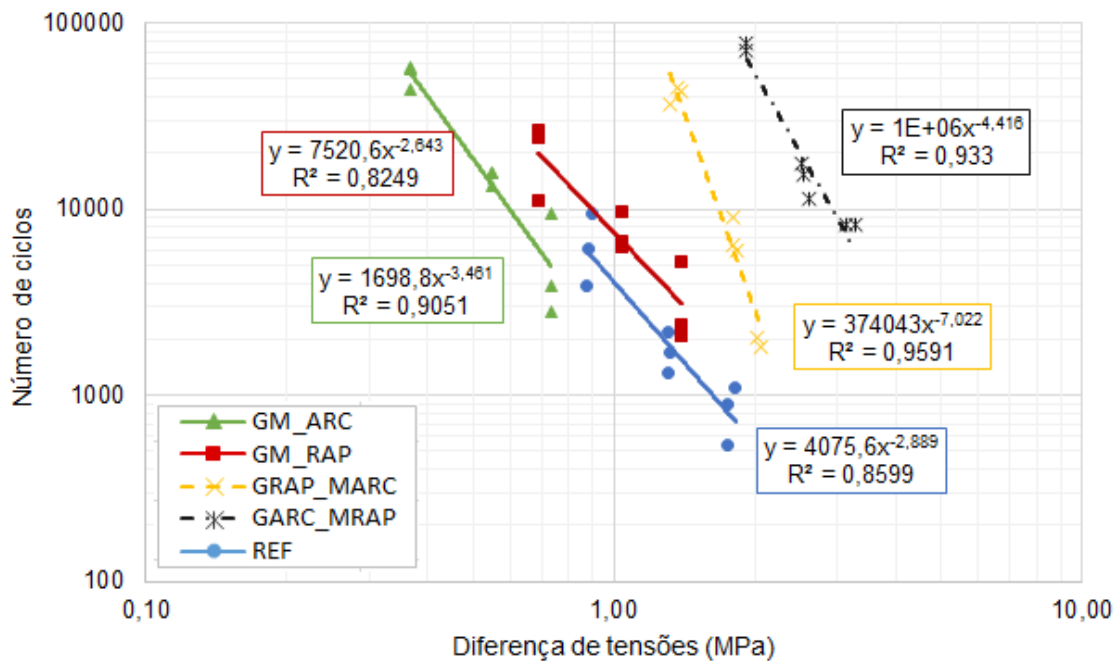


Figura 66 – Vida de fadiga versus diferença de tensões.

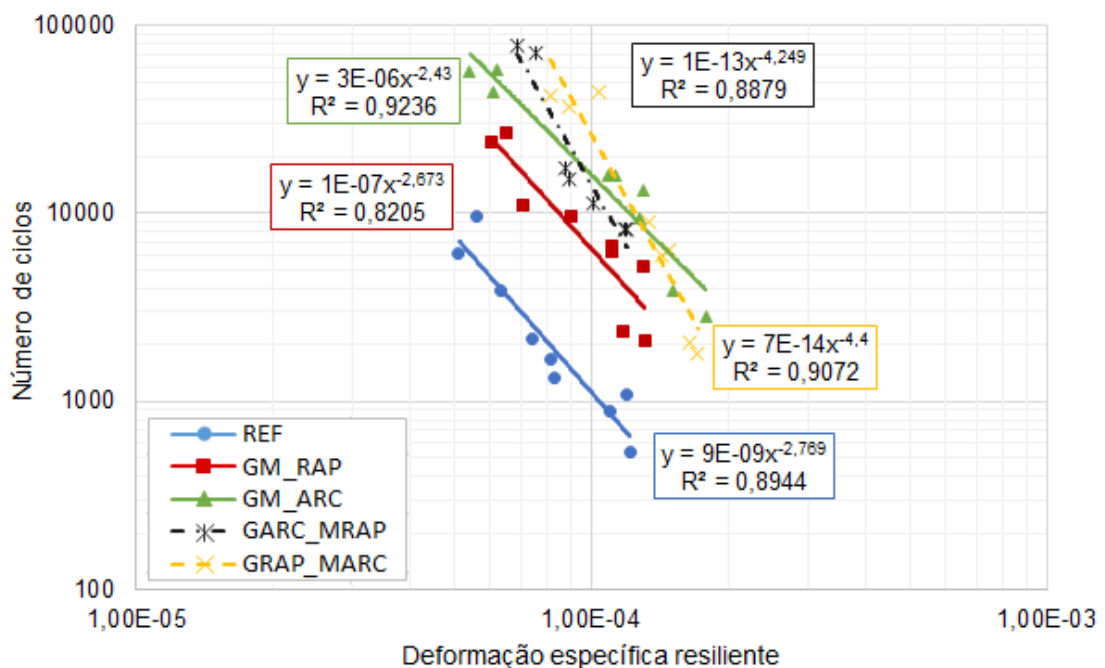


Figura 67 - Vida de fadiga versus deformação específica resiliente.

Na comparação das duas misturas que tiveram resultados de MR similares, para uma deformação de  $1E-04$ , a vida de fadiga da mistura GRAP\_MARC foi cerca de 12 vezes maior em relação à mistura REF. Os autores Pasandín e Pérez (2017), que pesquisaram misturas asfálticas com diversos teores de ARC, corroboram este fato, concluindo que quanto maior o percentual de incorporação de ARC na mistura, maior é a vida de fadiga da mistura, fato esse diretamente relacionado com o teor de ligante das misturas. De qualquer forma, uma avaliação global de todas as misturas só pode ser realizada levando em conta a uma análise mecanicista, que pode traduzir os efeitos dessas curvas de fadiga em termos de vida útil do revestimento, para cada uma das misturas estudadas.

As análises já demonstradas neste item são correspondentes aos resultados de ensaio de vida de fadiga por tensão controlada com critério de paralisação do ensaio quando da redução de 50% do MR inicial, conforme detalhado na metodologia. Apesar de bastante utilizado e difundido no meio acadêmico, esse critério assim como o critério de ruptura total do corpo de prova, podem embutir no resultado final um erro que é a desvantagem mais criticada do ensaio. Ocorre que, durante o ensaio são geradas tensões cisalhantes junto aos frizos e tem-se um acúmulo de deformação permanente em cada aplicação de carga, sendo que o corpo de prova pode sofrer degradação por excesso de deformação permanente e não propriamente por fadiga. Por essa razão, à título de comparação, os resultados do ensaio de vida de fadiga também foram expressos utilizando outro critério de paralisação, qual seja, o deslocamento do atuador de carga, no valor de 1mm. A Figura 68 e Figura 69 apresentam os resultados do ensaio de vida de fadiga utilizando o critério de deslocamento de 1mm do pistão atuador de carga, considerando a diferença de tensões e a deformação específica resiliente, respectivamente. É possível perceber que, utilizando o critério de deslocamento de 1mm do atuador, os números de ciclos até a paralisação do ensaio foram significativamente menores do que o critério de redução do MR em 50%.



