KARINA YURIKO SUZUKI

Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado

São Paulo

2019

KARINA YURIKO SUZUKI

Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Transportes

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Kamilla Vasconcelos

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Suzuki, Karina Yuriko

Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado / K. Y. Suzuki -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
153 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Pavimentação 2.Pavimentação Asfáltica 3.Reciclagem a Quente
4.Material Asfáltico Fresado 5.Sustentabilidade I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

*Aos meus pais,
Carlos e Mineko, pelo amor, exemplo e inspiração dados a mim.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar registrado o meu sincero e eterno agradecimento a todos aqueles que de alguma forma participaram e contribuíram, direta ou indiretamente, para a concretização desta pesquisa.

Primeiramente, agradeço à minha querida orientadora, Prof^a. Dr^a. Kamilla Vasconcelos, a qual topou ser a minha “mãe acadêmica” no meio tempo do jogo. Muito obrigada pelo seu acolhimento, diretriz, paciência, incentivo e ensinamentos. Ao longo desse tempo, passei a admirá-la não apenas como uma excelente profissional, mas também como um verdadeiro exemplo de ser humano, pela forma que conduz todos os papéis que exerce em sua vida.

Ao Prof. Dr. José Tadeu Balbo, por ter aberto as portas para o meu ingresso ao programa de mestrado, e pela compreensão da mudança de rumo que tomou a minha pesquisa, pois este seria o melhor caminho para mim. Muito obrigada.

À Prof^a. Dr^a. Liedi Bernucci, por todo o conhecimento transmitido durante as aulas, pelas ideias e sugestões nas reuniões, ora na CCR Engellog, ora no LTP, e à qual possuo grande admiração e respeito.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes (PTR) da POLI-USP, e aos colegas da pós-graduação, em especial ao Bruno Ono, que me proporcionou muitas risadas ao longo do curso e ao qual tenho muito carinho.

Aos membros da minha banca, Prof. Dr. Luciano Specht e Prof. Ph.D. Lélío Brito, pelas contribuições e sugestões que me foram dadas.

À CCR Engellog, em especial ao Wilson Geraldo França, que me possibilitou realizar esta pesquisa, e o qual sempre me apoiou a seguir um caminho rumo à sustentabilidade. Agradeço também o departamento de Desenvolvimento Tecnológico, às equipes de Qualidade, Projetos e Monitoração. Ao Paulo Ricardo, Luiz Roberto, David e Maria Tereza. Aos meus “amigos de Jundiaí”, Wilson Unger, Geison, Raphael, Marcos, Natalândia, Damires e também à Sandra e Margareth. Um agradecimento especial ao amigo Augusto Guaraldo, que desde o começo desse estudo acreditou que tudo iria dar certo. Muito obrigada pela sua pró-atividade em me ajudar com todos os dados necessários, pelo seu incentivo e pelas conversas durante

as nossas idas e vindas ao CPR. Sou extremamente grata por ter feito parte deste time.

À CCR Nova Dutra, em especial ao amigo e Prof. Dr. Luis Miguel Gutierrez Klinsky, que me apoiou e deu suporte em todos os ensaios laboratoriais, desde o início até o final dessa pesquisa, e o qual sempre esteve disposto a contribuir e sanar minhas dúvidas. Sem você, nada disso teria sido possível. Muito obrigada! À amiga, Coord. Eng^a. Valéria Faria, a qual possuo grande admiração e pude conhecer a pessoa divertida que é. A todos os laboratoristas do Centro de Pesquisa Rodoviária, sobretudo ao Cleto, que teve enorme contribuição com a realização dos ensaios.

À CCR AutoBAN, ao Vinícius que auxiliou com a programação e logística para a execução dos trechos experimentais e ao Carlão, pelo auxílio em todos os ensaios de laboratório.

À Cargill, pelo fornecimento do agente rejuvenescedor para os ensaios laboratoriais e para a construção dos trechos experimentais. Em especial à Márcia Mello, por toda a sua parceria durante as madrugadas nas obras. Sua garra e persistência foi fundamental para os testes com o produto. Agradeço também ao Valdir, Marcelo e Ph.D. Hassan Tabatabaee.

À Usicity, em especial ao Walter Faria, que deu todo o apoio e suporte para os testes e a usinagem das misturas recicladas. Ao Mariano e à toda equipe que contribuiu diretamente com este estudo. Muito obrigada!

À Imperpav, em nome do Fernando, pela realização dos ensaios laboratoriais no material reciclado.

À Fremix, por toda a assistência que me foi dada antes, durante e após a execução dos trechos experimentais. Ao Sr. Nelson, Valmir, Mauro, Felipe e Geisson.

À Copavel, em nome do Renato e do Frederico, pelo suporte para o levantamento deflectométrico e controle tecnológico das obras.

À Sanson, que no início deste estudo sempre se mostrou disposta a contribuir com o que estivesse ao seu alcance.

À minha família, em especial à minha amada mãe, Mineko. Sou muito abençoada por ser sua filha. Obrigada pela sua força e seu amor incondicional. Obrigada às minhas irmãs, Erika e Juliana, e também à minha sobrinha Ayla. Amo vocês!

Por fim, ao meu pai e, ao mesmo tempo, Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki. É difícil transmitir com palavras toda a gratidão e amor que sinto por você. Obrigada pela ajuda, explicações, sugestões, artigos e livros. Muito obrigada, acima de tudo, por me ensinar as lições dessa vida, e me mostrar que nada é conquistado sem suor e esforço.

“The road to success is always under construction.”

(Lily Tomlin)

RESUMO

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

Esta dissertação contempla um estudo da avaliação do efeito de diferentes teores de material fresado, conhecido como RAP (do inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement*), na dosagem e no comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente, para aplicação em camadas de revestimento de pavimento. Em uma primeira etapa, foram avaliadas, em laboratório, misturas com a incorporação de 0, 10, 20, 25, 35, 50 e 65% de material fresado, sem adição de agente rejuvenescedor (AR). Na segunda etapa, foi avaliado o comportamento das misturas com 25 e 50% de RAP, após adição de um AR de base vegetal. As misturas foram dosadas de acordo com o método Marshall e, em seguida, foram realizados os seguintes ensaios: resistência à tração por compressão diametral (RT), dano por umidade induzida (DUI), módulo de resiliência (MR), módulo dinâmico (MD), uniaxial de carga repetida para determinação do *flow number* e fadiga na flexão de quatro pontos. Embora o teor de ligante virgem adicionado tenha sido maior que o calculado (assumindo-se que todo o ligante asfáltico remanescente no RAP seria ativado e estaria disponível para se misturar com o ligante novo), foi possível obter uma significativa redução no consumo de ligante virgem. Em relação à RT e ao DUI, todas as misturas atenderam aos parâmetros estabelecidos nas especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e do Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo (DER/SP). Observou-se um aumento dos módulos de resiliência (a 25°C) para as misturas com altos teores de RAP, assim como um aumento dos módulos dinâmicos nas zonas de baixas frequências (ou elevadas temperaturas), indicando boa resistência à deformação permanente, o que foi corroborado pelos resultados de *flow number*. Além disso, verificou-se que, com relação à vida de fadiga, é possível produzir misturas com altos teores de RAP com propriedades similares a uma mistura convencional, ou até melhor, uma vez adicionado o agente rejuvenescedor. Adicionalmente, foram construídos três trechos experimentais, com 25% (sem AR), 25% (com AR) e 35% (com AR) de RAP na camada final de rolamento da Rodovia

dos Bandeirantes (SP-348). Até o momento de conclusão desta pesquisa, observou-se um bom desempenho das misturas recicladas aplicadas. Por fim, o estudo mostrou que, não apenas o teor, mas sobretudo as características do material reciclado (tipo e propriedade do ligante envelhecido; granulometria e massas específicas do RAP), influenciam diretamente na dosagem e no comportamento mecânico das misturas. O uso de RAP com diferentes teores, de forma tecnicamente consciente, em camadas de revestimentos de pavimento é promissor em um futuro que busca cada vez mais a sustentabilidade das construções.

Palavras-chave: Pavimentação. Pavimentação Asfáltica. Reciclagem a Quente. Material Asfáltico Fresado. Sustentabilidade.

ABSTRACT

SUZUKI, K. Y. **Evaluation of hot recycled asphalt mixtures with different RAP contents.** Master Dissertation. Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, 2019.

The aim of this study is to evaluate the effect of different RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) contents on the design and mechanical behavior of hot recycled asphalt mixtures for application in wearing courses of pavements. In a first step, mixes with the incorporation of 0, 10, 20, 25, 35, 50 and 65% of RAP were evaluated in the laboratory without the addition of rejuvenating agent (RA). In the second step, the behavior of the mixtures with 25 and 50% of RAP was evaluated after the addition of an engineered bio-based rejuvenator. The mixtures were designed according to the Marshall method and then, the tests of indirect tensile strength (ITS), moisture susceptibility, resilient modulus, dynamic modulus, repeated uniaxial test to determine the flow number and four-point bending fatigue test were performed. Although the added virgin binder content was higher than that calculated (assuming that all the RAP binder would be active and available to blend with the neat binder), a significant reduction in the virgin binder consumption was achieved. Regarding the ITS and the moisture susceptibility results, all mixes met the requirements set by the National Department of Transportation Infrastructure (DNIT) and São Paulo DOT (DER/SP). An increase of the resilient modulus (at 25°C) was observed for high RAP mixes, as well as an increase of the dynamic modulus in low frequencies (or high temperatures) zones, indicating a good resistance to permanent deformation that was further confirmed by the flow number results. In addition, it has been found that, regarding the fatigue life, it is possible to produce high RAP mixes with similar or even better properties than a conventional mix, once the rejuvenating agent is added. Additionally, three trial sections were constructed, with 25% (without RA), 25% (with RA) and 35% (with RA) of RAP in the wearing course layer of the Bandeirantes Highway (SP-348). Until the end of this research, a good performance of the applied recycled mixtures was observed. Finally, the study showed that not only the RAP content, but also the properties of the recycled material (type and properties of the aged binder, aggregate particle size and RAP specific densities) directly influence the design and the

mechanical behavior of the mixes. The use of different RAP contents in wearing courses, when technically sound, is a promising technique in the future that increasingly seeks for sustainable constructions.

Keywords: Pavement. Asphalt Paving. Hot Recycling. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Temperatura de aquecimento de mistura em tambor secador de contrafluxo convencional versus tambor de barril duplo	32
Figura 2 – Médias dos teores de RAP nas regiões do Japão	35
Figura 3 – Exemplos de cilindros de fresagem (a) Padrão – Espaçamento entre dentes: 15mm; (b) Fina – Espaçamento entre dentes: 8mm; (c) Microfresagem– Espaçamento entre dentes: 6 x 2 mm.....	39
Figura 4 – Curvas granulométricas de material fresado sem e com extração de ligante	40
Figura 5 – Fracionamento do RAP	42
Figura 6 – Adição de RAP (frio e com baixo teor de umidade) no misturador de uma usina gravimétrica	44
Figura 7 – Entrada de RAP (frio e com baixo teor de umidade) na parte inferior do elevador de uma usina gravimétrica.....	45
Figura 8 – Configuração de usina gravimétrica com secador externo para pré-aquecimento do RAP	46
Figura 9 – Exemplo de tambor para 100% de RAP	47
Figura 10 – Entrada de RAP via anel intermediário em um tambor misturador de fluxo paralelo	48
Figura 11 – Adição de RAP via anel em tambor misturador de contrafluxo	49
Figura 12 – Usina contínua com tambor duplo.....	50
Figura 13 – Usina contínua com tambor duplo e misturador externo	51
Figura 14 – Configuração da entrada de RAP em um misturador contínuo ao secador de contrafluxo.....	52
Figura 15 – Potenciais locais de adição de agente rejuvenescedor em usina gravimétrica.....	53
Figura 16 – Pulverização de agente rejuvenescedor em correia transportadora de RAP frio (a) Galão de agente rejuvenescedor; (b) Barra espargidora	55
Figura 17 – Exemplo de <i>blending chart</i>	57
Figura 18 – Etapas de laboratório	73
Figura 19 – Coleta de amostras de RAP. (a) Bota espera do km 131, pista Leste, SP-270; (b) Local de coleta das Amostras 1, 2 e 3; (c) Aspecto do material mais fino; (d) Aspecto do material mais graúdo; (e) Operação de escavação das pilhas; (f) Exemplo	

de horizonte da pilha da Amostra 1; (g) Homogeneização do material; (h) Amostras prontas para envio ao CPR	75
Figura 20 – Granulometria das amostras de RAP, antes e após extração de ligante (laboratório)	77
Figura 21 – Fracionamento do RAP. (a) material retido na peneira 3/8"; (b) material passante na peneira 3/8"	80
Figura 22 – Curvas granulométricas das misturas recicladas	81
Figura 23 – Teor de CAP virgem no projeto das misturas asfálticas recicladas	84
Figura 24 – Parâmetros de controle utilizados para a dosagem do agente rejuvenescedor: (a) PG a alta temperatura e (b) ponto de amolecimento	86
Figura 25 – Dosagem final do agente rejuvenescedor (laboratório)	87
Figura 26 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	88
Figura 27 – Resistência à tração das misturas com RAP, sem adição de agente rejuvenescedor ($V_v=4\%$)	88
Figura 28 – Resistência à tração das misturas com 25 e 50% RAP, antes e após adição de agente rejuvenescedor ($V_v=4\%$)	90
Figura 29 – Ilustração do ensaio de dano por umidade induzida: (a) aplicação de pressão para saturação dos vazios com água; (b) congelamento (-18°C); e (c) aquecimento em banho de água para descongelamento (60°C)	92
Figura 30 – Resistência à tração das misturas sem condicionamento em água ($V_v=7\%$)	93
Figura 31 – Resistência à tração das misturas com condicionamento em água ($V_v=7\%$)	93
Figura 32 – Resistência à tração das misturas sem condicionamento à água, após adição de AR ($V_v=7\%$)	94
Figura 33 – Resistência à tração das misturas com condicionamento à água, após adição de AR ($V_v=7\%$)	95
Figura 34 – Razão de resistência à tração das misturas recicladas	95
Figura 35 – Ensaio de módulo de resiliência	96
Figura 36 – Módulos de resiliência (a 25°C) das misturas recicladas, sem adição de AR	97
Figura 37 – Módulos de resiliência (a 25°C) das misturas recicladas, após adição de AR	99
Figura 38 – Realização dos ensaios de módulo dinâmico na UTM-25	100

Figura 39 – Curvas mestras das misturas com diferentes teores de RAP, sem agente rejuvenescedor.....	101
Figura 40 – Curvas mestras das misturas com 25% RAP antes e após a adição de agente rejuvenescedor.....	102
Figura 41 – Curvas mestras das misturas com 50% RAP antes e após a adição de agente rejuvenescedor.....	103
Figura 42 – <i>Flow number</i> das misturas sem adição de agente rejuvenescedor.....	105
Figura 43 – <i>Flow number</i> das misturas com 25 e 50% RAP após adição de agente rejuvenescedor.....	106
Figura 44 – Ensaio de fadiga em viga apoiada em quatro pontos (a) Dispositivo de carregamento; (b) Execução do ensaio.....	108
Figura 45 – Curvas de fadiga das misturas com 0 e 25% RAP (antes e após a adição de agente rejuvenescedor).....	109
Figura 46 – Curvas de fadiga das misturas com 0 e 50% RAP (antes e após adição de agente rejuvenescedor).....	111
Figura 47 – Rodovia dos Bandeirantes (SP-348).....	113
Figura 48 – Defeitos localizados na faixa 5, pista norte da Rodovia dos Bandeirantes (SP-348). (a) km 25+106; (b) km 25+145; (c) km 26+266; (d) km 26+325; (e) km 27+767; (f) km 27+858.....	115
Figura 49 – Retográfica de soluções do projeto de manutenção de pavimento	117
Figura 50 – Usina gravimétrica - Usicity. (a) Visão geral da usina; (b) Correia transportadora de material reciclado (lado esquerdo); (c) Entrada de RAP no misturador; (d) Adição do AR na linha do ligante asfáltico	120
Figura 51 – Granulometria das amostras de RAP antes e após extração de ligante (campo).....	122
Figura 52 – Dosagem do agente rejuvenescedor.....	124
Figura 53 – Processo de calibração da usina (a) Mistura com 35% RAP em temperatura morna; (b) Agregados não envolvidos pelo ligante asfáltico	126
Figura 54 – Fresagem do revestimento asfáltico.....	127
Figura 55 – Camadas de base dos pavimentos (a) Trecho 1 - elevado grau de trincamento; (b) Trecho 2 – trincas transversais; (c) Trecho 3	128
Figura 56 – KUAB (FWD – <i>Falling Weight Deflectometer</i>)	129
Figura 57 – (a) Imprimação betuminosa ligante; (b) Aplicação de geogrelha	129
Figura 58 – Espalhamento de massa asfáltica com vibroacabadora	130