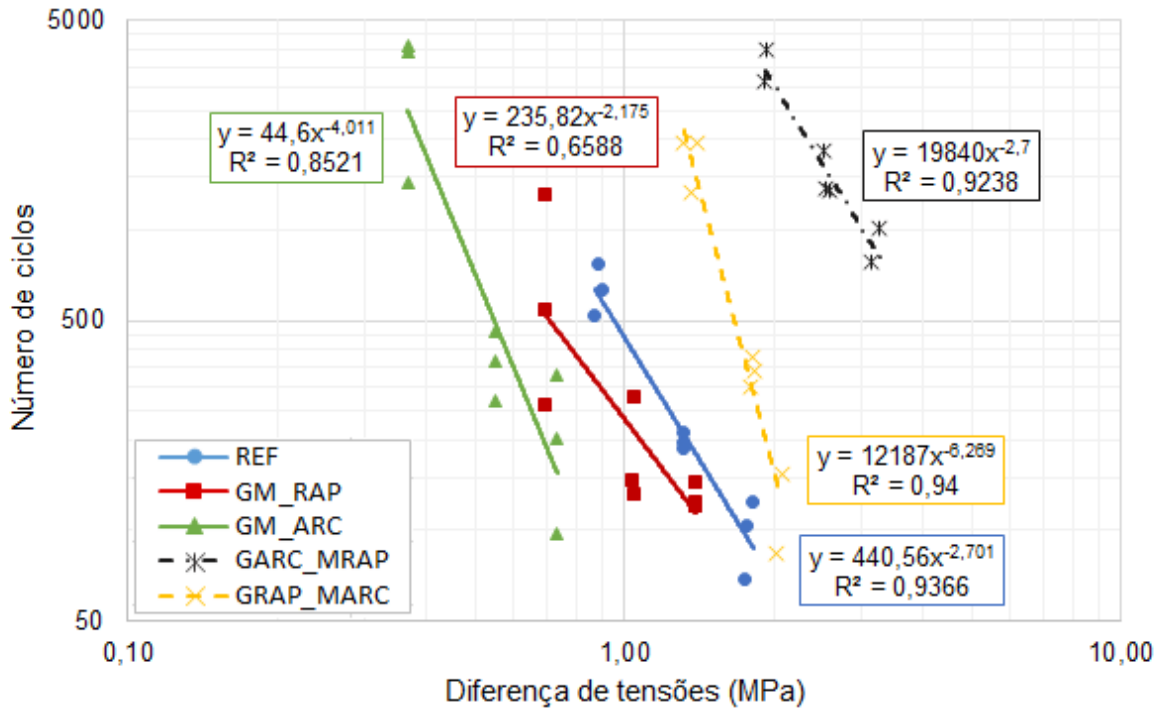


Figura 68 - Vida de fadiga versus diferença de tensões – critério deslocamento atuador.

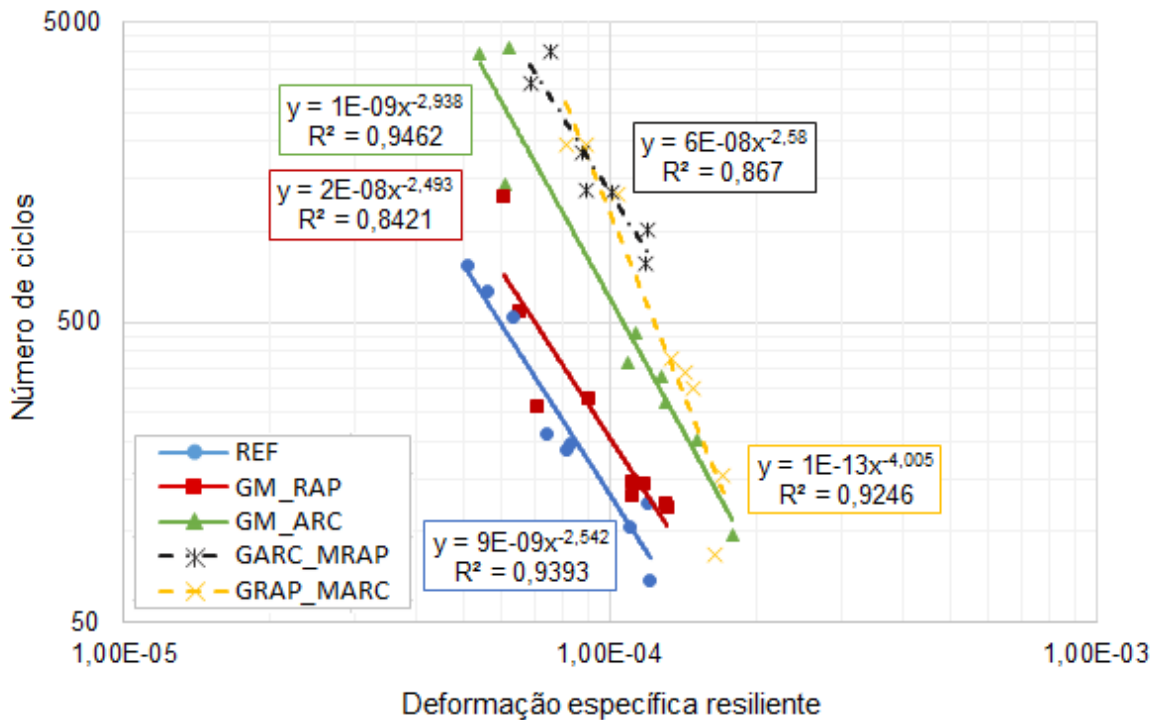


Figura 69 - Vida de fadiga versus deformação específica resiliente – critério deslocamento atuador.

#### 4.5 ETAPA 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fim de contribuir para a avaliação do desempenho das misturas, a partir das curvas de fadiga de cada mistura apresentadas no item 4.4.4, foi realizada a análise mecanicista de uma estrutura hipotética variando apenas a mistura utilizada no

revestimento asfáltico. A partir da modelagem no software Elsym5, foi possível verificar os valores de deformação específica de tração ( $\epsilon_t$ ) na fibra inferior da camada de revestimento para cada uma das misturas estudadas. É importante destacar que, embora tenha sido utilizado o modelo de fadiga, as deformações previstas pelo software não estão dentro do intervalo de deformações obtidas no ensaio em laboratório, o que possivelmente ocorreria se a espessura de revestimento adotada fosse maior. Os resultados completos da análise obtidos no software Elsym5, para cada mistura estudada, constam no Apêndice D.

Com as deformações de tração foi possível determinar a vida útil de cada mistura estudada, considerando a estrutura caracterizada na Figura 37. Para tal, as deformações foram aplicadas no modelo de fadiga criado com os parâmetros experimentais ( $k_2$  e  $n_2$ ) de cada uma das misturas, conforme Equação 8 já apresentada anteriormente. A Tabela 33 apresenta a estimativa de vida útil das misturas pesquisadas utilizando o modelo de fadiga próprio de cada mistura (resultado do ensaio de vida de fadiga). É importante ressaltar que este modelo não foi calibrado em campo, o que permitiria a definição de um fator campo laboratório específico. De qualquer forma, segundo Franco (2007), diversos órgãos e institutos de pesquisa brasileiros vêm utilizando o fator campo laboratório igual a  $10^4$ , definido nas pesquisas de Pinto (1991) para o modelo de fadiga do referido autor que associa deformação específica inicial e diferença de tensões. Sendo assim, os valores de vida útil estimada estão corrigidos com o fator campo laboratório de  $10^4$ . Ainda, para efeito comparativo, a vida útil foi estimada utilizando os dois critérios de paralisação do ensaio de vida de fadiga, quais sejam, a redução de 50% do MR inicial e o deslocamento de 1mm do atuador de carga.

Tabela 33 – Estimativa vida útil a partir das curvas de fadiga.

Mistura	MR (MPa)	Def. específica de tração ( $\epsilon_t$ )	Modelo vida de fadiga $N=k_2*(1/\epsilon_t)^{n_2}$				Vida útil estimada	
			Redução MR 50%*		Desloc. atuador 1mm*		Redução MR 50%*	Desloc. atuador 1mm*
			$k_2$	$n_2$	$k_2$	$n_2$		
REF	4177	0,000205	9,40E-09	2,769	9,04E-09	2,542	1,53E+06	2,15E+05
GM_RAP	2908	0,000229	1,32E-07	2,673	2,20E-08	2,493	7,09E+06	2,61E+05
GM_ARC	1582	0,000256	3,04E-06	2,430	1,07E-09	2,938	1,63E+07	3,79E+05
GARC_MRAP	7629	0,000162	1,44E-13	4,249	6,48E-08	2,580	1,83E+07	3,90E+06
GRAP_MARC	3930	0,000209	6,62E-14	4,400	1,10E-13	4,005	1,03E+07	6,05E+05

\*critério de paralisação ensaio fadiga por compressão diametral.

A vida útil estimada a partir do critério de deslocamento de 1mm do atuador de carga foi menor para todas as misturas, em comparação ao critério de redução de 50% do módulo de resiliência inicial. Neste critério (atuador) a vida útil entre todas as misturas foi similar, com diferença significativa apenas para a mistura GARC\_MRAP, que apresentou melhor resultado dentre todas as misturas analisadas, resistindo a um número de solicitações maior com uma mesma deformação. Esse fato pode estar relacionado não apenas com o teor de ligante das misturas, mas também, com a aderência entre ligante e agregado. A aderência entre ligante e agregado na mistura REF é recente, enquanto que na mistura GRAP\_MARC o agregado está aderido ao ligante há muito mais tempo, contando ainda com uma adesão adicional causada pela ancoragem mecânica do ligante asfáltico que entra nos poros do ARC. Ainda, é interessante observar que a mistura REF e a GRAP\_MARC, que possuem MR estatisticamente iguais e, portanto, deformações muito semelhantes, apresentaram vida útil distintas, em ambos os critérios.

Diante do exposto, a mistura com melhor desempenho no que diz respeito à vida útil, ou seja, que resiste a um maior número de repetições de carga, foi a mistura GARC\_MARC, mesmo não sendo a mistura com maior teor de ligante (5,5%), fato esse que reforça a hipótese anterior no que diz respeito à aderência entre ligante e agregado.

Na Tabela 34 estão compilados os resultados de ensaio de caracterização mecânica e de avaliação de desempenho das misturas estudadas. Diante dos resultados da avaliação de desempenho é possível constatar que há influência significativa da fração granulométrica em que os resíduos estudados são incorporados já que obtiveram resultados bastante díspares quando aplicados em frações distintas. A mistura com incorporação de ARC na fração graúda e RAP na fração miúda (GARC\_MRAP) foi a que apresentou os melhores resultados nos ensaios de desempenho das misturas asfálticas. No ensaio de deformação permanente a mistura obteve valores próximos a mistura de referência (REF). Já no ensaio de vida de fadiga o resultado foi ainda mais satisfatório, com desempenho muito superior a mistura de referência para um mesmo valor de deformação específica resiliente.

Tabela 34 – Resumo resultados de ensaio das misturas estudadas.

ENSAIOS		REF	GM_ARC	GARC_MRAP	GRAP_MARC	GM_RAP
Deformação Permanente	Ciclos	Afundamento em trilha de roda (%)				
	100	1	21	1	3	5
	300	2	27	2	5	7
	1000	3	-	3	8	12
	3000	4	-	5	15	23
	10000	5	-	9	23	27
	30000	8	-	12	-	-
Fadiga critério redução MR 50%	Nível de Tensão	Número de solicitações				
	20%	6526	53061	-	-	20653
	30%	1728	14977	75246	41302	7499
	40%	842	5401	14713	7131	3247
	50%	-	-	8239	1928	-
Fadiga critério deslocamento atuador 1mm	Nível de Tensão	Número de solicitações				
	20%	641	3155	-	-	707
	30%	199	368	3556	1749	187
	40%	99	209	1523	339	129
	50%	-	-	894	120	-
Dano por umidade induzida		0,77	0,77	0,88	0,89	0,82
Módulo de Resiliência		4177	1582	7629	3930	2908
Vida útil Elsym5	Redução MR 50%	1,5E+06	1,6E+07	1,8E+07	1,0E+07	7,1E+06
	Deslocamento atuador 1mm	2,1E+05	3,8E+05	3,9E+06	6,1E+05	2,6E+05

Sendo assim, do ponto de vista técnico a mistura se mostrou adequada, principalmente com relação ao seu uso em vias de baixo a médio volume de tráfego onde o requisito de afundamento máximo não é tão severo quanto para vias de alto volume de tráfego. Ainda, do ponto de vista ambiental, uma mistura com 100% de resíduos, com usinagem e compactação a temperaturas mais baixas, tem sua aplicação justificada de forma ainda mais evidente.

Outro aspecto importante que normalmente norteia as aplicações da engenharia é a esfera econômica. Neste sentido, a mistura de referência, fabricada sem a adição de resíduo, possui um teor de ligante de 4,8%, com CAP 50/70. A mistura GARC\_MRAP, com incorporação de ARC na fração graúda e RAP na fração miúda possui um teor de ligante de 5,5%. Apesar de apresentar um teor de ligante superior, o que acarretaria em custo mais elevado, parte desse ligante será

proveniente do RAP. Como o RAP está sendo incorporado na fração miúda o aproveitamento é ainda maior, já que as partículas finas possuem um teor de ligante mais elevado, como já discutido na presente pesquisa. Sendo assim, dos 5,5% de ligante da mistura, apenas 3,1% é ligante novo adicionado, sendo 2,4% remobilizado do RAP, como pode ser observado na Figura 70. Em comparação com a mistura REF, esse aproveitamento do ligante contido no RAP representa uma economia de 35% no insumo mais oneroso na produção de uma mistura asfáltica que é o ligante. Ainda, há economia na aquisição dos agregados reciclados, que possuem valor comercial inferior aos agregados naturais. É evidente que o valor final da mistura asfáltica deve contabilizar uma série de outros fatores, porém, a economia nos insumos é evidente e expressiva.