Figura 59 – Compactação (a) rolo pneumático; (b) rolo tandem	130
Figura 60 – Trecho experimental 1 (25% RAP sem AR)	131
Figura 61 – Trecho experimental 2 (25% RAP com AR)	131
Figura 62 – Trecho experimental 3 (35% RAP com AR)	132
Figura 63 – Trecho referência (0% RAP)	132
Figura 64 – Bacias de deflexões (a) M25 – fundo da caixa; (b) M25 – após restauração; (c) M25 AR – fundo da caixa; (d) M25 AR – após restauração; (e) M35 AR – fundo da caixa; (f) M35 AR após restauração; (g) M0 – fundo da caixa; (h) M0 – após restauração	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de reabilitação de pavimentos asfálticos	28
Tabela 2 – Temperatura de usinagem necessária para aquecimento dos agregados do RAP	31
Tabela 3 – Utilização de RAP nos Estados Unidos (milhões de toneladas).....	33
Tabela 4 – Utilização de RAP na Europa	34
Tabela 5 – Especificação japonesa de qualidade do RAP	35
Tabela 6 – Estimativa de geração de material fresado em concessionárias de rodovias brasileiras	37
Tabela 7 – Tipos de agentes rejuvenescedores	63
Tabela 8 – Resistência à tração de misturas asfálticas com RAP	66
Tabela 9 – Módulo de resiliência de misturas asfálticas com RAP	68
Tabela 10 – Módulo dinâmico de misturas asfálticas com RAP	68
Tabela 11 – Resistência à deformação permanente de misturas asfálticas com RAP	68
Tabela 12 – Vida de fadiga de misturas asfálticas com RAP	70
Tabela 13 – Identificação das misturas asfálticas com diferentes teores de RAP	72
Tabela 14 – Massa específica máxima medida das amostras de RAP	76
Tabela 15 – Massa específica aparente do agregado do RAP	77
Tabela 16 – Caracterização dos agregados virgens	78
Tabela 17 – Caracterização do ligante asfáltico virgem	79
Tabela 18 – Caracterização da cal hidratada	79
Tabela 19 – Caracterização do agente rejuvenescedor	79
Tabela 20 – Parâmetros volumétricos das misturas recicladas	82
Tabela 21 – Parâmetros volumétricos das especificações de serviço para concreto asfáltico reciclado	82
Tabela 22 – Caracterização dos ligantes recuperados das misturas com 0, 25 e 65% de RAP, realizado pela Cargill	85
Tabela 23 – Especificações de serviço do concreto asfáltico convencional e reciclado para RT	90
Tabela 24 – Volume de vazios do ensaio de módulo dinâmico	103
Tabela 25 – Limites de <i>Flow Number</i>	106

Tabela 26 – Coeficientes de regressão e rigidez inicial das misturas com 0, 25 e 50% RAP.....	111
Tabela 27 – Parâmetros de desempenho dos pavimentos da SP-348, pista norte, faixa 5, nas campanhas de monitoramento em 2016 e 2017.	114
Tabela 28 – Localização dos trechos experimentais.....	118
Tabela 29 – Descrição técnica da usina.....	119
Tabela 30 – Ensaio de caracterização do RAP	121
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de caracterização do RAP	122
Tabela 32 – Caracterização dos agregados virgens	123
Tabela 33 – Caracterização do ligante asfáltico.....	123
Tabela 34 – Projeto das misturas recicladas dos trechos experimentais	124
Tabela 35 – Parâmetros volumétricos das misturas.....	125
Tabela 36 – Temperatura de usinagem dos materiais	126
Tabela 37 – Parâmetros de controle tecnológico da obra	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AR	Agente rejuvenecedor
ARRA	<i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de prova
CPR	Centro de Pesquisas Rodoviárias
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S/A
DMT	Massa específica máxima teórica da mistura asfáltica
DNC	Departamento Nacional de Combustíveis
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DUI	Dano por umidade induzida
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
Gmb	Massa específica aparente da mistura asfáltica compactada
Gmm	Massa específica máxima medida ou densidade específica Rice da mistura
Gsb	Massa específica aparente do agregado
Gse	Massa específica efetiva do agregado
HT PG	<i>High temperature performance grade</i>
Hz	Hertz
MR	Módulo de resiliência
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>

OPEP	Organização dos países exportadores de petróleo
PG	<i>Performance grade</i>
RAP	<i>Reclaimed asphalt pavement</i>
RBV	Relação betume-vazios
R&B	<i>Ring and ball</i>
RRT	Razão de resistência à tração
RT	Resistência à tração
SP	São Paulo
VAM	Volume de vazios nos agregados minerais
VCB	Vazios cheios com betume
V_v	Volume de vazios
WMA	<i>Warm mix asphalt</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS	24
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	26
2.2 RECICLAGEM A QUENTE E MORNA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	29
2.2.1 Práticas no exterior	33
2.2.2 Cenário brasileiro	36
2.2.3 Melhores práticas para a gestão do RAP	38
2.2.3.1 Operação de fresagem	38
2.2.3.3 Beneficiamento/Peneiramento	41
2.2.4 Adaptações de usinas	42
2.2.4.1 Usinas gravimétricas	43
2.2.4.2 Usinas contínuas	47
2.2.4.3 Adição de agente de reciclagem ao processo de usinagem	52
2.3 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE	55
2.3.1 Caracterização do RAP	58
2.3.1.1 Teor de ligante residual do RAP	59
2.3.1.2 Massa específica do agregado do RAP	60
2.3.2 O papel do agente de reciclagem (AR)	61
2.3.3 Ativação e interação do ligante do RAP	65
2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO E DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE OU MORNA	65
2.4.1 Resistência à tração	66
2.4.2 Rigidez	66
2.4.3 Deformação permanente	68

2.4.4 Fadiga	69
3. ANÁLISE LABORATORIAL	72
3.1 COLETA DE AMOSTRAS DE RAP	73
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	76
3.2.1 RAP	76
3.2.2 Materiais virgens	78
3.2.3 Agente rejuvenescedor	79
3.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	80
3.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE	87
3.4.1 Resistência à tração por compressão diametral (RT)	87
3.4.2 Dano por umidade induzida (DUI)	91
3.4.3 Módulo de resiliência (MR)	96
3.4.4 Módulo dinâmico (MD)	99
3.4.5 Flow number (FN)	104
3.4.6 Vida de fadiga	107
4 CAMPO	113
4.1 CONDIÇÃO INICIAL DO PAVIMENTO	114
4.2 PROJETO DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO	116
4.3 USINA	119
4.4 CONSTRUÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS	120
4.4.1 Caracterização dos materiais	121
4.4.2 Dosagem das misturas recicladas	123
4.4.3 Calibração da usina	125
4.4.4 Sequência executiva da aplicação	126
4.4.4.1 Fresagem do revestimento asfáltico	127
4.4.4.2 Deflexões	128

4.4.4.3 Geogrelha.....	129
4.4.4.4 Recomposição do revestimento asfáltico	130
4.4.5 Controle tecnológico	132
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

1 INTRODUÇÃO

A estrutura de um pavimento é concebida com o objetivo de resistir e distribuir os esforços verticais e horizontais oriundos do tráfego, ao clima e propiciar aos usuários uma superfície de rolamento com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2007). Além desses pré-requisitos, com a crescente preocupação com as questões ambientais, a estrutura de um pavimento deve ainda ser durável e sustentável.

O ciclo de vida de um pavimento consiste desde a fase de produção de materiais, projeto, construção, operação, restauração/manutenção, até a disposição final de resíduos ao final da sua vida útil. Assim, com a reciclagem de pavimentos, é possível criar um ciclo de reutilização de materiais e otimizar o uso dos recursos naturais (Copeland, 2011).

Apesar da reciclagem de pavimentos existir há quase 100 anos, a prática não havia se tornado comum até o final da década de 1970, após os preços do ligante asfáltico subirem rapidamente com o embargo do fornecimento de petróleo pelos países árabes membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Dessa forma, as agências de transportes e a indústria da pavimentação trabalharam juntas para desenvolver métodos de reciclagem que acabaram se tornando parte da rotina das operações de construção e reabilitação de pavimentos (West *et al.*, 2013).

Novamente, após a elevação do preço do petróleo em 2008, diversos países voltaram a concentrar esforços para aprimorar as técnicas de reciclagem. Nos últimos anos, o material retirado do pavimento asfáltico, denominado em inglês de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), tornou-se não apenas o material mais reciclado nos Estados Unidos, mas, sobretudo, a uma taxa de 99% (Copeland, 2011; NAPA, 2018).

Os países europeus também apresentam uma taxa de reciclagem bastante elevada. Levantamentos de 2015 realizados pela *European Asphalt Pavement Association* (EAPA) apontam que, dentre as 11 milhões de toneladas de RAP geradas na Alemanha, 90% são reutilizadas para produção de misturas asfálticas usinadas a quente. A Holanda, por sua vez, recicla 70% para o mesmo fim e a França 68% (EAPA, 2015).

Embora a demanda e o uso do RAP tenham aumentado durante as últimas décadas, a porcentagem de RAP nos projetos de misturas asfálticas raramente tem

ultrapassado os 20 ou 25%. Uma razão para isso é a preocupação de que o RAP contém ligante asfáltico envelhecido e sua incorporação em altos teores poderia produzir misturas mais rígidas que as sem RAP. Consequentemente, tais misturas poderiam apresentar menor trabalhabilidade e ter o seu desempenho em campo comprometido (Al-Qadi *et al.*, 2012).

Além disso, alguns fatores durante a produção da mistura, como a origem do RAP; o ligante virgem adicionado; o tipo de usina; bem como a temperatura de usinagem; podem afetar o grau de interação entre os ligantes (velho e novo) e, consequentemente, afetar as propriedades da mistura reciclada final (Sabouri *et al.*, 2015; Gaspar, 2019).

Apesar desses receios, os departamentos de transportes dos Estados Unidos (sigla em inglês, DOTs) estão sendo forçados a aumentar a quantidade de RAP em até 50% em pavimentos flexíveis, devido às considerações econômicas, aliadas às preocupações ambientais (Nozouri *et al.*, 2014).

Embora a técnica de reciclagem a quente já seja bastante difundida em países mais desenvolvidos, ainda é pouca aplicada no Brasil. Em vista da extensão territorial do nosso país, e o fato de o modo rodoviário concentrar a maior parte da matriz do transporte de cargas e pessoas, altos investimentos são necessários para a implantação e manutenção dos pavimentos rodoviários. Desta forma, a reciclagem a quente, uma vez escolhida como alternativa de restauração dos pavimentos asfálticos, pode gerar consideráveis benefícios econômicos, ambientais e sociais.

Dentre os benefícios ambientais do uso do RAP, contemplam-se a redução da exploração de novos recursos naturais (principalmente, os não renováveis, como o asfalto); das emissões de gases do efeito estufa; e da disposição de resíduos em aterros sanitários. Do ponto de vista econômico, é possível reduzir os custos de aquisição de novos insumos (ligante asfáltico virgem, agregados); de transporte de materiais e *royalties*. Assim, o uso do RAP não é só uma alternativa benéfica para o meio ambiente, mas também pode assegurar a competitividade econômica na construção e manutenção de pavimentos flexíveis.

Com relação ao comportamento das misturas recicladas, não há um consenso se a incorporação do RAP irá desencadear um desempenho diferente de uma mistura convencional. Diversos pesquisadores têm apontado que o uso do RAP aumenta a

rigidez, enquanto outros apontam o contrário. Além disso, ao mesmo tempo que alguns autores revelaram uma melhora da resistência à fadiga de misturas com RAP, outros estudos reportaram trincamento precoce (Izaks *et al.*, 2015; Al-Rousan *et al.*, 2008; Zaumanis & Mallick, 2015). Portanto, a avaliação do comportamento mecânico de misturas com material reciclado é fundamental para a maximização dos benefícios da reciclagem a quente.

1.1 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo geral avaliar a técnica de reciclagem a quente em usina, desde a etapa de geração do material fresado, passando pela gestão do RAP, usinagem da mistura, e aplicação de misturas recicladas.

Como objetivos específicos têm-se:

- avaliar o efeito de diferentes teores de RAP na dosagem e no comportamento mecânico de misturas recicladas a quente;
- elucidar as adaptações necessárias em usinas de asfalto para a produção de misturas asfálticas recicladas;
- quantificar o efeito do uso de agente rejuvenescedor nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas;
- verificar a aplicação de RAP em trechos experimentais com diferentes percentuais de RAP e comparar o efeito do agente rejuvenescedor.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução ao assunto da reciclagem a quente de misturas asfálticas com RAP, a motivação para a realização deste trabalho e os objetivos geral e específicos.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica do tema, mostrando o estado da prática do uso de RAP nos Estados Unidos, nos países europeus e no Japão. São apresentados os cuidados que devem ser tomados na gestão do RAP e quais as

adaptações necessárias em usinas de asfalto para a produção de misturas recicladas. Ao final, apresentam-se os métodos de dosagem de misturas recicladas nos Estados Unidos e na Europa, bem como o papel do agente rejuvenescedor, e uma pesquisa sobre o comportamento mecânico de misturas recicladas.

Já o Capítulo 3 contempla o estudo laboratorial da pesquisa, descrevendo como foi feita a coleta e caracterização das amostras de material fresado, a dosagem das misturas, os ensaios mecânicos realizados com diferentes teores de RAP e agente rejuvenescedor, além da discussão dos resultados obtidos.

No Capítulo 4 é apresentada a descrição da construção de três trechos experimentais com aplicação de material reciclado na camada de revestimento de pavimento na Rodovia dos Bandeirantes (SP-348).

Por fim, no Capítulo 5 discorre-se sobre as considerações finais da pesquisa, destacando-se as principais conclusões obtidas durante a realização do estudo até o momento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Ao longo do tempo, com a ação do tráfego e do clima, a estrutura de um pavimento perde sua capacidade estrutural e/ou funcional e tem que ser reabilitada. A *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 1992) define diferentes métodos de reabilitação e recuperação:

A) *Cold Planning* - Fresagem com/sem recomposição;

Consiste na remoção, controlada automaticamente, do revestimento asfáltico a uma desejada profundidade, com a restauração da superfície a uma determinada cota e inclinação, livre de afundamentos ou outras imperfeições. Pode ser utilizada para regularização ou texturização do pavimento para eliminar o escorregamento e recuperar a resistência à derrapagem. A fresagem do revestimento do pavimento é realizada por um tambor rotativo que transfere o RAP para os caminhões que irão retirar o material do local. O pavimento resultante pode ser imediatamente liberado ao tráfego e posteriormente pode ser recapeado ou deixado como uma superfície de texturização.