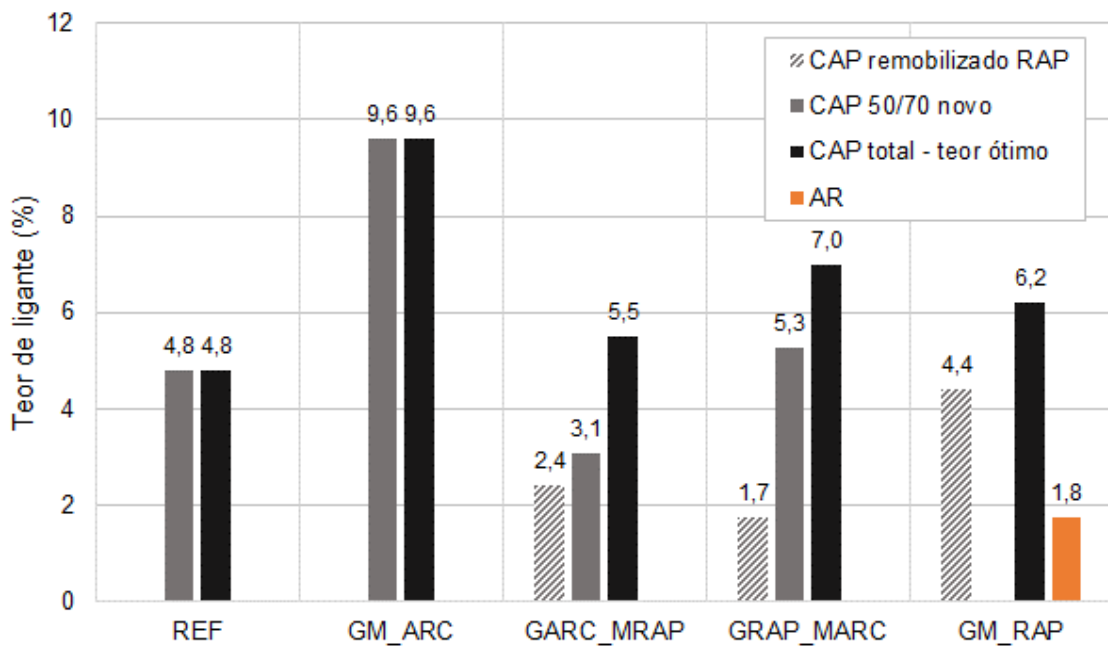


Figura 70 – Teor de ligante das misturas estudadas.

## 5 CONCLUSÕES

Diante do estudo realizado, que avaliou a influência no desempenho de misturas asfálticas produzidas com incorporação de dois resíduos, nas frações granulométricas graúda, miúda e total de misturas asfálticas mornas, é possível concluir que existe influência tanto do tipo de resíduo incorporado quanto da fração em que o mesmo é disposto. Ainda, o uso de ambos os resíduos, seja na fração graúda ou miúda, apresenta desempenho superior em comparação às misturas compostas por 100% de cada um dos resíduos isoladamente. Em termos gerais, estão listados a seguir as principais conclusões e considerações sobre o presente trabalho.

### Teor ótimo de ligante

- a quantidade e o tamanho do ARC incorporado exerceram influência significativa nas misturas estudadas em uma relação diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a quantidade de ARC incorporada e quanto mais fina a fração, maior o teor de ligante ótimo das misturas;
- a dosagem do teor de AR a ser adicionado em misturas com altos teores de RAP possuem forte dependência do grau de envelhecimento do ligante recuperado podendo, inclusive, inviabilizar a produção de uma mistura com 100% de RAP, a menos que seja selecionado um AR com alta eficiência (alto teor de maltenos), que recupere as propriedades do ligante com uma quantidade menor de produto. No presente estudo, devido ao grau de envelhecimento do ligante recuperado, foi necessária a adição de 40% de AR para produzir a mistura GM RAP;
- quanto ao RAP, é legítimo afirmar que as frações graúda e miúda apresentam diferença no teor de ligante, sendo este maior na fração miúda do que na graúda, em função da maior superfície específica dos finos. Esse fato confirma a importância de se viabilizar, na prática, a separação do RAP em pilhas de diversas frações. Essa separação pode auxiliar a diminuição da heterogeneidade do resíduo e, com isso, possibilitar um controle mais efetivo na dosagem das misturas asfálticas, além de possibilitar a diversificação e otimização da utilização do RAP;

- a redução de 40°C aplicada às misturas estudadas, apesar de indicada pela literatura e principalmente pelos fornecedores do aditivo como factível, pode ter sido demasiada, neste caso. Principalmente com relação à usinagem, a temperatura mais baixa pode ter dificultado o recobrimento completo dos agregados com o ligante asfáltico e, por conta disso, acarretado em um teor de ligante elevado, como o observado nas misturas estudadas.

### **Granulometria e características dos agregados**

- diante da análise visual das placas de deformação permanente serradas é possível perceber uma provável alteração da granulometria prevista na dosagem das misturas inteiramente compostas por resíduo, tanto RAP quanto ARC. Para o RAP essa alteração pode ser explicada pelos “falsos grãos” aglomerados de ligante e agregado, já que a dosagem é feita com base na granulometria do RAP após a extração. Somado a isso, pode haver quebra da argamassa aderida no ARC ou dos agregados mais frágeis, durante a compactação das misturas. Além da alteração na granulometria, outro problema da quebra do ARC é que, caso isso ocorra, existem faces de agregados que ficam sem recobrimento de ligante, prejudicando o desempenho das misturas;
- a forma do agregado graúdo exerce muita influência sobre as propriedades das misturas asfálticas e, quanto ao RAP especificamente, a parcela graúda é muito comprometida pela heterogeneidade no que diz respeito à forma, sendo assim, neste quesito a utilização de RAP miúdo tende a ser mais prudente, já que na fração miúda a influência da forma é menos significativa.

### **Desempenho e propriedades mecânicas**

- o teor de ligante asfáltico é o componente que exerce maior influência no módulo de resiliência das misturas. O alto teor de ligante das misturas com ARC, decorrente da porosidade dos agregados, reduziu o módulo de resiliência das mesmas, sendo compensado, nos casos de combinação do

ARC com RAP, pela rigidez do ligante asfáltico envelhecido, fazendo com que o módulo de resiliência fosse aumentado. No caso da mistura 100% RAP, o agente rejuvenescedor recuperou as propriedades do ligante envelhecido, tornando a mistura menos rígida, porém, pelo excesso de ligante, esse incremento foi demasiado. Neste sentido, é possível inferir que a metodologia de dosagem de AR a partir dos parâmetros de viscosidade e penetração, por exemplo, pode não ser a mais adequada para misturas com altos teores de RAP;

- o dano por umidade induzida das misturas estudadas foi satisfatório, ficando dentro dos limites aceitáveis, com destaque para as três misturas que continham RAP em sua composição, seja na parte miúda, na graúda ou na fração total, que obtiveram melhor desempenho entre as demais. Essa condição favorável pode estar relacionada com a forte adesão entre as partículas, pelo agregado já estar coberto de ligante por mais tempo do que nas misturas novas;
- o percentual de afundamento em trilha de roda das misturas foi fortemente influenciado pelo teor de ligante, de modo que os teores mais elevados acarretaram em valores maiores de afundamento. As misturas REF e GARC\_MRAP que tinham os menores teores de ligante, 4,8% e 5,5%, respectivamente, apresentaram os melhores resultados quanto à deformação permanente. No caso da mistura GARC\_MRAP é possível atestar a viabilidade da mistura para vias com baixo volume de tráfego, já que os resultados foram próximos aos da mistura REF, que atendeu ao limite aceitável para vias de alto volume de tráfego;
- a vida de fadiga das misturas foi diretamente influenciada pelo teor de ligante, sendo consideravelmente inferior para a mistura REF, que tem o menor teor entre as misturas estudadas;
- a partir do dimensionamento foi possível verificar a importância da avaliação do desempenho da vida de fadiga em conjunto com a deformabilidade do material, ou seja, com seu módulo de resiliência. Neste caso, a mistura com GARC\_MRAP foi a que apresentou maior vida útil, considerando a mesma estrutura de pavimento. Outra constatação interessante diz respeito a mistura REF e a mistura GRAP\_MARC, que possuem MR estatisticamente iguais e, conseqüentemente, deformações



muito semelhantes, porém, a mistura GRAP\_MARC resistiria a um número de solicitações aproximadamente 7 vezes maior do que a REF.