B) *Hot recycling in asphalt plant* - Reciclagem a quente em usina;

Neste método, o RAP é combinado com agregados virgem e concreto asfáltico ou agente reciclador para produzir misturas asfálticas quentes. Tanto as usinas gravimétricas quanto volumétricas podem ser utilizadas para produzir misturas recicladas. O RAP é geralmente obtido através da fresagem de pavimento, ou também por operação de trituração.

C) *Hot in-place recycling* (HIR) - Reciclagem a quente no local;

Esse método é realizado no próprio local da obra, com o pavimento existente processado a uma profundidade de 2 a 4 centímetros. O pavimento asfáltico deteriorado é aquecido e amolecido de modo a permitir que seja escarificado ou misturado por um rotativo a quente, a uma determinada profundidade. Novos materiais e/ou agente reciclador ou outro aditivo são adicionados ao material.

D) Cold in-place recycling (CIR) - Reciclagem a frio no local;

A reciclagem a frio no local é uma técnica de reabilitação que reusa materiais de pavimentos existentes. Todo o trabalho é realizado enquanto o pavimento é reciclado e normalmente não é necessário o transporte de materiais, exceto o aditivo que for usado. Em alguns casos, podem ser adicionados agregados virgens ao material reciclado para melhorar as características do RAP. Geralmente utiliza-se emulsão de asfalto, mas também podem ser usados agentes rejuvenescedores.

E) Full depth reclamation (FDR) - Recuperação profunda do pavimento.

A recuperação profunda é um método de reciclagem onde toda a seção do pavimento asfáltico e uma quantidade pré-determinada de material subjacente são tratados com aditivos para produzir uma camada de base estabilizada. Em alguns casos, a quantidade de material no local não é suficiente para atingir a espessura desejada da camada de base tratada e são necessários novos materiais para aumentar a espessura.

Os cinco métodos apresentados acima podem ser utilizados combinados ou separadamente. Para a escolha da melhor alternativa, devem ser levados em consideração: as condições locais e os defeitos presentes no pavimento existente; a identificação das prováveis causas dos defeitos, baseadas em estudos laboratoriais e de campo; as informações do projeto original e o histórico da construção e intervenções de conservação; os custos (inicial e de manutenção); o histórico de desempenho; as restrições quanto à geometria da via; os fatores ambientais e o tráfego (*Asphalt Institute*, 1986; DNIT, 2006). A Tabela 1 apresenta a recomendação da ARRA (1992) para a escolha do método de reabilitação do pavimento asfáltico conforme os tipos de defeitos apresentados no pavimento existente.

Tabela 1 – Métodos de reabilitação de pavimentos asfálticos

Tipos de defeitos	Fresagem e recomposição	Reciclagem a quente em usina	Reciclagem a quente no local	Reciclagem a frio	Recuperação profunda
Defeitos superficiais					
Desagregação	X	X	X		
Exudação	X	X	X		
Escorregamento	X	X	X		
Deformação					
Corrugação/Ondulação	X	X	X		
Afundamento de trilha raso	X	X	X		
Afundamento de trilha profundo		X		X	X
Trincamento (associado ao carregamento)					
Jacaré		X		X	X
Longitudinal		X	X	X	X
Bordo		X		X	X
Derrapagem		X	X		
Trincamento (não associado ao carregamento)					
Bloco		X		X	X
Longitudinal		X	X		
Transversal (térmico)		X		X	X
Reflexão de trincas		X		X	X
Reparos de Manutenção					
Spray		X		X	X
Recapeamento		X		X	X
Buraco/Panela		X		X	X
Reparo profundo		X		X	X
Problemas de base/subbase					X
Irregularidade					
Generalizada	X	X	X		
Depressões locais	X	X	X		X
Pontos altos	X	X	X		X

Fonte: Adaptado de ARRA (1992).

Todas as diferentes técnicas de reciclagem oferecem algumas vantagens sobre as técnicas convencionais de reabilitação, e a escolha de um determinado método deve ser baseada principalmente no tipo de defeito apresentado pelo pavimento existente. Porém, como pode ser observado da Tabela 1, a reciclagem a quente em usina é a alternativa que contempla a maior flexibilidade de correção dos diversos tipos de

defeitos no pavimento. Por isso, o estudo desta técnica, bem como a avaliação de suas vantagens e desvantagens é fundamental para a obtenção do máximo de seus benefícios.

2.2 RECICLAGEM A QUENTE E MORNA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O *Asphalt Institute* (1986) define a reciclagem a quente de uma mistura asfáltica como sendo o processo em que o material recuperado de pavimento asfáltico (RAP) é combinado com um novo ligante, e/ou agente rejuvenescedor (AR) e/ou agregados virgens, conforme necessários, para a produção de misturas asfálticas que satisfaçam as especificações e normas do tipo de mistura produzida.

Dentre as vantagens da reciclagem a quente ou morna em usina, em relação aos outros tipos de reciclagem, destacam-se (Kandhal & Mallick, 1997):

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

Intuitivamente, quanto maior o teor de material reciclado na mistura, maior seriam os benefícios econômicos e ambientais. No entanto, a avaliação do comportamento e desempenho das misturas recicladas é fundamental para que seja possível produzir misturas com propriedades similares ou melhores que as convencionais. Além disso, existem diversos fatores que podem limitar o teor de RAP na mistura final, como as características do material fresado e o tipo de usina para a produção da mistura reciclada.

Em geral, uma mistura com alto teor de RAP é aquela que possui uma taxa superior a 25% (HAGHSHENAS *et al.*, 2016). Conforme aumenta-se a quantidade de material fresado na mistura, deve-se avaliar a necessidade de adição de agente rejuvenescedor (AR), a fim de restaurar as propriedades do ligante envelhecido. O AR

deve ser devidamente dosado e combinado tanto com o ligante novo quanto com o ligante presente no RAP.

Segundo a *National Asphalt Pavement Association* – NAPA (Young, 1996), durante o processo de usinagem, o RAP pode ser aquecido aplicando-se principalmente duas técnicas diferentes: transferência de calor por condução ou convecção.

A transferência de calor por condução ocorre quando dois objetos de diferentes temperaturas se tocam. Essa técnica geralmente é usada na maioria das usinas gravimétricas, e quando o RAP é introduzido em secadores de contrafluxo. Assim, os agregados virgens devem ser superaquecidos para transferir calor ao RAP.

Já a transferência de calor por convecção ocorre quando uma partícula sólida é exposta a uma corrente de gás quente. Os secadores tradicionais de fluxo paralelo usam esse método para secar o RAP.

A umidade do material fresado também deve ser levada em consideração, pois quanto maior for a umidade, maior deverá ser a temperatura de aquecimento dos agregados. As áreas destacadas na Tabela 2 apresentam as temperaturas necessárias dos agregados virgens, com base em diferentes níveis de umidade do RAP, e a temperatura final da mistura em uma usina do tipo gravimétrica. Os valores, destacados em amarelo, mostram as temperaturas excessivamente altas que são necessárias para altos teores de RAP e umidade, mas que na prática, dificilmente podem ser atingidas.

Tabela 2 – Temperatura de usinagem necessária para aquecimento dos agregados do RAP

Teor de RAP (%)	Teor de umidade do RAP (%)	Temperatura de descarga da mistura reciclada (°C)			
		104	116	127	138
10	0	121	138	152	163
	1	127	143	154	168
	2	132	146	157	171
	3	138	149	163	174
	4	141	152	166	177
	5	143	157	168	182
20	0	138	154	168	182
	1	146	160	177	191
	2	154	168	182	196
	3	163	177	191	204
	4	171	185	199	213
	5	179	193	207	221
30	0	157	174	191	207
	1	168	185	202	218
	2	182	199	216	232
	3	196	213	229	246
	4	210	227	243	260
	5	224	241	257	274
40	0	179	199	218	238
	1	199	218	238	257
	2	218	238	257	277
	3	243	260	279	299
	4	260	279	299	321
	5	285	302	321	341
50	0	210	235	257	282
	1	241	268	288	310
	2	271	293	318	343
	3	302	327	349	374
	4	338	360	379	404
	5	366	391	413	438

Fonte: Adaptado de Young (1996).

Portanto, o uso de altos teores de RAP requer algumas adaptações em usinas. Ao utilizar equipamentos mais especializados como, por exemplo, um tambor secador/misturador de tambor duplo, menos superaquecimento é necessário. A Figura 1 apresenta a temperatura de aquecimento de um secador de contrafluxo tradicional quando é utilizado 50% de RAP. Em comparação, o gráfico mostra que um tambor de barril duplo necessita aproximadamente 38°C a menos para usinar uma mistura com o mesmo teor de reciclado (Brock e Richmond, 2007).

Figura 1 – Temperatura de aquecimento de mistura em tambor secador de contrafluxo convencional versus tambor de barril duplo

Fonte: Adaptado de Brock e Richmond (2007).

Atualmente já existem tecnologias para a produção de misturas com até 100% de RAP. Mais adiante, serão ilustrados os diversos tipos de adaptações em usinas de asfalto para a incorporação do material reciclado ao processo a quente.

Uma alternativa tecnológica que pode ser utilizada para reduzir a temperatura de usinagem é a chamada mistura asfáltica morna (*Warm Mix Asphalt - WMA*). Segundo Motta (2011), essa tecnologia foi desenvolvida com o intuito de reduzir a temperatura de usinagem das misturas asfálticas em cerca de 30°C a 50°C. Conforme Prowell *et al.* (2012), as misturas mornas melhoram a capacidade de compactação das misturas contendo teores mais altos de RAP. Além disso, as temperaturas de usinagem reduzidas utilizadas pelas WMA diminuem o envelhecimento do ligante virgem.

Dessa forma, a utilização de teores elevados de RAP na mistura pode ser combinada com esta tecnologia e apresentar vantagens não só quanto ao consumo energético, como também pela necessidade de superaquecer os agregados virgens complementares da mistura final.

Gennesseaux (2015) aponta que as misturas asfálticas recicladas associadas à técnica morna, com altos teores de RAP, atendem aos níveis de durabilidade

requeridos pelas normas. No entanto, ressalta que é necessário o uso de usinas adaptadas que prevejam a entrada do material fresado longe da chama do secador.

2.2.1 Práticas no exterior

Nos Estados Unidos, a maioria do RAP é utilizada em misturas asfálticas quentes ou mornas, cujo uso é o mais indicado. A Tabela 3 apresenta as estimativas das diversas aplicações de RAP, expressas em milhões de toneladas, resultantes das pesquisas de construção realizadas pela NAPA em parceria com a *Federal Highway Administration* (FHWA) desde 2009 (Hansen & Copeland, 2017).

Tabela 3 – Utilização de RAP nos Estados Unidos (milhões de toneladas)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Misturas quentes e mornas	56,0	62,1	66,7	68,3	67,8	71,9	74,2	76,9
Agregados	6,2	7,3	4,9	3,6	4,0	8,5	5,5	3,7
Misturas frias	1,5	1,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Disposição em aterros	0,1	0,0	0,3	0,2	0,1	0,2	1,0	0,1
Outros	0,7	0,8	0,7	0,2	1,5	0,6	1,6	0,4

Fonte: Adaptado de Hansen & Copeland (2017).

Em 2016, o uso de RAP atingiu 76,9 milhões de toneladas, com uma média de teor de 20,5%. Conforme apresentado na Tabela 3, é possível observar que a disposição desse material em aterros foi de apenas cerca de 0,1 toneladas.

Na Europa, atualmente, mais de 90% dos 5,5 milhões de quilômetros de rodovias são compostas de material asfáltico. Aproximadamente, 950 bilhões de toneladas de asfalto são empregados na rede rodoviária europeia (EAPA, 2014). Em 2017, após aprovação em Assembléia do Conselho Geral, a *European Asphalt Pavement Association* – EAPA, recomenda que a prioridade número 1 de reutilização de asfalto recuperado seja em misturas quentes ou mornas, pois representa um enorme potencial de economia no consumo de novos materiais e energia (EAPA, 2017). A Tabela 4 apresenta a situação atual de utilização do RAP nos países europeus.

Tabela 4 – Utilização de RAP na Europa

País	Asfalto recuperado disponível (toneladas)	% de asfalto recuperado utilizado em			
		Produção de mistura asfáltica quente	Produção de mistura asfáltica morna	Reciclagem a frio	Camadas granulares
Alemanha	11.000.000	90	0	0	10
Áustria	1.350.000	45	-	-	-
Bélgica	1.553.994	64	-	-	-
Croácia	-	-	-	-	-
Dinamarca	1.300.000	52	-	-	10
Eslováquia	75.000	98	0	1	1
Eslovênia	37.000	27	0	73	0
Espanha	410.000	94	1	0	1
Finlândia	1.160.000	100	-	-	-
França	7.000.000	68	-	-	-
Grã-Bretanha	3.500.000	85	85	15	0
Hungria	180.000	85	5	0	10
Islândia	15.000	100	0	0	0
Itália	9.000.000	20	0	30	20
Lituânia	-	-	-	-	-
Luxemburgo	200.000	90	0	10	0
Noruega	932.049	38	-	-	61
Países Baixos	4.500.000	70	0	10	0
República Tcheca	2.000.000	16	-	30	20
Romênia	-	-	-	-	-
Suécia	1.600.000	76	8	5	5
Suíça	-	-	-	-	-
Turquia	1.520.000	2	0	0	98

Fonte: Adaptado de EAPA (2015).

Já no Japão, são produzidas cerca de 50 milhões de toneladas de misturas asfálticas quentes por ano, das quais aproximadamente 41,9 milhões de toneladas são misturas recicladas com RAP, sendo 76% destinadas para camadas de revestimento. A média de teor de RAP nas misturas asfálticas subiu de 33% no ano 2000 para 47% em 2013 (West & Copeland, 2015). A Figura 2 apresenta as médias de teor de RAP utilizadas nas regiões do Japão.

Figura 2 – Médias dos teores de RAP nas regiões do Japão

Fonte: Hirama (2014).

A região de Kantō é a que possui a maior média de teor de RAP, com 51%. Dentro dessa região, a prefeitura de Kanagawa, ao longo do lado sudoeste da Baía de Tóquio, tem uma média de 73% de RAP (Hirama, 2014). Atualmente, existem duas leis nacionais que promovem a reciclagem de pavimentos e o uso do RAP: a *Waste Management and Public Cleansing Law* (Lei nº137 de 1970) e a *Act on Promotion of Procurement of Eco-Friendly Goods and Services* (Lei nº100 de 2000). O padrão japonês para o RAP a ser incorporado em novas misturas é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificação japonesa de qualidade do RAP

Característica	Especificação requerida
Teor de asfalto ¹	mín 3,8%
Penetração do asfalto recuperado ²	mín 20 pen
Percentagem passante na peneira 75m (P200) ³	máx 5,0%

¹Método de extração de solvente (tricloroetileno) semelhante ao da AASHTO T 164/ASTM D2172;

²Padrão de teste de classificação por penetração semelhante ao da AASHTO T 49/ASTM D5;

³Realizado no RAP processado

Fonte: Adaptado de Monden (2014).

Abaixo são listadas algumas práticas padrão utilizadas no Japão com relação ao uso do RAP para misturas recicladas:

- 1) As pilhas são cobertas e apoiadas sobre superfície pavimentada;
- 2) Os teores de umidade e pó são minimizados durante o processamento e estocagem;
- 3) O RAP é fracionado e as usinas são equipadas com múltiplos silos.

Os aspectos japoneses considerados chave para o uso de altos teores de RAP incluem:

- 1) Secagem e aquecimento do RAP em um secador separado em paralelo;
- 2) Utilização de oxidantes térmicos para controle de emissões do secador do RAP;
- 3) Mistura do agente rejuvenescedor no RAP quente, dando tempo para “ativar e condicionar” o ligante envelhecido do RAP;
- 4) Baixas taxas de produção, tipicamente 100-180 toneladas por hora.