Por fim, a partir da avaliação dos ensaios realizados, inclusive do dimensionamento (previsão de vida útil do revestimento asfáltico), destaca-se o bom desempenho da mistura GARC\_MRAP, produzida com 100% de resíduos e com necessidade de incorporação de ligante novo convencional de apenas 3,1% (2,4% é proveniente do RAP). Sendo assim, é factível afirmar que a mistura GARC\_MRAP apresenta-se como uma alternativa econômica, ambiental e tecnicamente viável para pavimentação, principalmente para vias de baixo volume de tráfego.

### 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- avaliar a granulometria após a usinagem e compactação das misturas com os resíduos RAP e ARC, para verificação da conformidade com a granulometria prevista na dosagem e se há faces de agregado sem recobrimento de ligante por conta dessa quebra durante a compactação;
- avaliar outras composições granulométricas das misturas com incorporação de RAP e ARC, com vistas a aplicação para vias de médio volume de tráfego, baseado na metodologia francesa, por exemplo;
- realizar a extração do ligante envelhecido do RAP em maior número de frações (além das duas realizadas na presente pesquisa), a fim de possibilitar uma diminuição da heterogeneidade do mesmo e propiciar uma dosagem adequada;
- avaliar o desempenho das misturas com a incorporação de outros tipos de ligantes, modificados por polímeros, por exemplo, a fim de melhorar o desempenho das misturas, vislumbrando aplicações em rodovias com alto volume de tráfego;
- avaliar o desempenho de misturas com a combinação de agregado natural e RAP, a fim de corrigir a granulometria no que diz respeito ao excesso de finos do RAP avaliado;
- avaliar o desempenho de misturas mornas com redução de temperatura de 20°C a 30°C com relação à mistura convencional usinada à quente;

- selecionar um AR mais eficiente para ligantes com alto grau de envelhecimento, ou ainda testar novas metodologias para dosagem do AR, a fim de propiciar uma mistura com 100% de RAP com desempenho adequado;
- avaliar o mecanismo de rejuvenescimento do ligante envelhecido do RAP com o AR, através de ensaios de avaliação reológica, investigações microscópicas e procedimentos de fracionamento de ligantes asfálticos, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELPRE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2016**. São Paulo, 2015. Disponível em:

<<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2018.

ABREU, L. P. F.; OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; FONSECA, P. V. Recycled asphalt mixtures produced with high percentage of different waste materials. **Construction and Building Materials**, 84, 230-238, 2015.

ALMEIDA-COSTA, A.; BENTA, A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, 112, 2308-2317, 2016.

ALMEIDA, M. D.; AFONSO, M. L. Warm Mix Recycled Asphalt – a sustainable solution. **Journal of Cleaner Production**, 107, 310-316, 2015.

ARABANI, M.; MOGHADAS, F. N.; AZARHOOSH, A.R. Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures. **International Journal of Pavement Engineering**, 14 (6), 531–539, 2013.

ARÁMBULA-MERCADO, E.; KASEER, F.; MARTIN, A. E.; YIN, F.; CUCALON, L. G. Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. **Construction and Building Materials**, 158, 432-442, 2018.

ASPHALT INSTITUTE. The Bailey Method: Achieving Volumetrics and HMA Compactability. Lexington, 2014. Disponível em: <<http://www.asphaltinstitute.org/bailey-method-achieving-volumetrics-and-hma-compactability/>>. Acesso em: 05 jul. 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 19M/T 19-14**: Standard Method of Test for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. Washington, 2014.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 283-14**: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Washington, 2014.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 228-09**: Standard Method of Test for Specific Gravity of Semi-Solid Asphalt Materials. Washington, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 51:** Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NM 248:** Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6560:** Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento: Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR 6576:** Materiais Asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 14950:** Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 15617:** Misturas asfálticas – Resistência do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2008.

BEHNOOD, A.; GHAREHVERAN, M. M.; ASL, F. G.; AMERI, M. Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash. **Construction and Building Materials**, 96, 172–180, 2015.

BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007.

BLANKENDAAL, T.; SCHUUR, P.; VOORDIJK, H. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. **Journal of Cleaner Production**, 66, 27-36, 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm ?codlegi=636> >. Acesso em: 04 mai. 2016.

BRIBRÍAN, I. Z.; CAPILLA, A.V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, 46, 1133-1140, 2011.

CHEN, M.; LIN, J.; WU, S. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. v. 25. p. 3909-3914. Wuhan, China, 2011.

CHO, Y.; YUN, T.; KIM, I. T.; CHOI, N. R. The application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base layer aggregate. *Journal of Civil Engineering*, 15(3), 473-478, 2011.

CNT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017 – Relatório Gerencial**. Brasília, 2017.

\_\_\_\_\_. **Pesquisa CNT de Rodovias 2015 – Relatório Gerencial**. Brasília, 2015.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307. **Diário Oficial da União**, nº 136, p. 95-96, Brasília, DF, 17 jul. 2002. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 04 mai. 2016.

COOPER, S. B.; ELSEIFI, M.; MOHAMMAD, L. N.; HASSAN, M. Performance and Cost-Effectiveness of Sustainable Technologies in Flexible Pavements using the mechanistic-empirical pavement design guide. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 24 (2), 239-247, 2012.

DANIEL, J. S.; RIVERA, F. **Application of the Bailey method to New Hampshire asphalt mixtures**. New Hampshire Department of Transportation Report FHWA-NH-RD-13733F. New Hampshire Department of Transportation. New Hampshire, Dezembro, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **NORMA DNER 043/1995 - ME**: Misturas Betuminosas a quente – ensaio Marshall - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NORMA DNER 053/1994 - ME**: Misturas Betuminosas – percentagem de betume - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NORMA DNER 083/1998 - ME**: Agregados – análise granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

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

\_\_\_\_\_. **NORMA DNER 135/2010 - ME**: Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 031/2006 - ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NORMA DNIT 158/2011 - ME**: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

DINIS-ALMEIDA, M.; CASTRO-GOMES, J.; SANGIORGI, C.; ZOOROB, S. E.; AFONSO, M. L. Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP. **Construction and Building Materials**, 112, 1–6, 2016.

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

EAPA - European Asphalt Pavement Association. Asphalt In Figures 2014. Disponível em:

<[http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/AIF\\_2014\\_16022016.pdf](http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/AIF_2014_16022016.pdf)>. Acessado em: 14 jun. 2017

EAPA - European Asphalt Pavement Association. Asphalt In Figures 2015. Disponível em:

<[http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/2016/AIF\\_2015\\_v6.pdf](http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/2016/AIF_2015_v6.pdf)>. Acessado em: 14 jun. 2017.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPav**. 294 p. Tese (Doutorado) – Universidade federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 2007.

FREIRE, J.; GÓIS, T.S.; DOMINICINI, W.K.; LUTIF, J. **O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo**. XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Curitiba, nov., 2014.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. 195 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, São Paulo, 2015.

GIANI, M. I.; DOTELLI, G.; BRANDINI, N.; ZAMPORI, L. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, 104, 224–238, 2015.

GUO, N.; YOU, Z.; ZHAO, Y.; TAN, Y.; DIAB, A. Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, 64, 141–149, 2014.

IPEA, INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil - Relatório de Pesquisa**. Brasília, 2012.

JAMSHIDI, A.; HAMZAH, M. O.; KURUMISAWA, K.; NAWA, T.; SAMALI, B. Evaluation of sustainable technologies that upgrade the binder performance grade in asphalt pavement construction. **Materials and Design**, 95, 9–20, 2016.