2.2.2 Cenário brasileiro

No Brasil, existem poucos casos relatados na literatura de aplicação de misturas asfálticas recicladas. Isso pode ser devido ao fato da falta de exigência por parte dos órgãos governamentais por materiais reciclados, falta de conscientização dos impactos ambientais causados por obtenção de agregados e ligantes asfálticos novos, além de falta de especificações técnicas adequadas para uma boa execução e controle tecnológico da obra.

Uma das primeiras experiências de reciclagens de material fresado no país ocorreu em 1986, quando o Desenvolvimento Rodoviário S/A (DERSA) aplicou uma mistura asfáltica reciclada com 50% de RAP no recapeamento da Rodovia Anhanguera. Castro Neto (2000) relata que, após 14 anos de serviço, o pavimento encontrava-se com excelente desempenho e, em sua dissertação de mestrado, propôs um método de dosagem de misturas recicladas a quente.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT), 60% da matriz de transporte concentra-se no rodoviário. Devido as dificuldades de realização de investimentos diretos pelo governo na manutenção e expansão de rodovias, desde a década de 1990, adotou-se a participação da iniciativa privada via concessões para oferecer os investimentos necessários nas rodovias. A Tabela 6 apresenta a estimativa de geração de material fresado, expressa em toneladas, de algumas concessionárias de rodovias federais e estaduais do Estado de São Paulo, Rio de Janeiro e Paraná, até o ano de 2021.

Tabela 6 – Estimativa de geração de material fresado em concessionárias de rodovias brasileiras

Concessionária	Material fresado (t)					Total
	2017	2018	2019	2020	2021	
NovaDutra	69.000	72.000	81.000	79.000	36.000	337.000
Rodonorte	157.000	101.000	60.000	4.000	14.000	336.000
SPVias	3.000	56.000	80.000	3.000	20.000	162.000
ViaOeste	44.000	3.000	9.000	14.000	15.000	85.000
Rodoanel Oeste	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	20.000
ViaLagos	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	15.000
AutoBAn	8.000	29.000	30.000	32.000	33.000	132.000
Total	288.000	268.000	267.000	139.000	125.000	1.087.000

Fonte: CCR Engellog, Planejamento de Quinquênio (2018).

Conforme pode ser observado, a quantidade de material fresado gerado por essas concessionárias no ano de 2017 foi de 288.000 toneladas. Isso corresponde a quase 70% do material disponível na Espanha em 2015 (410.000 toneladas), e que reutiliza 94% do RAP para produção de misturas asfálticas quentes. Isso demonstra um enorme potencial de economia que poderia ser gerado nas manutenções das rodovias brasileiras. A reutilização de material fresado pode reduzir custos e ser benéfico sobretudo em épocas de crise econômica, quando as concessionárias são diretamente afetadas devido a diminuição do fluxo de veículos nas rodovias pedagiadas, reduzindo a receita e comprometendo os resultados financeiros.

Assim, o uso do RAP tem mostrado grande potencial para ser reutilizado em novas misturas asfálticas, porém sua aplicação em altos teores em camadas de revestimento de pavimentos ainda é limitada. Essa limitação é principalmente devido a algumas

preocupações com relação ao desempenho do material e também por questões técnicas.

Apesar da cautela no uso de altos teores de RAP, o desempenho em campo de pavimentos contendo até 50% de RAP em projetos de diversos climas tem sido positivo em muitos casos (West *et al.*, 2013). Isso demonstra que com uma boa gestão do RAP, modernas usinas de asfalto, adequados procedimentos de dosagem e soluções técnicas inovadoras, é possível aumentar o teor de RAP (Zaumanis & Mallick, 2015).

Dentre os desafios a serem superados para que a reciclagem a quente/morna no Brasil seja uma prática roteineira, destacam-se:

- Comportamento mecânico das misturas recicladas com o aumento do teor de material fresado;
- Quantificação da interação entre o ligante velho e novo;
- O papel do agente rejuvenescedor;
- Adaptação das usinas de asfalto brasileiras.

2.2.3 Melhores práticas para a gestão do RAP

É importante ressaltar que antes da usinagem da mistura reciclada é essencial um cuidado especial na gestão do RAP, que vai desde a geração do material, a estocagem, o beneficiamento, a dosagem, até o processamento em usina para se obter uma mistura final mais homogênea e de melhor qualidade.

2.2.3.1 Operação de fresagem

O RAP pode ser obtido a partir de várias fontes: demolição de pavimento, misturas desperdiçadas de processos de usinagens e operações de fresagem de revestimentos asfálticos, sendo o último o método mais comum.

A espessura da fresagem do revestimento é uma decisão da agência de planejamento da manutenção/restauração do pavimento e geralmente está associada aos tipos de ocorrências de defeitos. A Figura 3 apresenta alguns exemplos de cilindros fresadores para cada tipo de fresagem e, como pode ser observado, o tamanho dos grumos de RAP irá variar conforme o espaçamento entre os dentes de corte do cilindro.

Figura 3 – Exemplos de cilindros de fresagem (a) Padrão – Espaçamento entre dentes: 15mm; (b) Fina – Espaçamento entre dentes: 8mm; (c) Microfresagem – Espaçamento entre dentes: 6 x 2 mm

Fonte: Adaptado de Wirtgen Group (2019).

Os processos de fresagem devem ser avaliados atentamente para garantir que o material fresado não esteja contaminado com material de base, geotêxteis, solos ou outros detritos. Essa é uma etapa particularmente importante quando a fresagem ocorrer em espessuras profundas ou em acostamentos. Materiais fresados contaminados só devem ser usados como material para acostamentos e devem ser estocados separados das outras pilhas de RAP (NCHRP, 2013).

Bonfim (2010) aponta que, a operação de fresagem provoca a quebra de parte dos agregados na altura da linha de corte. Assim, a velocidade da fresadora deve ser controlada para evitar o aparecimento de grumos de tamanhos indesejados. Na Figura 4 observa-se que, quando comparada com a curva granulométrica original, a curva sem a extração do ligante é deslocada para baixo devido a formação dos grumos, o que faz com que a porcentagem de material passante em cada peneira seja menor. Já a curva granulométrica com a extração do ligante é deslocada para cima, tornando a curva mais densa ou mais fechada. Esse exemplo é referente a uma amostra com espessura de corte de 8 centímetros e com velocidade de 10 metros por minuto.

Figura 4 – Curvas granulométricas de material fresado sem e com extração de ligante

Fonte: Bonfim (2010).

Assim sendo, é necessário dar uma atenção especial nessa fase para minimizar o teor de finos. Velocidade de avanço lenta, ou rotação rápida do tambor, irá gerar partículas mais finas (Zaumanis & Mallick, 2014). O cuidado com a situação inversa, ou seja, com partículas mais graúdas, também deve ser observado, a fim de se obter uma granulometria para a maximização do uso de material reciclado em uma nova mistura asfáltica.

No passado, corpos de prova eram extraídos do pavimento antes da fresagem e a camada fresada era submetida a ensaios de extração. Fatores de ajustes eram então aplicados para estimar a granulometria após a fresagem. No entanto, essa técnica não é confiável já que a degradação dos agregados depende da dureza e da resistência ao impacto dos agregados, da rigidez do ligante (e portanto, da temperatura do pavimento no momento da fresagem), da velocidade de avanço da fresadora e da profundidade do corte (West, 2015).

2.2.3.2 Estocagem

As pilhas de RAP deverão ter o mesmo tratamento que as pilhas comuns de agregados virgens evitando-se a contaminação e fazendo a separação em diferentes granulometrias. O teor de ligante é uma função direta da área de superfície do material. Quanto mais fino o material, maior a sua área de superfície e, portanto, conterà mais asfalto (Brock e Richmond, 2007).

Se os RAP's de diferentes fontes forem estocados em uma mesma pilha, esta deverá ser misturada de modo a aumentar a homogeneidade antes do processamento (West, 2010).

O teor de umidade é um fator importante que pode limitar o teor máximo de RAP na mistura pois aumenta os custos de secagem e aquecimento, além de reduzir a taxa de produção da usina (E-MARK, 2017) e aumentar as emissões em 10% para cada 1% de aumento de umidade (Prowell *et al.*, 2012)

Para contornar essa questão, as pilhas poderão ser estocadas tomando-se alguns cuidados específicos como, por exemplo (Brock and Richmond, 2007; Risley, 2010):

- Apoiar a pilha sobre uma superfície pavimentada e ligeiramente inclinada;
- Cobrir as pilhas sob um teto;
- Utilizar pilhas altas e cônicas;
- Britar e peneirar o RAP em pequenas porções no dia do uso.

2.2.3.3 Beneficiamento/Peneiramento

O fracionamento do RAP é o processamento e a separação do material em pelo menos dois tamanhos, uma fração mais grossa e outra mais fina (Copeland, 2011). É comum a formação de “torrões” de material fresado por ocasião do empilhamento do mesmo. Recomenda-se então, o “destorroamento” do RAP, sempre que possível, para um maior controle da granulometria na mistura reciclada final.

Materiais de tamanho abaixo de duas polegadas são usados sem processamento adicional. No entanto, partículas maiores de RAP levam mais tempo para serem misturadas com os novos materiais. Vários tipos de trituradores e configurações de britagem podem ser utilizados, sendo que os mais eficazes e eficientes são os britadores de impacto horizontal, os britadores de impacto de martelo e a combinação de britador de mandíbula/rolo (Young, 1996).

Para produzir uma mistura de qualidade com 100% de RAP é necessário fracionar as pilhas de fresado e misturar as frações separadas nas proporções necessárias para a mistura desejada (RAPTechnologies, 2017a). A Figura 5 exemplifica um processo de fracionamento do RAP.

Figura 5 – Fracionamento do RAP

Fonte: Adaptado de Risley (2010).

2.2.4 Adaptações de usinas

As misturas recicladas podem ser produzidas tanto em usinas gravimétricas quanto contínuas. O teor máximo de RAP na mistura é principalmente limitado pela tecnologia de produção disponível. Uma das principais variáveis que irá determinar o teor de RAP na mistura é a forma como o material irá receber calor durante o processo de usinagem. Conforme deseja-se aumentar o teor de RAP, mais delicado deverá ser o processo para que não ocorra a exposição direta do RAP às altas temperaturas dos gases provenientes da combustão das chamas do secador.

A seguir são apresentados alguns tipos de configurações de usinas para a incorporação do RAP ao processo de usinagem, porém não contemplam as questões relacionadas ao controle de emissões de poluentes e etapas como a incorporação do ligante e o retorno de finos.

2.2.4.1 Usinas gravimétricas

As usinas gravimétricas são conhecidas por terem a produção da mistura asfáltica por bateladas devidamente controladas por pesagem. Os silos frios armazenam os agregados e por meio de uma correia transportadora migram para um tambor secador para secagem e aquecimento através da energia de um queimador.

Após a retirada da umidade, um elevador de caneca transporta os materiais para a parte superior de uma torre de pesagem. Um conjunto de telas vibratórias classifica as partículas na granulometria desejada que posteriormente são separadas nos silos quentes.

Os materiais são pesados em balanças individualmente de modo a garantir a correta proporção da mistura. O CAP é injetado no misturador para homogeneização e o tempo de mistura é controlado por um sistema automatizado. A mistura é armazenada em um silo quente ou descarregada diretamente no caminhão que será enviado para a obra. A produção deste tipo de planta é determinada pela capacidade de bateladas por hora.

Nas usinas gravimétricas, para baixos teores de RAP, o método de transferência de calor compreende o superaquecimento dos agregados (virgens e/ou recuperados) para aumentar a temperatura do RAP. Nestes casos, a incorporação de RAP durante o processo de usinagem pode ser realizada de duas maneiras, introduzindo o material a ser reciclado diretamente no misturador ou na entrada inferior do elevador, conforme abordado a seguir.

a) Misturador

O primeiro modelo de misturador usado para produzir uma mistura asfáltica reciclada de alta qualidade foi desenvolvido em Maplewood, para o Departamento de

Transportes de Minnesota (Young, 1996). Este modelo ficou conhecido na literatura internacional como “*Minnesota Method*”, traduzido aqui livremente para o “Método de Minnesota”, pois provou que misturas asfálticas de alta qualidade poderiam ser produzidas com material fresado.

Esta técnica consiste na passagem do RAP (frio e com baixo teor de umidade) pelo funil de pesagem como um material adicional, onde a troca de calor ocorre por condução com os materiais virgens superaquecidos na caixa de pesagem e no misturador ao longo do ciclo de mistura a seco.

Com este tipo de configuração, onde a troca de calor ocorre no misturador, o percentual de RAP em usinas gravimétricas raramente ultrapassa 25-30%, pois se a umidade do material variar entre 3 a 5% é difícil elevar a temperatura dos agregados na ordem de 315°C devido a eficiência do secador. A Figura 6 ilustra a adição do RAP no misturador de uma usina gravimétrica.

Figura 6 – Adição de RAP (frio e com baixo teor de umidade) no misturador de uma usina gravimétrica

Fonte: Adaptado de Ammann (2012).

b) Elevador

Uma outra adaptação em usinas gravimétricas é a entrada do RAP (frio e com baixo teor de umidade) na entrada inferior de um elevador. O material fresado é misturado

com os agregados virgens superaquecidos à medida que estes saem do secador e entram no elevador, ou pode ainda, ser adicionado em um segundo elevador.

Com esta configuração, o teor de RAP raramente ultrapassa 20%, pois o caminho do material fresado até o elevador leva pouco tempo, e o RAP necessita estar seco antes de passar sobre as telas, caso contrário, estas podem causar entupimento (Banasiak, 2000) e a segregação da mistura. A Figura 7 apresenta a entrada do RAP na parte inferior do elevador de uma usina gravimétrica.

Figura 7 – Entrada de RAP (frio e com baixo teor de umidade) na parte inferior do elevador de uma usina gravimétrica

Fonte: Adaptado de Ammann (2012).

Visando aumentar o teor de RAP na mistura para acima de 25%, um novo secador especialmente para o material fresado pode ser adicionado ao processo. Uma técnica amplamente utilizada na Europa Ocidental na década de 90 foi a incorporação de um secador externo de fluxo paralelo. Neste caso, o RAP é aquecido por convecção, gerando gases que contém vapor e hidrocarbonetos. Esses gases são emitidos para o primeiro secador de agregados virgens, onde os hidrocarbonetos são reaproveitados na área de combustão deste secador.

O RAP aquecido é transportado e armazenado em um silo quente separado que tem seu próprio sistema de pesagem e posteriormente encaminhado ao misturador. Com esta configuração é possível alcançar até 60% de RAP na mistura, dependendo da

capacidade do queimador no primeiro secador de agregados virgens em aceitar os gases provenientes do segundo secador de RAP. A Figura 8 ilustra a configuração de uma usina gravimétrica com secador externo específico para o pré-aquecimento do RAP.

Figura 8 – Configuração de usina gravimétrica com secador externo para pré-aquecimento do RAP

Fonte: Adaptado de Ammann (2012).

Usinas de última geração permitem a utilização de até 100% de RAP em usinas gravimétricas. O diferencial está no tambor secador de forma que o material fresado não tenha contato direto com a chama do secador. Um exemplo é o tambor secador de contrafluxo de duas fases. A fase de aquecimento e secagem do tambor gira, enquanto que a câmara de combustão é estática. O RAP é aquecido pelo ar quente e é descarregado antes de entrar em contato com a chama, reduzindo assim as emissões e limitando o envelhecimento do ligante do RAP. Posteriormente, o material é conduzido para a balança e o misturador. O agente rejuvenescedor e o novo ligante, se houver, são adicionados e misturados com o RAP. A Figura 9 detalha internamente o tambor secador para 100% RAP.