JOHNSTON, M. G.; BOCK, A. L.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; RIBEIRO, R. **Influência do período de condicionamento em estufa sobre os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas mornas**. XVIII Congresso Ibero Latinoamericano del asfalto 2015. Bariloche, Argentina, 2015.

KOWALSKI, K. J.; KRÓL, J.; RADZISZEWSKI, P.; CASADO, R.; BLANCO, V.; PÉREZ, D.; VIÑAS, V. M.; BRIJSSE, Y.; FROSCH, M.; LE, D. M.; WAYMAN, M. Eco-friendly materials for a new concept of asphalt pavement. *Transportation Research Procedia*, 14, 3582 – 3591, 2016.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação.** 289 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, São Paulo, 2016.

LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. **Advances in Colloid and Interface Science**, 145, 42-82, 2009.

LOPES, M.; GABET, T.; BERNUCCI, L.; MOUILLET, V. Durability of hot and warm asphalt mixtures containing high rates of reclaimed asphalt at laboratory scale. **Materials and Structures**, 48, 3937–3948, 2015.

MENAPACE, I.; CUCALON, L. G.; KASEER, F.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; MARTIN, A. E.; MASAD, E.; KING, G. Effect of recycling agents in recycled asphalt binders observed with microstructural and rheological tests. **Construction and Building Materials**, 158, 61-74, 2018.

MILLS-BEALE, J.; YOU, Z. The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates. **Construction and Building Materials**, 24, 230–235, 2010.

MOSAWE, H.A.; THOM, N.; AIREY, G. Effect of aggregate gradation on the stiffness of asphalt mixtures. **The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology**, 16, v.2, 39-49, 2015.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético.** 229 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MOTTER, J. S.; MIRANDA, L. F. R.; BERNUCCI, L. L. B. Performance of Hot Mix Asphalt Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 27(11): 04015030, 2015.

NABIZADEH, H.; HAGSHENAS, H. F.; KIM, Y.; ARAGÃO, F. T. S. Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM). **Construction and Building Materials**, 152, 65-73, 2017.

NAPA - National Asphalt Pavement Association. **High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice - Lessons Learned.** Technical Report. Information Series 139, 62 p., 2015.

NAPA - National Asphalt Pavement Association. **Best Practices for RAP and RAS Management**. Technical Report. Quality Improvement Series 129, 44 p., 2015.

OLARD, F. **Low energy asphalts**. Routes roads, n. 336-337, p. 131-145, 2008. Apresentado em 23 World Road Congress: General Report and Conclusions: PIARC Prizes, 23, Paris, 2008.

OLIVEIRA, J. A. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MORNAS EM LABORATÓRIO E EM CAMPO**. 142 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

OSMARI, P. H. **Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores**. 133 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PASANDÍN, A. R.; PÉREZ, I. Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, 74, 151–161, 2015.

PASANDÍN, A. R.; PÉREZ, I. Fatigue performance of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates and waste tire rubber. **Construction and Building Materials**, 157, 26-33, 2017.

PASANDÍN, A. R.; PÉREZ, I.; OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D. Influence of ageing on the properties of bitumen from asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, 101, 165-173, 2015.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese (Doutorado) – Universidade federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 1991.

PRADYUMNA, T. A.; MITTAL, A.; JAIN, P. K. Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. **Social and Behavioral Sciences**, 104, 1149 – 1157, 2013.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G.C. **Warm-mix asphalt: Best Practices**. Quality Improvement Series, 125. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2007.

RADEVIĆ, A.; ĐUREKOVIĆ, A.; ZAKIĆ, D.; MLADENOVIĆ, G. Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, 136, 386-393, 2017.

SHEN, D.; DU, J. Application of Gray Relational Analysis to Evaluate HMA with Reclaimed Building Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17 (4), 400–406, 2005.

SHU, X.; HUANG, B.; SHRUM, E. D.; JIA, X. Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP. **Construction and Building Materials**, 35, 125–130, 2012.



SILVA, S. C.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. S. **O efeito da seleção granulométrica na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas**. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes – Ouro Preto – novembro, 2015.

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

TOJO, N.; FISCHER, C. **Europe as a Recycling Society-European Recycling Policies in Relation to the Actual Recycling Achieved**. 2011.

TRAN, B. **Maximizing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) content in Hot Mix Asphalt (HMA)**. 211 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Faculty of Engineering and Industrial Science, Swinburne University of Technology, Australia, 2014.

YANG, R.; KANG, S.; OZER, H.; AL-QADI, I. L. Environmental and economic analyses of recycled asphalt concrete mixtures based on material production and potential performance. **Resources, Conservation and Recycling**, 104, 141–151, 2015.

YU, H. **Design and Characterization of asphalt mixtures based on particle packing and mechanical modeling**. 425 p. Dissertation (Doctor of Philosophy) – Department of Civil and Environmental Engineering, - Washington State University, August, 2012.

VALDÉS, G., PÉREZ-JIMÉNEZ, M.; MARTÍNEZ, A.; BOTELLA, A. R. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, 25, 1289–1297, 2011.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design. **Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044**, Washington, D. C., EUA, October 2002.

XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S. N.; SHEN, J.; PUTMAN, B. Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures. **Construction and Building Materials**, 23, 1028–1034, 2009.

XIAO, F.; HOU, X.; AMIRKHANIAN, S. N.; KIM, K. W. Superpave evaluation of higher RAP contents using WMA technologies. **Construction and Building Materials**, 112, 1080–1087, 2016.

WONG, Y.D.; SUN, D. D.; LAI, D. Value-added utilization of recycled concrete in hot-mix asphalt, **Waste Manage**, 27 (2), 294–301, 2007.

WU, S.; ZHONG, J.; ZHU, J.; WANG, D. Influence of demolition waste used as recycled aggregate on performance of asphalt mixture. **Road Materials and Pavement Design**, 14 (3) 679–688, 2013.

WU, S.; MUHUNTHAN, B.; WEN, H. Investigation of effectiveness of reduction of fatigue life for hot mix asphalt blended with recycled concrete aggregate using monotonic fracture testing. **Construction and Building Materials**, 131, 50-56, 2017.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. 100% hot mix asphalt recycling: challenges and benefits. **Transportation Research Procedia**, 14, p. 3493-3502, 2016.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. 100% hot mix asphalt recycling: A review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, 92, p. 230-245, 2014.

ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; WOODS, M. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, 44, 92-100, 2013.

ZHU, J.; WU, S.; ZHONG, J.; WANG, D. Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings, **Construction and Building Materials**, 29, 466–475, 2012.

ZULKATI, A.; WONG, Y. D.; SUN, D. D. Mechanistic performance of asphalt-concrete mixture incorporating coarse recycled concrete aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 25 (9), 1299–1305, 2013.

## APÊNDICE A

O roteiro abaixo apresenta um exemplo de seleção granulométrica de uma mistura nova que possui dois tipos de agregado graúdo (brita e pedrisco) e um tipo de agregado miúdo (pó de pedra).

### **Passo 1**

Determinar a massa unitária escolhida para cada agregado de acordo com a massa unitária solta para cada agregado graúdo. A massa unitária escolhida dos agregados miúdos é simplesmente a massa unitária compactada dos mesmos.

#### Cálculo

Multiplicar a massa unitária solta do agregado graúdo pela massa específica escolhida para a mistura.

#### Equação

Massa unitária escolhida do agregado graúdo = massa unitária solta \* massa unitária escolhida

Brita: peso unitário escolhido =  $1320,69 \text{ kg/m}^3 * 105\% = 1386,72 \text{ kg/m}^3$

Pedrisco: peso unitário escolhido =  $1296,42 \text{ kg/m}^3 * 105\% = 1361,24 \text{ kg/m}^3$

### **Passo 2**

Determinar a massa específica de contribuição de cada agregado graúdo na mistura, de acordo com a proporção desejada.

#### Cálculo

Multiplicar o percentual de agregado graúdo na mistura pela massa unitária escolhida de cada agregado, determinado no Passo 1.

Brita:  $69\% * 1386,72 \text{ kg/m}^3 = 956,84 \text{ kg/m}^3$

Pedrisco:  $31\% * 1361,24 \text{ kg/m}^3 = 421,98 \text{ kg/m}^3$

### **Passo 3**

Determinar os vazios em cada agregado graúdo de acordo com a massa unitária escolhida e contribuição em volume correspondente. Em seguida, somar os vazios de cada agregado graúdo.

#### Cálculo

Primeiro, calcular um menos a divisão entre massa unitária escolhida e a multiplicação da massa específica do agregado pela massa específica da água. Posteriormente, multiplicar o resultado pela porcentagem de agregado graúdo da mistura. Em seguida, somar a contribuição de cada agregado graúdo.

Vazios no agregado graúdo =

$$\left(1 - \frac{\text{massa específica escolhida}}{\text{massa específica do agregado} * 1000}\right) * \% \text{ AG da mistura}$$

$$\text{Brita: } \left(1 - \frac{1320,69}{2,568 * 1000}\right) * 69 = 33,51\%$$

$$\text{Pedrisco: } \left(1 - \frac{1296,42}{2,658 * 1000}\right) * 31 = 15,88\%$$

$$\text{Total} = \text{brita} + \text{pedrisco} = 49,39\%$$

#### **Passo 4**

Determinar a massa específica de cada agregado miúdo de acordo com o volume desejado de agregado miúdo na mistura. Essa é a massa específica que preenche os vazios no agregado graúdo.

#### **Cálculo**

Multiplicar a massa unitária escolhida do agregado miúdo pela percentagem em volume do mesmo na mistura de agregado fino. Em seguida, multiplicar o valor obtido pela percentagem total de vazios no agregado graúdo (Passo 3).

#### **Equação**

Contribuição de cada agregado miúdo = massa unitária escolhida do agregado miúdo \* % agregado miúdo na mistura \* % de vazios no agregado graúdo.

$$\text{Pó de pedra: contribuição} = 2069,74 \text{ kg/m}^3 * 100\% * 49,39\% = 1022,24 \text{ kg/m}^3$$

#### **Passo 5**

Determinar a massa específica para a mistura total dos agregados

#### **Cálculo**

Somar a massa específica de cada agregado

#### **Equação**

Massa específica da mistura = passo 2 + passo 4

$$\text{Massa específica da mistura} = 956,84 + 421,98 + 1022,24 = 2401,06 \text{ kg/m}^3$$

#### **Passo 6**

Determinar a percentagem inicial de cada agregado da mistura em peso.

#### **Cálculo**

Dividir a massa específica de cada agregado pela massa específica da mistura total.

#### **Equação**

Porcentagem em peso = massa específica contribuinte do agregado / massa específica da mistura

$$\text{Brita: } 956,84 / 2401,06 = 39,85\%$$

Pedrisco:  $421,98/2401,06 = 17,57\%$

Pó de pedra:  $1022,24/2401,06 = 42,57\%$

### **Passo 7**

Em uma mistura com TMN de 19mm, a divisão entre o agregado graúdo e o miúdo é feita por meio da PCP, que neste caso é a peneira 4,75mm.

#### **Cálculo**

Determinar a porcentagem passante na peneira 4,75mm para a fração de agregado graúdo e a porcentagem retida para a fração de agregado miúdo.

Brita: % de agregado miúdo = 0,61%

Pedrisco: % de agregado miúdo = 19,47%

Pó de pedra: % de agregado graúdo = 0,64%

### **Passo 8**

Determinar a porcentagem de agregado miúdo em cada fração de agregado graúdo, de acordo com a sua porcentagem na mistura.

#### **Cálculo**

Para cada fração de agregado graúdo, determinar a porcentagem passante na peneira 4,75mm como uma porcentagem da mistura total de agregados

#### **Equação**

% de miúdo = % de graúdo na mistura \* % de miúdo na fração de agregado graúdo

Brita:  $39,85\% * 0,61\% = 0,24\%$

Pedrisco:  $17,57\% * 19,47\% = 3,42\%$

### **Passo 9**

Somar a porcentagem de partículas de agregado miúdo em toda a porção de agregado graúdo

% total AF no AG =  $0,24\% + 3,42\% = 3,66\%$

### **Passo 10**

Determinar a quantidade de agregado graúdo em cada porção de agregado miúdo, de acordo com sua porcentagem na mistura.

#### **Cálculo**

Para cada porção de agregado miúdo, determinar a porcentagem retida na peneira 4,75mm como uma porcentagem total da mistura

#### **Equação**

% de agregado graúdo na fração miúda = % de miúdo \* % de graúdo na fração miúda

Pó de pedra:  $42,57\% * 0,64\% = 0,27\%$

**Passo 11**

Somar a porcentagem de partículas de agregado graúdo em toda a fração de agregado miúdo

Total AG no AF = % total de AG na mistura de AF = 0,27%

**Passo 12**

Fazer a correção das porcentagens iniciais de material graúdo na mistura, de acordo com a contribuição do miúdo, através das frações de agregados graúdos e a contribuição de graúdos através das frações de agregados miúdos.

**Equação**

$$\text{Ajuste \% na mistura} = (\%inicial) + (AFnoAG) - \frac{\%inicial*somadeAGnoAF}{\%totaldeAG}$$

$$\text{Brita: } (39,85) + (0,24) - \frac{39,85*0,27}{57,43} = 39,90\%$$

$$\text{Pedrisco: } (17,57) + (3,42) - \frac{17,57*0,27}{57,43} = 20,91\%$$

**Passo 13**

Corrigir a porcentagem inicial da mistura de cada agregado miúdo para considerar a quantidade de agregado graúdo que ela contém e o agregado miúdo proveniente de cada fração de agregado graúdo.

**Equação**

$$\text{Ajuste \% na mistura} = (\%inicial) + (AGnoAF) - \frac{\%inicial*somadeAFnoAG}{\%totaldeAF}$$

$$\text{Pó de pedra: } (42,57) + (0,27) - \frac{42,57*3,66}{42,57} = 39,18\%$$

Caso a mistura contemple a incorporação de filler, o método estabelece mais três passos contemplando a verificação do mesmo.