Figura 9 – Exemplo de tambor para 100% de RAP

Fonte: Adaptado de Zaumanis *et al* (2014).

2.2.4.2 Usinas contínuas

As usinas contínuas, ou volumétricas, como o próprio nome sugere, têm a produção da mistura asfáltica de maneira ininterrupta, onde a pesagem dos agregados é feita de forma individual. As correias possuem um dispositivo eletrônico que faz a pesagem dos materiais e a regulação das quantidades automaticamente. Os agregados são encaminhados para um tambor ligeiramente inclinado, que pode ser do tipo fluxo paralelo ou contrafluxo, do sentido da chama do queimador para a secagem e aquecimento dos agregados. O CAP é então adicionado e a homogeneização da mistura pode ser feita no próprio tambor misturador (*drum-mixer*), ou em um misturador externo.

Nas usinas contínuas, o método de transferência de calor para aquecimento do RAP pode ser realizado de três maneiras distintas (Instituto do Asfalto, 1986):

1) Indireta

Processo que depende inteiramente do aquecimento indireto pelos gases de exaustão.

2) Convecção

Aquecimento por convecção via ação da mistura de ar quente proveniente do processo de combustão completa que promove uma distribuição uniforme da temperatura do gás.

3) Condução e convecção

Processo em que os agregados (virgens e/ou recuperados) são aquecidos em frente ao tambor, o RAP é introduzido aproximadamente no centro do tambor e é aquecido (por condução e convecção) e misturado por meio do restante do tambor.

A seguir serão apresentadas as diversas maneiras de incorporação do RAP ao processo de usinagem em usinas contínuas.

a) Fluxo paralelo

Em usinas contínuas com tambor misturador do tipo fluxo paralelo, os agregados virgens entram na mesma extremidade em que se encontra o queimador e são aquecidos e secos pelos gases de exaustão que fluem no mesmo sentido. A configuração para a adição de RAP é através de um anel no centro do tambor, de modo a evitar o contato com a chama, onde o material é aquecido principalmente por convecção.

Segundo a NAPA (Young, 1996), em relação à transferência de calor, é possível atingir percentuais de até 70% de RAP. No entanto, para Kandhal & Mallick (1997), este teor é limitado para um valor máximo de 50% em usinas volumétricas. A Figura 10 ilustra a configuração de entrada de RAP via anel em um tambor misturador do tipo de fluxo paralelo.

Figura 10 – Entrada de RAP via anel intermediário em um tambor misturador de fluxo paralelo

Fonte: Adaptado de Risley (2010).

b) Contrafluxo

Em usinas contínuas com tambor do tipo contrafluxo, os agregados virgens são inseridos na extremidade superior oposta ao do queimador e fluem em sentido contrário aos gases.

O RAP pode ser incorporado no tambor misturador do tipo contrafluxo em um anel localizado no primeiro terço do tambor, sem que tenha contato direto com as chamas do queimador. Neste caso, os agregados virgens são aquecidos por convecção com os gases quentes, enquanto o RAP é aquecido por condução com os agregados virgens superaquecidos. Normalmente, este tipo de usina pode processar misturas com até 50% de RAP, com pouco ou nenhum efeito observado sobre as emissões (EPA, 2004). A Figura 11 ilustra a adição de RAP via anel em tambor misturador do tipo contrafluxo após a área de combustão dos gases.

Figura 11 – Adição de RAP via anel em tambor misturador de contrafluxo

Fonte: Adaptado de Risley (2010).

c) Tambor duplo

Há ainda a opção de adicionar o RAP num tambor duplo, em um compartimento externo entre o secador de contrafluxo e um misturador do tipo pugmill. O processo consiste na secagem dos agregados virgens no secador, que posteriormente são descarregados por lâminas fixadas na parte externa do secador para um leito do misturador localizado entre o invólucro de secagem rotativo e o invólucro do misturador externo fixo.

O RAP é então misturado com os agregados virgens, com o CAP, os finos e outros aditivos, ganhando calor também no revestimento metálico quente do secador, na área de combustão. Um maior percentual de RAP pode ser alcançado pois este tem um maior tempo de contato com os agregados virgens na proximidade mais quente da superfície externa do tambor secador. No entanto, o teor de material fresado pode ser limitado pelo espaço e tempo disponível para a homogeneização da mistura dentro do compartimento. A Figura 12 ilustra a configuração da entrada de RAP em um tambor duplo.

Figura 12 – Usina contínua com tambor duplo

Fonte: Adaptado de Risley (2010).

Um modelo mais recente de tambor duplo foi desenvolvido, utilizando tanto uma câmara externa no tambor como também um misturador externo, com sistema de controle de temperatura. Os agregados virgens são aquecidos no tambor interno, em seguida, caem para dentro do cilindro externo, onde pás sequencialmente se misturam no RAP em um ambiente sem chama. Quando o RAP e os agregados virgens se encontram no tambor, há uma liberação violenta de vapor em uma base contínua, o que torna o ar rarefeito. Ou seja, sem a presença de oxigênio, o ligante asfáltico do RAP é prevenido de queimar. Nesta zona, os constituintes são misturados para o restante do comprimento do tambor e o pó/filler são adicionados antes da mistura sair para o misturador externo.

À medida que a mistura sai, o ligante asfáltico é adicionado. Os materiais são então misturados no misturador externo. Segundo Mike Varner, engenheiro chefe da Astec,

o modelo desenvolvido por esta empresa possui um tambor de 3 metros de comprimento, melhorando o processo de transferência de calor. Além disso, esta configuração de usina elimina a necessidade de pré-aquecimento do RAP e consequentemente reduz as emissões (World Highways, 2018). Com este tipo de configuração, é possível atingir um teor de até 70 % de RAP na mistura (ou 65% com umidade de 5%). A Figura 13 ilustra o processo de usinagem.

Figura 13 – Usina contínua com tambor duplo e misturador externo

Fonte: Adaptado de Astec (2019).

d) Misturador contínuo

Uma possível adição de RAP na mistura pode ser feita através de um misturador contínuo ao secador do tipo contrafluxo. O teor de RAP na mistura é limitado dependendo da dimensão do misturador que irá afetar o tempo de homogeneização da mistura entre o RAP (frio e com baixo teor de umidade) e os agregados virgens

quentes e secos. A Figura 14 ilustra a configuração da entrada de RAP em um misturador contínuo ao secador de contrafluxo.

Figura 14 – Configuração da entrada de RAP em um misturador contínuo ao secador de contrafluxo

Fonte: Adaptado de Ammann (2012).

Usinas contínuas também podem ser adaptadas para rodar misturas com até 100% de RAP. É o caso da usina *Green Asphalt*, localizada em Nova Iorque, montada a partir de componentes usados e é semelhante a muitas usinas com tambor do tipo contrafluxo. Nesta usina, o RAP é exposto diretamente à chama do queimador, porém não por muito tempo. Segundo Bob Frank, desenvolvedor do processo, o ligante asfáltico não é queimado ou prejudicado. Para o controle de emissões, um dispositivo de multi-estágios remove as partículas no ar e um filtro final remove a “fumaça azul” (termo adaptado em inglês, *blue smoke*). (RAP Technologies, 2017b).

2.2.4.3 Adição de agente de reciclagem ao processo de usinagem

O agente rejuvenescedor pode ser adicionado em diversos locais diferentes na linha de produção da mistura asfáltica. Zaumanis *et al.* (2019), “rankearam” 10 potenciais locais para adição do rejuvenescedor (vide Figura 15) em termos de comportamento mecânico da mistura asfáltica, operação da usina e segurança ambiental.

Figura 15 – Potenciais locais de adição de agente rejuvenecedor em usina gravimétrica

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

De acordo com Zaumanis *et al.* (2018), podem ser diferenciados três principais grupos:

- (i) Adição a montante do tambor secador de RAP: tem como vantagem um maior tempo de contato com o ligante do RAP e aumentar a difusão que poderia potencialmente permitir uma menor temperatura de aquecimento e melhorar a mistura com outros materiais. As principais desvantagens são a dosagem relativamente menos precisa, a possível evaporação do rejuvenecedor no tambor e preocupações com a saúde e segurança;
- (ii) Adição a jusante do tambor secador de RAP: permite a dosagem mais precisa do rejuvenecedor, os riscos ambientais são reduzidos, além de ser uma solução prática pois a maioria das usinas já possui dispositivos de dosagem de aditivos integrados. A principal desvantagem é um período de rejuvenescimento relativamente curto e menor temperatura do RAP, reduzindo assim a difusão. Ao mesmo tempo, deve ser reconhecido que a

difusão rápida continua durante o armazenamento e implantação da mistura asfáltica;

- (iii) Adição ao ligante virgem: não requer nenhum equipamento adicional na usina e permite uma dosagem precisa, mas limita a flexibilidade do produtor para ajustar a dosagem do rejuvenescedor com base nas propriedades e teor do RAP. Além disso, o rejuvenescedor não entra em contato com o RAP.

Um experimento realizado por Zaumanis *et al.* (2017) comparou dois locais mais promissores de uma usina equipada com tambor secador de fluxo paralelo para até 60% de RAP. O primeiro com o spray do AR foi sobre o RAP frio na correia transportadora antes do seu aquecimento e o segundo com a adição do AR no RAP quente no misturador. Para isolar os efeitos da adição do AR no RAP, apenas o RAP foi amostrado, e nenhum material virgem foi adicionado. O estudo revelou que o desempenho mecânico e a composição química do ligante foi similar independentemente do AR ter sido adicionado antes ou depois do tambor secador. No entanto, essas conclusões podem ser diferentes em outros tipos de usina. Os resultados podem ser alterados pelo tipo de tambor (fluxo paralelo ou contrafluxo), tempo de exposição ao calor e temperatura do tambor.

Uma outra produção em escala completa em uma usina gravimétrica foi realizada por Zaumanis *et al.* (2019) para comparar a adição do rejuvenescedor ao RAP frio na correia transportadora versus a adição ao RAP quente no misturador. Os resultados dos ensaios de fadiga e flexão em amostra semicircular com fenda (*semi-circular bend test – SCB*) nas misturas indicaram que a pulverização do rejuvenescedor no RAP frio facilita a difusão do produto no ligante do RAP, resultando em melhor resistência à fadiga e à propagação de trincas. Em ambos os locais de adição, geraram-se iguais emissões de carbono orgânico do asfalto.

Análises semelhantes podem ser aplicadas às usinas de asfalto contínuas. A Figura 16 ilustra a adição de agente rejuvenescedor através de barra espargidora na correia transportadora de RAP frio em uma usina contínua localizada em Nova Iorque.

Figura 16 – Pulverização de agente rejuvenescedor em correia transportadora de RAP frio (a) Galão de agente rejuvenescedor; (b) Barra espargidora

2.3 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE

Dosagem nos Estados Unidos

O método de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente do *Asphalt Institute* (2014) considera o parâmetro RPBR (*RAP Pavement Binder Ratio*), que indica a razão do ligante do RAP em relação ao teor total de ligante da mistura. Para todos os níveis de RAP, precisam ser determinados o teor de ligante asfáltico e a granulometria do material reciclado. Em níveis mais altos de RAP, as propriedades físicas do ligante também são necessárias. Segundo a AASHTO M 323 (2017), a recomendação para a seleção do grau de desempenho (*Performance Grade – PG*) adequado do ligante virgem é a seguinte:

- $RAP < 15\%$ → Não é necessária nenhuma mudança na classificação PG;
- $15\% \leq RAP \leq 25\%$ → Selecionar o ligante virgem um grau de desempenho menor que o projeto inicial;
- $RAP > 25\%$ → Seguir recomendações dos *blending charts*.

A utilização dos *blending charts* pode ser aplicada para três casos: (i) determinar o grau do ligante virgem quando o teor de ligante do RAP na mistura e o PG final dos ligantes misturados são conhecidos; (ii) determinar o teor do ligante do RAP que poderá ser usado quando um grau de ligante virgem específico deve ser usado e o PG final dos ligantes misturados são conhecidos; ou (iii) determinar o grau dos ligantes misturados quando o teor do ligante do RAP e o grau do ligante virgem são fixos.

A seguir será dado um exemplo do primeiro caso. A temperatura crítica do ligante virgem será determinada pela Equação 1.

$$T_{Virgin} = \frac{T_{Blend} - (RPBR \times T_{RAP})}{(1 - RPBR)} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

T_{Virgin} = temperatura crítica do ligante asfáltico virgem;

T_{Blend} = temperatura crítica dos ligantes asfálticos misturados (final desejado);

RPBR = RAP pavement binder ratio;

T_{RAP} = temperatura crítica do ligante recuperado do RAP.

Se o percentual de RAP, o grau dos ligantes misturados e as propriedades do ligante recuperado são conhecidos, então podem ser determinadas as propriedades do ligante virgem. Considerando, como exemplo:

- Teor de RAP na mistura: RPBR=0,30 (30%)
- Grau dos ligantes misturados: PG 64-22
- Grau do ligante recuperado do RAP: PG 86-11

Como RPBR é maior que 25%, recomenda-se o uso dos *blending charts*. Aplicando-se a Equação 1 para o PG a alta temperatura, têm-se que:

$$T_{Virgin} = \frac{64 - (0,30 \times 86)}{(1 - 0,30)} = 54,6$$

Assim, o ligante asfáltico virgem deverá possuir uma alta temperatura crítica de 55°C (ou maior) para a produção de um ligante final com PG 64, usando 30% de RAP. Na Figura 17 é ilustrado o exemplo, utilizando o PG a alta temperatura.

Figura 17 – Exemplo de *blending chart*

Fonte: Adaptado de *Asphalt Institute* (2014).

As propriedades de baixa e intermediária temperatura são determinadas utilizando-se o mesmo raciocínio, com os valores de *m-value* e *BBR stiffness*, respectivamente.

Embora no Brasil não se utilize a classificação PG, o clima brasileiro possui características tropicais, porém com grandes variações, em virtude da extensão territorial do país. Assim, o critério utilizado para a escolha do ligante deve ser avaliado conforme a região em que irá empregar o material. Além disso, a frequência e a magnitude das cargas previstas de tráfego também devem ser consideradas.

Dosagem na Europa

Diferentemente dos americanos, nos países europeus, a classificação do ligante na mistura reciclada é realizada utilizando os parâmetros de penetração e ponto de amolecimento. Segundo a norma BS EN 13108-8:2016, a classificação do ligante virgem permanece inalterada se a mistura reciclada possuir menos de 10% de ligante do RAP para camadas de rolamento, e menos de 20% para camadas de *binder* e base. Para o uso de teores maiores do ligante recuperado, deve-se determinar a penetração e o ponto de amolecimento dos ligantes misturados, conforme as Equações 2 e 3 abaixo:

$$a \log pen_1 + b \log pen_2 = (a+b) \log pen_{mix} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde:

pen_1 = penetração do ligante recuperado do RAP

pen_2 = penetração do ligante virgem

pen_{mix} = valor calculado da penetração do ligante da mistura

a, b = razão, em massa, do ligante do RAP e do ligante virgem, respectivamente
(a+b=1,0)

$$TR\&B_{mix} = a TR\&B_1 + b TR\&B_2 \quad (\text{Eq.3})$$

Onde:

$TR\&B_1$ = ponto de amolecimento do ligante recuperado do RAP

$TR\&B_2$ = ponto de amolecimento do ligante virgem

$TR\&B_{mix}$ = valor calculado do ponto de amolecimento do ligante da mistura

a, b = razão, em massa, do ligante do RAP e do ligante virgem, respectivamente
(a+b=1,0)

2.3.1 Caracterização do RAP

Os resultados de caracterização do RAP em laboratório, além de serem utilizados para as dosagens das misturas, também podem ser utilizados para gerenciar as pilhas de um tipo ou após a mistura de diferentes tipos de RAP. Assim sendo, é recomendado determinar as seguintes propriedades (Kuehl; Korzilius e Marti, 2016):

- Teor de ligante, média e desvio padrão;
- Classificação do ligante recuperado;
 - - métodos de análise de mistura usando o sistema de classificação PG;
 - ou
 - - mistura de viscosidade usando uma porcentagem de RAP conhecida.
- Granulometria dos agregados;
- Massa específica dos agregados (Gse e Gsb).