## APÊNDICE B

Resultados individuais corpos de prova ensaiados – dano por umidade induzida  
(DUI)

Mistura	RT grupo não condicionado (MPa)	Vv grupo não condicionado (%)	RT grupo condicionado (MPa)	Vv grupo condicionado (%)	Razão de RT retida (RRT)
GM_ARC	0,487	6,3	0,401	6,2	0,77
	0,439	6,7	0,359	6,6	
	0,438	6,1	0,296	6,1	
REF	0,805	7,3	0,584	7,5	0,77
	0,751	7,5	0,556	7,5	
	0,716	8,0	0,610	7,4	
GARC_MRAP	1,620	6,5	1,346	7,9	0,88
	1,571	6,8	1,466	6,8	
	1,598	6,8	1,421	6,5	
GRAP_MARC	0,992	7,4	0,869	7,1	0,89
	1,009	7,8	0,899	7,9	
	0,948	7,5	0,842	7,8	
GM_RAP	0,847	6,4	0,707	6,1	0,82
	0,855	6,6	0,702	6,5	
	0,807	6,9	0,660	6,7	

## APÊNDICE C

Resultados individuais corpos de prova ensaiados - módulo de resiliência (MR)

<b>GRAP_MARC</b>				
<b>CP</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>MR (MPa)</b>
O	6,4	10,0	3,8	4166
N	6,5	10,0	4,4	3876
P	6,6	10,0	4,3	4359
K	6,5	10,0	4,5	3669
L	6,9	10,0	4,5	3799
I	6,5	10,0	4,0	4554
E	6,6	10,0	4,4	3697
G	6,7	10,0	3,8	3960
H	6,8	10,0	3,8	4215
F	6,8	10,0	4,2	3712
J	6,6	10,0	4,3	3409
D	6,9	10,0	4,1	3743

<b>GARC_MRAP</b>				
<b>CP</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>MR (MPa)</b>
N	6,5	10,0	4,6	6611
M	6,5	10,0	4,1	9572
F	6,6	10,0	3,0	7264
H	6,7	10,0	4,3	7308
S	6,6	10,0	4,8	7289
U	6,5	10,0	4,2	8340
W	6,6	10,0	4,6	7322
K	6,5	10,0	4,7	7545
D	6,8	10,0	4,5	8096
Q	6,5	10,0	4,9	7517
O	6,4	10,0	4,7	7025
J	6,3	10,0	3,9	7664



<b>GM_RAP</b>				
<b>CP</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>MR (MPa)</b>
M	6,3	10,0	3,9	2712
O	6,3	10,0	3,9	3557
K	6,5	10,0	4,5	2982
G	6,2	10,0	3,6	2808
N	6,2	10,0	3,6	3133
H	6,5	10,0	3,4	2693
F	6,2	10,0	4,2	2597
L	6,3	10,0	4,5	2947
D	6,2	10,0	3,5	3077
E	6,3	10,0	3,8	3043
C	6,3	10,0	4,0	2629
B	6,2	10,0	3,4	2720

<b>GM_ARC</b>				
<b>CP</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>MR (MPa)</b>
K	7,3	10,0	4,1	1852
Q	7,2	10,0	4,1	1380
P	7,2	10,0	3,8	1381
F	7,2	10,0	3,7	1701
J	7,2	10,0	3,9	1649
O	7,2	10,0	4,0	1571
S	7,2	10,0	4,1	1331
R	7,3	10,0	4,2	1180
N	7,3	10,0	4,3	1482
I	7,3	10,0	4,6	2127
G	7,3	10,0	4,5	1836
M	7,2	10,0	3,6	1499

<b>REF</b>				
<b>CP</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Vv (%)</b>	<b>MR (MPa)</b>
M	6,6	10,0	4,6	3989
N	6,6	10,0	4,8	4303
L	6,6	10,0	4,7	4032
O	6,6	10,0	4,2	3989
I	6,5	10,0	4,3	4255
J	6,6	10,0	4,8	3838
K	6,5	10,0	4,4	4139
H	6,6	10,0	4,4	4450
F	6,5	10,0	4,0	4488
G	6,6	10,0	3,9	4400
D	6,6	10,0	4,0	4101
E	6,5	10,0	4,1	4144

## APÊNDICE D

### Resultados obtidos na análise mecanicista – Elsym 5

#### REF

Normal Strains					Shear Strains		
XP	YP	EXX	EYY	EZZ	EXY	EXZ	EYZ
.00	.00	.141E-03	.205E-03	-.190E-03	.000E+00	.147E-04	.000E+00
15.50	.00	-.603E-04	.188E-03	-.825E-04	.000E+00	.000E+00	.000E+00

Principal -- Strains					Shear Strains		
XP	YP	PE 1	PE 2	PE 3	PSE1	PSE2	PSE3
.00	.00	.205E-03	.141E-03	-.191E-03	.395E-03	.636E-04	.332E-03
15.50	.00	.188E-03	-.603E-04	-.825E-04	.270E-03	.248E-03	.221E-04

#### RESULTS MENU FOR ELSYM5

LAYER = 1      Z=7.99

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>

#### GM\_ARC

Normal Strains					Shear Strains		
XP	YP	EXX	EYY	EZZ	EXY	EXZ	EYZ
.00	.00	.193E-03	.256E-03	-.346E-03	.000E+00	.341E-04	.000E+00
15.50	.00	-.177E-04	.212E-03	-.896E-04	.000E+00	.000E+00	.000E+00

Principal -- Strains					Shear Strains		
XP	YP	PE 1	PE 2	PE 3	PSE1	PSE2	PSE3
.00	.00	.256E-03	.194E-03	-.346E-03	.602E-03	.628E-04	.540E-03
15.50	.00	.212E-03	-.896E-04	-.177E-03	.389E-03	.302E-03	.874E-04

#### RESULTS MENU FOR ELSYM5

LAYER = 1      Z=7.99

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>

**GM\_RAP**

Normal Strains					Shear Strains		
XP	YP	EXX	EYY	EZZ	EXY	EXZ	EYZ
.00	.00	.162E-03	.229E-03	-.236E-03	.000E+00	.206E-04	.000E+00
15.50	.00	-.986E-04	.203E-03	-.855E-04	.000E+00	.000E+00	.000E+00

Principal -- Strains					Shear Strains		
XP	YP	PE 1	PE 2	PE 3	PSE1	PSE2	PSE3
.00	.00	.229E-03	.162E-03	-.236E-03	.465E-03	.661E-04	.399E-03
15.50	.00	.203E-03	-.855E-04	-.986E-04	.301E-03	.288E-03	.131E-04

RESULTS MENU FOR ELSYM5

LAYER = 1      Z=7.99

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==&gt;

**GARC\_MRAP**

Normal Strains					Shear Strains		
XP	YP	EXX	EYY	EZZ	EXY	EXZ	EYZ
.00	.00	.108E-03	.162E-03	-.134E-03	.000E+00	.778E-05	.000E+00
15.50	.00	-.146E-04	.155E-03	-.741E-04	.000E+00	.000E+00	.000E+00

Principal -- Strains					Shear Strains		
XP	YP	PE 1	PE 2	PE 3	PSE1	PSE2	PSE3
.00	.00	.162E-03	.108E-03	-.134E-03	.296E-03	.541E-04	.242E-03
15.50	.00	.155E-03	-.146E-04	-.741E-04	.229E-03	.170E-03	.595E-04

RESULTS MENU FOR ELSYM5

LAYER = 1      Z=7.99

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==&gt;

**GRAP\_MARC**

Normal Strains					Shear Strains		
XP	YP	EXX	EYY	EZZ	EXY	EXZ	EYZ
.00	.00	.145E-03	.209E-03	-.197E-03	.000E+00	.156E-04	.000E+00
15.50	.00	-.662E-04	.191E-03	-.831E-04	.000E+00	.000E+00	.000E+00

Principal -- Strains					Shear Strains		
XP	YP	PE 1	PE 2	PE 3	PSE1	PSE2	PSE3
.00	.00	.209E-03	.145E-03	-.198E-03	.407E-03	.642E-04	.342E-03
15.50	.00	.191E-03	-.662E-04	-.831E-04	.274E-03	.257E-03	.168E-04

RESULTS MENU FOR ELSYM5

LAYER = 1      Z=7.99

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==&gt;