2.3.1.1 Teor de ligante residual do RAP

A determinação do teor de asfalto residual do RAP pode ser realizada de duas formas: “método de ignição” (AASHTO T 308 – 2018) ou “extração com solvente” (AASHTO T 164 – 2014). A seguir serão apresentadas as vantagens e desvantagens de cada método.

As vantagens do método de ignição incluem resultados rápidos, pouco tempo de ensaio e a ausência da necessidade do uso de solventes. Uma desvantagem é que, para obter um teor de asfalto preciso para uma amostra, é necessário conhecer o fator de correção de agregado. Para materiais virgens, o fator de correção de agregado é determinado testando amostras com um teor de asfalto conhecido. A diferença entre o teor de asfalto conhecido e o resultado do teste para as amostras preparadas é o fator de correção do agregado. No entanto, para o RAP, não é possível ter uma amostra com um teor de asfalto conhecido e, portanto, não é possível determinar o fator de correção de agregado. Felizmente, os fatores de correção de agregados são tipicamente consistentes ao longo do tempo, quando os materiais utilizados são da mesma pedra. Portanto, um fator médio de correção de agregado pode ser usado como fator de correção de agregado para o RAP.

Além disso, alguns tipos de agregados, como por exemplo os dolomitos, podem ter mudanças significativas na massa quando aquecidos a 1.000°F (~538°C) e, portanto, não podem ser usados posteriormente para outros ensaios como granulometria. Nesses casos, o teor de asfalto residual do RAP poderia ser determinado utilizando a extração com solvente.

As extrações com solventes (como, por exemplo, o tricloroetileno) têm sido utilizadas por muitas décadas para determinar os teores de asfalto das misturas asfálticas e como um método para recuperar os agregados para testes adicionais. No entanto, o uso do método diminuiu devido as preocupações de saúde e ambientais com o uso de solventes. Apesar disso, o uso do solvente ainda continua em locais com problemas de fatores de correção de agregados do forno de ignição altamente variáveis ou com a decomposição de certos tipos de agregados. Dependendo da absorção e textura dos agregados, do solvente e da dureza do ligante, as extrações

com solvente podem não remover todo o asfalto absorvido pelo agregado (NCHRP, 2013).

Embora qualquer um dos procedimentos possa ser usado para determinação do teor de ligante e granulometria dos agregados, o procedimento de extração com solvente deve ser selecionado para recuperação do ligante do RAP, caso as propriedades do ligante forem necessárias.

2.3.1.2 Massa específica do agregado do RAP

A massa específica do agregado do RAP é uma propriedade importante para o projeto da mistura reciclada pois é utilizada no cálculo do VAM, sobretudo em misturas com altos teores de RAP.

A determinação da massa específica máxima medida do RAP ($G_{mm(RAP)}$) pode ser realizada conforme a AASHTO T 209 (2012). Em seguida, calcula-se a massa específica efetiva do agregado do RAP ($G_{se(RAP)}$), a partir do teor de ligante asfáltico do RAP, $P_{b(RAP)}$, e um valor assumido para a massa específica do ligante do RAP ($G_{b(RAP)}$), conforme a Equação 4 a seguir:

$$G_{se(RAP)} = \frac{100 - P_{b(RAP)}}{\frac{100}{G_{mm(RAP)}} - \frac{P_{b(RAP)}}{G_{b(RAP)}}} \quad (\text{Eq.4})$$

Onde:

$G_{se(RAP)}$ = massa específica efetiva do agregado do RAP

$G_{mm(RAP)}$ = massa específica máxima medida do RAP

$P_{b(RAP)}$ = teor de ligante asfáltico do RAP

$G_{b(RAP)}$ = massa específica do ligante asfáltico do RAP

Segundo o *Asphalt Institute* (2014), o valor de $G_{b(RAP)}$ pode ser determinado através de ensaio, o que requer a extração e recuperação do ligante asfáltico. Na ausência de recomendações e/ou orientações por parte da agência do usuário, recomenda-se um valor de 1,04, considerando um envelhecimento do ligante.

O valor da massa específica aparente do agregado do RAP ($G_{sb(RAP)}$) é calculado pela Equação 5, assumindo-se também um valor para a absorção do ligante, com base em registros históricos de misturas com as mesmas matérias-primas.

$$G_{sb(RAP)} = \frac{G_{se(RAP)}}{\frac{P_{ba(RAP)} \times G_{se(RAP)}}{100 \times G_{b(RAP)}} + 1} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde:

$G_{sb(RAP)}$ = massa específica aparente do agregado do RAP

$G_{se(RAP)}$ = massa específica efetiva do agregado do RAP

$P_{ba(RAP)}$ = absorção do ligante asfáltico do RAP

$G_{b(RAP)}$ = massa específica do ligante asfáltico do RAP

2.3.2 O papel do agente de reciclagem (AR)

Durante a vida de serviço do pavimento, o ligante asfáltico sofre mudanças físicas e reológicas que devem ser levadas em consideração durante a dosagem da mistura com RAP, para que se obtenha um desempenho equivalente/similar a uma mistura com materiais virgens.

Geralmente, o ligante asfáltico apresenta dois estágios de envelhecimento: a curto e a longo prazo. Durante a usinagem (curto prazo), o ligante asfáltico é exposto a elevadas temperaturas resultando em um aumento significativo da viscosidade e de mudanças associadas as propriedades reológicas e físico-químicas. Já durante a vida de serviço (longo prazo), o ligante asfáltico também vai gradativamente envelhecendo e endurecendo. Desse modo, o comportamento do ligante asfáltico envelhecido será

diferente de um ligante virgem, sendo importante o controle do processo de mistura entre os mesmos durante a reciclagem.

A estrutura do asfalto é um colóide complexo no qual os asfaltenos insolúveis altamente polares são a fase dispersa e os maltenos solúveis (também conhecidos como petrolenos) são o meio de dispersão. Os maltenos são subdivididos em resinas (ou aromáticos polares), aromáticos naftênicos (cíclicos ou aromáticos) e saturados (parafinas ou óleos parafinicos). Na presença de quantidades suficientes de componentes de maltenos, as micelas de asfaleno são totalmente dispersas e têm mobilidade significativa dentro do asfalto. À medida que o asfalto envelhece, os aromáticos são convertidos em resinas e as resinas são transformadas em asfaltenos devido a adição de oxigênio, reduzindo a proporção de maltenos para asfaltenos. Isso aumenta a viscosidade e reduz a ductilidade do ligante asfáltico, o que influencia sua capacidade de alongar sem quebrar (NCAT, 2014).

Diante disso, os agentes de reciclagem são produtos com características químicas e físicas projetadas para restaurar as propriedades reológicas de ligantes asfálticos envelhecidos, melhorando a razão entre asfaleno e malteno, reduzindo o tamanho dos aglomerados de asfaltenos, melhorando o poder dispersivo da fase contínua de malteno e aumentando a mobilidade molecular. Isso, por sua vez, reduz a viscosidade, a rigidez e a fragilidade do ligante asfáltico reciclado e aumenta sua ductilidade (Kaseer *et al.*, 2019).

Na literatura, os agentes de reciclagem também são referidos como agentes rejuvenescedores (*rejuvenating agents*), agentes de recuperação (*reclaiming agents*), ou ainda, agentes “amolecedores” (*softening agents*). No entanto, há uma diferença entre os agentes de reciclagem e os agentes amolecedores.

Os agentes “amolecedores” diminuem a viscosidade do ligante envelhecido enquanto que os agentes rejuvenescedores, por sua vez, restauram as propriedades físico-químicas do ligante envelhecido (Roberts *et al.*, 1996).

Os agentes rejuvenescedores consistem em lubrificantes e óleos extensores, contendo uma proporção elevada de maltenos (Terrel & Epps, 1989). A Tabela 7 apresenta as cinco maiores categorias de agentes rejuvenescedores (NCAT, 2014).

Tabela 7 – Tipos de agentes rejuvenescedores

Categoria	Descrição
Óleos parafínicos	Óleos lubrificantes usados, refinados
Extratos aromáticos	Produtos petrolíferos refinados com componentes aromáticos polares
Óleos naftênicos	Hidrocarbonetos modificados para modificação de asfaltos
Triglicerídeos e ácidos graxos	Derivados de óleos vegetais
Óleo de pinho ("Tall oil")	Subprodutos da indústria de papel (Mesma família química dos agentes de adesividade líquidos e emulsionantes)

Fonte: Adaptado de NCAT (2014).

Outros tipos de agentes de reciclagem, como óleos de base biológica e óleos vegetais modificados são continuamente produzidos e lançados no mercado. Os óleos de base biológica consistem principalmente em derivados de gorduras e bio-solventes, enquanto os óleos vegetais modificados são exemplos de agentes de reciclagem compostos por componentes de óleos vegetais básicos e produtos químicos adicionados. Porém, a maioria desses produtos que estão comercialmente disponíveis no mercado são patenteados, o que dificulta uma descrição química detalhada de sua composição.

Para garantir o desempenho esperado do pavimento uma vez utilizado um AR, Zaumanis *et al.* (2017) sugerem que devem ser controlados cinco parâmetros:

1. Homogeneidade do RAP

Uma boa homogeneidade do RAP, sobretudo um consistente teor de ligante é importante para garantir que a dosagem de AR determinada no projeto da mistura seja representativa durante a produção na usina.

2. Dosagem de AR

A dosagem ótima de AR deve ser determinada em laboratório e, posteriormente, confirmada após testes na usina para verificar possíveis efeitos de produção na mistura.

3. Dispersão homogênea do AR

Uma dispersão homogênea de AR é importante para rejuvenescer todo o ligante do RAP e evitar locais com ligantes moles e outros mais duros.

O AR irá dissipar-se uniformemente através do ligante virgem através de mistura mecânica. Assim, este fator é uma função do tempo de mistura. Na usina, a mistura mecânica é geralmente adequada para alcançar a dispersão uniforme do AR dentro da mistura reciclada. Quanto maior o tempo de mistura, melhor a dispersão (Martin *et al.*, 2015).

4. Difusão do AR no ligante envelhecido

Difusão é o processo em que um constituinte passa de uma concentração maior para uma concentração mais baixa. Quando o AR está em contato direto com o material reciclado, o ligante envelhecido tende a absorver rapidamente qualquer líquido do tipo hidrocarboneto do AR devido ao mecanismo de difusão (Martin *et al.*, 2015). Uma boa difusão do AR no ligante do RAP é importante para garantir propriedades homogêneas do ligante.

Carpenter & Wolosick (1980) sugerem que o mecanismo de difusão do AR no ligante envelhecido ocorrerá seguindo-se quatro etapas:

- 4.1. O AR forma uma camada de viscosidade muito baixa que envolve o ligante envelhecido que cobre as partículas de material reciclado.
- 4.2. A difusão do AR começa na camada externa do ligante envelhecido e começa a amolecê-lo. A quantidade de AR que envolve as partículas de material reciclado diminui à medida que o processo de difusão continua.
- 4.3. Com o tempo, a difusão do AR para o ligante envelhecido continua, diminuindo-se a viscosidade da camada interna, e aumentando-se a viscosidade da camada externa da partícula de material reciclado.
- 4.4. Chega-se a um equilíbrio após um certo tempo.

5. Mistura (*blending*) dos materiais

Certificar-se que o ligante do RAP está “ativo” para se misturar aos outros materiais e garantir um recobrimento homogêneo dos agregados.

2.3.3 Ativação e interação do ligante do RAP

O ligante residual do RAP só poderá ser reaproveitado se for possível mobilizá-lo, ou seja, torná-lo menos viscoso para poder se misturar com o ligante virgem. A terminologia que tem sido adotada para descrever esse mecanismo e quantificar o grau de ativação e interação do ligante do RAP são: *Degree of binder activity (DoA)* e *Degree of blending (DoB)*. O primeiro termo indica a quantidade de ligante do RAP que se torna fluido e está “ativo” (disponível) na mistura, enquanto que o segundo, indica quão bem o ligante ativo realmente se mistura com o novo. Mesmo se o ligante do RAP estiver completamente ativo, uma mistura completa e homogênea pode não ocorrer (Kaseer *et al.*, 2019).

A ativação do ligante do RAP pode ser assumida de três maneiras diferentes: (a) 0% ativação, neste caso o RAP é tratado como “*black rock*”, ou seja, apenas um agregado negro; (b) 100% ativação ou (c) ativação parcial.

Nos métodos de dosagem das misturas recicladas, têm-se assumido que ocorra 100% de ativação do ligante do RAP. Atualmente, diversos estudos têm sido realizados na tentativa de se determinar em que grau ocorre a interação entre os ligantes na mistura reciclada.

2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO E DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE OU MORNA

A seguir, são apresentados alguns resultados de pesquisas de diversos autores, envolvendo a avaliação do comportamento mecânico e desempenho de misturas asfálticas com diferentes teores de RAP. A apresentação dos resultados das pesquisas foi realizada separando-se em dois grandes grupos: baixos ($\leq 25\%$) e altos ($> 25\%$) teores de RAP.

2.4.1 Resistência à tração

Com relação à resistência à tração, os resultados das pesquisas apresentaram-se contraditórios, conforme pode ser observado na Tabela 8. No estudo realizado pelos autores Arshad *et al.* (2016), na Malásia, foram dosadas misturas com 0, 15, 25 e 35% de RAP, avaliando-se as propriedades Marshall e a susceptibilidade à umidade. Verificou-se que, o aumento de RAP diminuiu os valores de resistência à tração tanto nas condições seca quanto úmida, para todos os teores de material reciclado. A mesma tendência foi observada por Islam *et al.* (2014), que avaliaram misturas com 0 e 35% RAP, concluindo que o valor de resistência à tração indireta (*Indirect Tensile Strength* – ITS) diminuiu para as misturas com 35% RAP. Já para Huang *et al.* (2004) que avaliaram misturas com 0, 10, 20 e 30% RAP; Shah *et al.* (2007) cujas misturas continham 15, 25 e 40% de RAP; Centofante (2016) para misturas com 0, 10, 20 e 30% RAP e Bohn (2017) para misturas com 0, 25 e 50% RAP (tanto com ligantes asfálticos do tipo CAP 50/70, quanto CAP 60/85) na técnica morna, os resultados de resistência aumentaram, tanto para baixos, quanto para altos teores de RAP. Um aumento da resistência para as misturas com altos teores de RAP (30, 40 e 50%) de dois distritos diferentes, também foi observado por Al-Qadi *et al.* (2012).

Tabela 8 – Resistência à tração de misturas asfálticas com RAP

Autor	Até 25%	Resultado	Acima 25%	Resultado
Arshad <i>et al.</i> (2016)	x	diminuiu	x	diminuiu
Islam <i>et al.</i> (2014)			x	diminuiu
Huang <i>et al.</i> (2004)	x	aumentou	x	aumentou
Shah <i>et al.</i> (2007)	x	aumentou	x	aumentou
Al-Qadi <i>et al.</i> (2012)			x	aumentou
Centofante (2016)	x	aumentou	x	aumentou
Bohn (2017)	x	aumentou	x	aumentou

2.4.2 Rigidez

Quanto à rigidez das misturas com RAP, os resultados das pesquisas apontam que, de modo geral, há um aumento dos módulos de resiliência e dinâmico, para misturas

com maiores teores de RAP. Os autores alegam que o aumento de rigidez devido à presença do ligante envelhecido e duro do RAP.

No estudo realizado por Gardiner & Wagner (1999), as misturas recicladas continham apenas 15% de RAP, provenientes de Georgia e Minnesota. Os resultados do ensaio de módulo de resiliência (realizado nas temperaturas de 4, 25 e 40°C) foram maiores para as misturas com RAP.

Alguns anos mais tarde, tanto para Sondag *et al.* (2002), quanto para West *et al.* (2012), foram verificados aumento nos valores dos módulos para as misturas com altos teores de RAP. No estudo realizado pelos últimos autores, os resultados foram obtidos a partir das diversas seções de pavimento, na pista de teste do programa de pesquisa de pavimentação, operada pela *National Center for Asphalt Technology* - NCAT. Dentre as seções, existem as com misturas asfálticas com 50% RAP HMA (reciclado a quente), 50% RAP WMA (reciclado morno) e 0% RAP (mistura de controle). Os módulos foram obtidos a partir da retroanálise de um levantamento de *falling weight deflectometer* - FWD, dependendo da temperatura do pavimento na profundidade média e, no geral, as seções com altos teores de RAP apresentaram maior módulo em todas as temperaturas devido a presença de ligante envelhecido.

Tanto Centofante (2016), investigando misturas com 20 e 30% RAP com relação à mistura de referência na técnica quente, quanto Bohn (2017) para misturas com 0, 25 e 50% RAP (tanto com ligantes asfálticos do tipo CAP 50/70, quanto CAP 60/85) na técnica morna, verificaram um aumento do módulo de resiliência nas misturas com baixos e altos teores de RAP. Apenas para Arshad *et al.* (2016), os módulos para misturas com baixos teores de RAP foram menores.

Já com relação ao módulo dinâmico, todos os autores, Shah *et al.* (2007), Al-Qadi *et al.* (2012), Mogawer *et al.* (2012), West *et al.* (2013), Centofante (2016) e Bohn (2017), observaram aumento dos valores sobretudo para as misturas com altos teores de RAP.

Tabela 9 – Módulo de resiliência de misturas asfálticas com RAP

Autor	Até 25%	Resultado	Acima 25%	Resultado
Gardiner & Wagner (1999)	x	aumentou		
Sondag <i>et al.</i> (2002)			x	aumentou
West <i>et al.</i> (2012)			x	aumentou
Arshad <i>et al.</i> (2016)	x	diminuiu	x	diminuiu
Centofante (2016)	x	aumentou	x	aumentou
Bohn (2017)	x	aumentou	x	aumentou

Tabela 10 – Módulo dinâmico de misturas asfálticas com RAP

Autor	Até 25%	Resultado	Acima 25%	Resultado
Shah <i>et al.</i> (2007)	x	diminuiu	x	aumentou
Al-Qadi <i>et al.</i> (2012)			x	aumentou
Mogawer <i>et al.</i> , 2012	x	aumentou	x	aumentou
West <i>et al.</i> (2013)			x	aumentou
Centofante (2016)	x	aumentou	x	aumentou
Bohn (2017)	x	aumentou	x	aumentou

2.4.3 Deformação permanente

Com respeito à avaliação de resistência à deformação permanente de misturas recicladas, embora os tipos de ensaios/equipamentos tenham sido diferentes entre os autores, nota-se uma tendência de aumento deste parâmetro para as misturas com RAP, conforme apresenta a Tabela 11.

Tabela 11 – Resistência à deformação permanente de misturas asfálticas com RAP

Autor	Até 25%	Resultado	Acima 25%	Resultado
Gardiner & Wagner (1999)	x	aumentou		
West <i>et al.</i> (2012)			x	aumentou (campo)
			x	diminuiu (laboratório)
Al-Qadi <i>et al.</i> (2012)			x	aumentou (laboratório)
Izaks <i>et al.</i> (2015)			x	aumentou
Centofante (2016)	x	aumentou	x	aumentou
Bohn (2017)	x	aumentou	x	aumentou

Gardiner & Wagner (1999), assim como determinaram o módulo de resiliência, também realizaram um ensaio para verificação da resistência à deformação permanente e verificaram que, para ambos os materiais empregados na pesquisa,

tanto de Georgia quanto de Minnesota, houve uma diminuição do potencial de afundamento.

No estudo realizado pela NCAT, West *et al.* (2012) compararam a resistência à deformação permanente de misturas com 50% RAP HMA, 50% RAP WMA e 0% RAP (mistura de controle). Em laboratório, foi realizado o teste utilizando o APA (*Asphalt Pavement Analyzer*). Os resultados indicaram que as misturas com 50% RAP HMA e a mistura de controle ficaram abaixo do critério máximo de 5,5 mm para tráfego pesado. No entanto, a mistura 50% WMA ficou ligeiramente acima do critério. Além desse teste, também foi realizado o ensaio de *Flow Number*. As médias dos resultados, tanto para a 50% HMA quanto para a mistura convencional ficaram superiores ao valor mínimo de 53, recomendado para projetos de misturas entre 3 e 10 milhões de *ESALs (Equivalent Single Axle Load)*, de acordo com a *NCHRP Report 673*. Já para misturas mornas, o critério recomendado é de 30, tendo a mistura 50% RAP WMA atendido o mesmo. Apesar de ambos os resultados laboratoriais terem indicado que a mistura convencional é a mais resistente à deformação permanente, os resultados do campo não corresponderam aos de laboratório. Na pista de teste da NCAT, a seção de controle apresentou a maior trilha de roda, com 7,1mm, enquanto que para as misturas com 50% RAP HMA e 50% RAP WMA foram de 1,8mm e 3,7 mm.

Ainda, através do ensaio de *Flow Number*, Centofante (2016) e Bohn (2017), verificaram um aumento do FN conforme o teor de RAP também aumenta de 0, 10, 20 a 30% na técnica a quente, e 0, 25 a 50% na técnica morna, respectivamente.

Para avaliar este mesmo parâmetro, Al-Qadi *et al.* (2012) e Izaks *et al.* (2015) realizaram o ensaio com o *wheel tracking*, verificando uma redução do potencial de afundamento de trilha de roda para misturas com altos teores de RAP.

2.4.4 Fadiga

Os resultados dos ensaios para previsão da vida de fadiga de misturas recicladas são bastante divergentes, como pode ser observado na Tabela 12. Vale considerar que existem diversos tipos de ensaios e metodologias que podem ser aplicados para avaliar esse comportamento, o que pode ter tornado a comparação mais difícil.

Tabela 12 – Vida de fadiga de misturas asfálticas com RAP

Autor	Até 25%	Resultado	Acima 25%	Resultado
Huang <i>et al.</i> (2004)	x	aumentou	x	diminuiu
Tomlinson (2012)	x	aumentou	x	inconclusivo
West <i>et al.</i> (2012)			x	aumentou
Al-Qadi <i>et al.</i> (2012)			x	aumentou
Nozouri <i>et al.</i> (2014)			x	similar (Vermont)
			x	diminuiu (Manitoba)
			x	aumentou (NCAT)
Wang <i>et al.</i> (2018)	x	diminuiu	x	diminuiu (FHWA)

Huang *et al.* (2004) avaliaram misturas com 0, 10, 20 e 30% RAP e observaram que as misturas com baixos teores apresentaram uma maior rigidez e resistência à fadiga, porém a mistura com 30% de RAP teve seu desempenho comprometido. Da mesma forma, Tomlinson (2012) verificou que a mistura com baixo teor de RAP (20%) aumentou a vida de fadiga, no entanto o resultado foi inconclusivo para a mistura com 40% de RAP.

Já no estudo realizado por West *et al.* (2012), não foi observado nenhum trincamento nas seções da pista teste da NCAT. Foi, então, realizado o ensaio de flexão de viga apoiada em quatro pontos das misturas usinadas com 50% RAP HMA, 50% WMA e a mistura de controle. Os resultados indicaram que um melhor desempenho era esperado nas seções com altos teores de RAP do que na seção de controle, devido ao nível de deformação mais baixo, e correspondentes funções de transferência de fadiga. Al-Qadi *et al.* (2012) também obtiveram aumento de vida de fadiga para misturas com altos teores de RAP (30, 40 e 50%).

Norouzi *et al.* (2014) avaliaram a vida de fadiga de misturas asfálticas com altos teores de RAP produzidas em usinas. Nesse estudo, foi usado o critério de falha por fadiga desenvolvido para o modelo de dano contínuo viscoelástico simplificado (sigla em inglês, S-VECD), baseado na energia da pseudo-deformação, para avaliar o efeito da incorporação de alto teor de RAP no comportamento de fadiga de misturas asfálticas. Para misturas obtidas de Vermont (EUA), a incorporação de altos teores de RAP (até 40%) não levou a uma diferença significativa na resistência à fadiga. Os resultados das curvas mestras de módulo dinâmico e as curvas características de dano das misturas com RAP foram muito próximos dos da mistura virgem, indicando que o

desempenho de fadiga das misturas seria similar. Essa similaridade sugere que a mistura/interação do ligante do RAP com o ligante virgem está trabalhando tão bem quanto um ligante virgem sozinho. No entanto, para misturas obtidas de Manitoba (Canadá), um aumento na porcentagem de RAP para 50% levou a uma diminuição considerável na resistência à fadiga. Apesar disso, o uso de um ligante mais mole (no caso, PG 52-34) melhorou a resistência à fadiga, sugerindo que o uso de um ligante mais mole em misturas com alto teor de RAP pode compensar a diminuição da resistência à fadiga.

Wang *et al.* (2018) concluíram que o desempenho das misturas com RAP depende do projeto da mistura e também da estrutura do pavimento. O estudo dos autores foi baseado em dois testes de carregamento acelerado realizados nos Estados Unidos. O primeiro foi conduzido na pista de teste da NCAT, tendo uma seção de controle e outra com uma mistura com 50% RAP. Já o segundo teste foi realizado nas pistas de teste da *Federal Highway Administration Accelerated Loading Facility* - FHWA ALF, em Virginia, com uma faixa de controle e outras com 20 e 40% RAP. As misturas asfálticas dos testes foram caracterizadas utilizando o modelo de dano contínuo viscoelástico simplificado. Além disso, o desempenho de fissuração por fadiga foi modelado no FlexPAVETM usando as propriedades dos materiais, as estruturas do pavimento *in situ*, as cargas de tráfego e as condições climáticas. A seção da NCAT com RAP apresentou menos dano de fadiga que a seção de controle e em ambas as seções, o trincamento de baixo para cima dominou o dano devido à fadiga. Já na pista da FHWA, a seção de controle apresentou menos dano de fadiga que as outras que continham material reciclado, em todas as seções com trincamento, tanto de cima para baixo, quanto de baixo para cima. Dessa forma, tanto os resultados da simulação, como as observações de campo, mostraram que o desempenho de trincamento por fadiga das misturas que continham RAP diferiam de acordo com a estrutura do pavimento e a qualidade de resistência à trinca por fadiga da mistura.

3. ANÁLISE LABORATORIAL

A análise laboratorial da presente dissertação contempla a dosagem e a caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente contendo diferentes teores de material fresado.

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias, as normas utilizadas para a realização de cada ensaio e uma discussão sobre os resultados obtidos. Os ensaios mecânicos foram realizados no laboratório do Centro de Pesquisa Rodoviária (CPR), localizado na Concessionária CCR NovaDutra, em Santa Isabel/SP.

Em uma primeira fase da pesquisa, foram avaliadas misturas asfálticas densas com ligante asfáltico convencional (CAP 30/45), variando-se o teor de material fresado em 10, 20, 25, 35, 50 e 65% RAP, sem adição de agente rejuvenescedor. Os resultados foram comparados com relação à mistura de controle (0% RAP). Já na segunda fase, foi realizada a adição de um agente rejuvenescedor (um óleo de base vegetal modificado) nas misturas asfálticas com 25 e 50% RAP, a fim de avaliar o seu efeito em misturas com baixo e alto teor de RAP. A Tabela 13 apresenta a identificação das misturas asfálticas recicladas avaliadas nessa pesquisa.

Tabela 13 – Identificação das misturas asfálticas com diferentes teores de RAP

Fase	Identificação	Tipo de mistura asfáltica
1	M0	0% de RAP (controle)
	M10	10% de RAP
	M20	20% de RAP
	M25	25% de RAP
	M35	35% de RAP
	M50	50% de RAP
	M65	65% de RAP
2	M25 AR	25% de RAP e agente rejuvenescedor
	M50 AR	50% de RAP e agente rejuvenescedor

Na Figura 18 são apresentadas as etapas de laboratório com os ensaios realizados no CPR: resistência à tração por compressão diametral (RT), dano por umidade induzida (DUI), módulo de resiliência (MR), módulo dinâmico (MD), ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do *flow number* (FN) e fadiga na flexão de quatro pontos.

Figura 18 – Etapas de laboratório

Legenda:

RT – Resistência à tração (DNIT ME-136/2018)

DUI – Dano por umidade induzida (AASHTO T 283/2014)

MR – Módulo de resiliência (DNIT ME-135/2018)

MD – Módulo dinâmico (AASHTO T 342/2011)

FN – *Flow number* (NBR 16505/2016)

Fadiga – fadiga na flexão de quatro pontos (AASHTO T 321/2017)

3.1 COLETA DE AMOSTRAS DE RAP

A coleta do RAP foi realizada no dia 12 de julho de 2017 (um dia sem chuva) em um estoque de material fresado pertencente à Concessionária CCR SPVias, localizado no km 131, pista Leste, da Rodovia Raposo Tavares (SP-270). Conforme pode ser observado na Figura 19a, o estoque continha predominantemente materiais asfálticos e não apresentava vestígios de outros tipos de materiais como concreto, madeira, ou solo. Visualmente, era possível distinguir um material com um aspecto mais fino e outro mais graúdo (Figura 19c, 19d). Com o objetivo de se avaliar uma possível diferença de granulometria dos materiais e também obter uma maior representatividade do estoque, foram coletadas amostras de 3 lugares distintos das pilhas (Figura 19b), identificadas como Amostra 1, 2 e 3.

As amostras foram coletadas com o auxílio de uma escavadeira, tomando-se o cuidado de coletar todo o horizonte da pilha (desde o topo até a base), e evitando-se o risco de contaminação com o solo subjacente do apoio. O material foi

homogeneizado e posteriormente coletado com pás, e embrulhados em sacos plásticos. No total, foram coletados cerca de 500 kg de material que posteriormente foram encaminhados ao laboratório do CPR. A sequência da coleta das amostras é apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Coleta de amostras de RAP. (a) Bota espera do km 131, pista Leste, SP-270; (b) Local de coleta das Amostras 1, 2 e 3; (c) Aspecto do material mais fino; (d) Aspecto do material mais gráudo; (e) Operação de escavação das pilhas; (f) Exemplo de horizonte da pilha da Amostra 1; (g) Homogeneização do material; (h) Amostras prontas para envio ao CPR

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

Fonte: Autora (2017).

Embora não tenha sido possível realizar o rastreamento da procedência exata dos materiais fresados, as amostras coletadas são provenientes das obras de fresagem do revestimento asfáltico da própria Rodovia Raposo Tavares.

No projeto do pavimento da pista principal da duplicação da SP-270, a camada de revestimento original era composta por 4 cm de concreto asfáltico com graduação descontínua e com asfalto borracha, e 8 cm de concreto asfáltico com faixa granulométrica denominada “Faixa 1 (19 mm)” e ligante asfáltico não modificado. Cabe ressaltar que, o conhecimento da presença de um ligante modificado com borracha foi fundamental para uma melhor interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 RAP

Inicialmente, foi realizada a caracterização das três amostras de RAP, considerando-se a massa específica máxima medida (G_{mm}), o teor de ligante e a granulometria (antes e após extração do ligante). As G_{mms} foram determinadas conforme a AASHTO T 209 (2012) e os valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Massa específica máxima medida das amostras de RAP

G_{mm} (g/cm³)		
Am 1	Am 2	Am 3
2,71	2,57	2,57

A extração do ligante asfáltico foi realizada pela queima do material fresado em uma estufa de ignição (*ignition oven*) conforme a AASHTO T 308 (2018). A partir disto, foi calculado o valor da massa específica aparente do agregado do RAP, conforme as equações apresentadas no Item 2.3.1.2. No caso, os valores assumidos para a massa específica do ligante asfáltico e absorção do ligante do RAP foram de 1,01 g/cm³ e 0,50%, respectivamente. Na Tabela 15 são apresentados os parâmetros adotados para as Amostras 1, 2 e 3.

Tabela 15 – Massa específica aparente do agregado do RAP

Parâmetro	Designação	Amostra		
		1	2	3
Massa específica máxima medida do RAP (g/cm ³)	$G_{mm(RAP)}$	2,71	2,57	2,57
Teor de ligante asfáltico do RAP (%)	$P_{b(RAP)}$	5,39	6,16	6,12
Massa específica do ligante asfáltico do RAP (g/cm ³)	$G_{b(RAP)}$	1,01	1,01	1,01
Massa específica efetiva do agregado do RAP	$G_{se(RAP)}$	2,99	2,86	2,85
Absorção do ligante asfáltico do RAP (%) - valor	$P_{ba(RAP)}$	0,50	0,50	0,50
Massa específica aparente do agregado do RAP	$G_{sb(RAP)}$	3,07	2,93	2,92

As amostras de RAP foram peneiradas conforme a metodologia do DNER-ME 083/98 para obtenção das curvas granulométricas, antes e após a extração do ligante, e são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 – Granulometria das amostras de RAP, antes e após extração de ligante (laboratório)

Da Figura 20 observa-se que, embora visualmente houvesse uma diferença de tamanho dos grumos do RAP (Amostra 3 antes da extração do ligante apresentava uma curva granulométrica um pouco mais fina com relação às Amostras 1 e 2), após a extração do ligante, verifica-se que, as curvas granulométricas são bastante semelhantes umas às outras. Além disso, após a extração do ligante asfáltico, nota-

se que o material fica mais próximo de se enquadrar novamente nas faixas granulométricas especificadas pelo DER/SP, não indicando ter havido uma quebra considerável dos agregados durante a operação de fresagem, que aumentasse o teor de finos.

3.2.2 Materiais virgens

Os agregados virgens utilizados para compor as misturas tiveram procedência da Pedreira Sanson, localizada na cidade de Tatuí/SP. Foram utilizados agregados do tipo basalto, sendo estes: brita 1, pedrisco e pó de pedra. Em todas as misturas foi adicionado cal hidratada (CH-1) como *filler* e melhorador de adesividade. Já o ligante asfáltico foi do tipo convencional, classificado por penetração como CAP 30/45. Conforme visto no item 2.3, segundo a dosagem americana para misturas recicladas, a escolha do ligante virgem é realizada com base nas propriedades para se alcançar um determinado desempenho. No entanto, nesta pesquisa, ao invés de utilizar um ligante virgem de menor viscosidade, optou-se pela utilização do ligante convencional CAP 30/45 para se observar o efeito do RAP nas dosagens e no comportamento mecânico das misturas. Nas Tabela 16 e Tabela 17 são apresentadas as características dos agregados e do ligante asfáltico virgem, respectivamente.

Tabela 16 – Caracterização dos agregados virgens

Característica	Método	Brita 1	Pedrisco	Pó de pedra
Massa específica real (g/cm ³)	AASHTO T85 (2014) e AASHTO T84 (2013)	2,980	3,003	3,005
Massa específica aparente (g/cm ³)	AASHTO T85 (2014) e AASHTO T84 (2013)	2,884	2,861	2,860
Absorção (%)	AASHTO T85 (2014) e AASHTO T84 (2013)	1,1	1,7	1,7

Tabela 17 – Caracterização do ligante asfáltico virgem

Característica	Método	Especificação (DNIT 095/2006)	CAP 30/45
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576	30-45	33
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	mín. 52	54
Massa específica a 25°C (g/cm³)	AASHTO T228 (2009)	-	1,011
Viscosidade Brookfield a 135 °C (cP)	NBR 15184	mín. 374	465
Viscosidade Brookfield a 150 °C (cP)	NBR 15184	mín. 203	233
Viscosidade Brookfield a 177 °C (cP)	NBR 15184	76-285	82

Tabela 18 – Caracterização da cal hidratada

Propriedade	Cal CH-1
Densidade aparente	0,5
Retido acum. 0,600 mm (%)	≤ 0,5
Retido acum. 0,075 mm (%)	≤ 10,0
(CaO + MgO) _t (%)	≥ 90,0
Ca(OH) ₂ (%)	≥ 85,0
MgO (%)	≤ 5,0
CO ₂ (%)	≤ 5,0
SiO ₂ + RI (%)	≤ 0,25

3.2.3 Agente rejuvenecedor

O agente rejuvenecedor utilizado nessa pesquisa é o produto Anova™ 1815, cedido pela empresa Cargill, para a realização dos testes no laboratório e no campo. Trata-se de um óleo de base vegetal modificado, com o objetivo de obter alta compatibilidade com o asfalto, especialmente com o betume envelhecido ou oxidado, e de melhorar a durabilidade e a resistência ao trincamento. Na Tabela 19 são apresentadas as características do produto.

Tabela 19 – Caracterização do agente rejuvenecedor

Característica	Método	Especificação	Resultado
Viscosidade a 40°C (cSt)	ASTM D2196	45 - 60	48
Densidade a 20°C	ASTM D1475	0,92 - 0,95	0,927
Aspecto/aparência	Visual	Líquido escuro	Líquido escuro
Ponto de fulgor (°C)	ASTM D92	Mínimo 290	310

Com relação à incorporação do produto na usina, o fornecedor recomenda que o AR seja injetado na linha do ligante. O sistema de dosagem é similar àquele usado para aditivos líquidos *anti-stripping*. Alternativamente, podem ser utilizadas barras de pulverização.

3.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na determinação de um teor “ótimo” de ligante, ou teor de projeto, a partir de uma faixa granulométrica pré-estabelecida (Bernucci *et al.*, 2007). Neste estudo, para a dosagem das misturas asfálticas recicladas foi escolhido o Método Marshall, de compactação por impacto, por ser o procedimento mais comum e utilizado no Brasil. Seguiu-se a norma DNER-ME 043/95, tendo como referência a Faixa III da DERSA (1997).

Inicialmente, foi feita a separação do material fresado em duas frações: retido na peneira 3/8" e passante na peneira 3/8", conforme ilustra a Figura 21, a fim de obter um melhor controle da granulometria do material fresado na mistura reciclada.

Figura 21 – Fracionamento do RAP. (a) material retido na peneira 3/8"; (b) material passante na peneira 3/8"

Fonte: Autora (2017).

O RAP foi mantido em estufa a 45° por um período de 48 horas para a remoção da umidade. Para as misturas com baixos teores de RAP (10, 20 e 25%), os agregados virgens foram superaquecidos a 185°C, e o material fresado foi introduzido em

temperatura ambiente de modo a simular o processo de usinagem em que o RAP é aquecido pela transferência de calor dos agregados virgens superaquecidos. O CAP 30/45 se manteve em temperatura normal, determinada pelo viscosímetro Brookfield (aproximadamente 155°C). Dessa forma, atingiu-se uma temperatura final de mistura entre 150 e 155°C.

Já para as misturas com maiores teores de RAP (35, 50 e 65%), os agregados virgens foram aquecidos convencionalmente, 10°C acima da temperatura normal do CAP (à 165°C). O RAP foi aquecido (condicionado) até atingir a temperatura de 150°C, durante um período de 2 horas, de modo a simular o pré-aquecimento em usinas adaptadas com tambor secador especial para material reciclado, obtendo-se uma temperatura final de mistura entre 150 e 155°C.

Todas as misturas foram mantidas em estufa por 2 horas antes da compactação para simulação de envelhecimento de curto prazo. Em seguida, foi realizada a compactação Marshall (em equipamento automático), com 75 golpes de cada lado do corpo de prova, visando obter um projeto de mistura com volume de vazios de 4%. A Figura 22 apresenta as curvas granulométricas finais das misturas com os diferentes teores de RAP e os limites, máximos e mínimos, tanto da DERSA quanto do DER/SP.

Figura 22 – Curvas granulométricas das misturas recicladas

Os parâmetros volumétricos das misturas foram calculados utilizando os dados apresentados na Tabela 15 (Massa específica aparente do agregado do RAP) e as massas específicas dos agregados virgens, determinadas convencionalmente. Assim, na Tabela 20 são apresentadas as massas específicas e os parâmetros volumétricos das misturas: volume de vazios (V_v), volume de vazios nos agregados minerais (VAM), e a relação betume/vazios (RBV).

Tabela 20 – Parâmetros volumétricos das misturas recicladas

Mistura	Teor de projeto de CAP virgem (%)	G_{mb} (g/cm ³)	G_{mm} (g/cm ³)	V_v (%)	VAM (%)	RBV (%)
M0	4,9	2,57	2,68	4,2	16	74
M10	4,7	2,53	2,64	4,4	16	72
M20	3,9	2,53	2,64	4,2	14	70
M25	3,8	2,53	2,64	4,2	14	69
M35	3,5	2,53	2,64	4,4	13	66
M50	2,8	2,50	2,62	4,2	12	65
M65	2,4	2,51	2,63	4,4	11	60

Visando verificar se as misturas asfálticas com os diferentes teores de RAP, variando de 10 a 65%, atendem aos requisitos de misturas asfálticas densas recicladas das especificações de serviço/execução do DNIT, DER/SP e Prefeitura Municipal de SP, na Tabela 21 são apresentados os parâmetros volumétricos estabelecidos para as camadas de rolamento e de ligação (*binder*).

Tabela 21 – Parâmetros volumétricos das especificações de serviço para concreto asfáltico reciclado

Parâmetro	DNIT		DER/SP		Prefeitura SP		Superpave
	ES 033/2005 (reciclado)		ET-DE-P00/032 (reciclado)		IE – 07/2010 (reciclado)		
	Camada de rolamento	Camada de ligação (binder)	Camada de rolamento	Camada de ligação (binder)	Camada de rolamento	Camada de ligação (binder)	
V _V (%)	3 a 5	4 a 6	4	4 a 6	-	4 a 7	4
RBV (%)	75 a 82	65 a 72	65 a 80	65 a 75	-	65 a 75	65 a 75
VAM (%)	* >16 para tamanho nominal máximo do agregado 1/2"		* >14 para tamanho nominal máximo do agregado 1/2"		* >14 para tamanho nominal máximo do agregado 1/2"		>11

Confrontando-se os resultados obtidos nas dosagens (Tabela 20), com os valores limites estabelecidos pelas especificações indicadas na Tabela 21, chegam-se as seguintes conclusões:

- Todas as misturas atenderam ao parâmetro de volume de vazios.
- Com base na especificação de serviço do DNIT, para o parâmetro de RBV, nenhuma mistura atendeu para o uso em camada de rolamento, nem mesmo a mistura convencional. No entanto, as misturas com 20, 25, 35 e 50% RAP atenderam para camada de *binder*. Do ponto de vista do VAM, apenas a mistura convencional atendeu a especificação, com o tamanho nominal máximo do agregado em 1/2".
- Já em relação à especificação técnica do DER/SP, para o parâmetro RBV, apenas a mistura com 65% não atendeu para camada de rolamento e de *binder*. Tendo em vista o parâmetro VAM, apenas as misturas com até 20% de RAP atenderam ao limite especificado.
- Para a Prefeitura de São Paulo, com relação ao RBV, apenas a mistura com 65% RAP não atendeu ao requisito. E com relação ao VAM, as misturas com até 20% de material reciclado atenderam ao limite mínimo.
- Embora as compactações dos corpos de prova tenham sido realizadas através do Método Marshall (por impacto) e a metodologia *Superpave* utilize um compactador giratório, observa-se que, conforme a especificação americana, para um $V_v=4\%$, o VAM deve ser maior que 11% e o RBV deve variar de 65 a 75%. Dessa forma, as misturas com até 50% de RAP atenderiam à especificação americana em relação ao VAM e RBV.

Durante a dosagem das misturas, determinou-se que, para a mistura convencional, sem adição de material fresado, o teor ótimo de ligante foi de 4,9%. A partir disso, calculou-se o teor de CAP virgem, considerando total ativação do ligante remanescente no RAP e mistura dos materiais, novo e envelhecido (100% *blending*), representado pela linha tracejada em vermelho na Figura 23 a seguir. No entanto, observa-se que, a quantidade de ligante virgem adicionada às misturas, com base nos vazios de 4%, foi acima da calculada, especialmente para as quantidades maiores de RAP.

Com base nos teores de ligante virgem adicionados às misturas, resultantes das dosagens Marshall, estimou-se o teor de ligante do RAP, através de regressão linear, resultando em aproximadamente 4%, conforme a equação $y = -0,04x + 4,8864$, apresentada na Figura 23. Isso pode ser um indício de que a ativação do ligante não foi completa, como também representar as diferentes características das propriedades do ligante virgem e misturado (virgem + envelhecido), devendo ser avaliado em estudos futuros.

Apesar disso, uma significativa economia de ligante virgem de 4, 20, 22, 29, 43 e 51% foi obtida para as misturas com 10, 20, 25, 35, 50 e 65% de RAP, respectivamente.

Com relação à dosagem do agente rejuvenescedor, segundo a ficha de dados do produto, o Anova™ 1815 geralmente é adicionado com dosagens de 0,25 a 6% do peso do ligante, dependendo do teor de RAP e/ou da melhoria do grau de desempenho (*Performance Grade* - PG) do ligante. O nível de adição pode variar com base na fonte e qualidade do ligante virgem e deve ser determinado de acordo com as especificações locais.

Nessa pesquisa, a dosagem do agente rejuvenescedor foi realizada pela própria empresa fornecedora do produto. Para isso, foram enviadas algumas amostras das misturas não rejuvenescidas com 0, 25, 35, 50 e 65% de RAP ao laboratório da Cargill, localizado em Plymouth/MN, nos Estados Unidos. Foram caracterizados os ligantes de 3 (M0, M25 e M65) das 5 misturas para obter as propriedades de toda a gama. Os ligantes foram extraídos (ASTM D7906, 2014) e recuperados pelo método modificado de Abson (AASHTO R 59, 2011) para classificação do PG (NCHRP Report 452). Na Tabela 22 são apresentados os resultados dos ensaios realizados pela Cargill.

Tabela 22 – Caracterização dos ligantes recuperados das misturas com 0, 25 e 65% de RAP, realizado pela Cargill

Parâmetro	Método	% RAP		
		0	25	65
Teor de asfalto (%)	AASHTO R 59 (2011)	4,49	4,36	5,34
PG a alta temperatura (°C)	AASHTO T 315 (2012)	70,3	75,2	81,2
Ponto de amolecimento (°C)	ASTM D36 (2014)	63,9	69,0	74,3

Geralmente, conforme foi visto na pesquisa bibliográfica, quando se utiliza altos teores de RAP nas misturas, a preocupação é com relação à resistência ao trincamento. Como a Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), localizada no estado de São Paulo, na qual posteriormente seriam realizadas as construções dos trechos experimentais, é um caso em que as cargas e um alto volume de tráfego são experimentados junto com temperaturas relativamente elevadas, determinou-se que, a deformação permanente seria o parâmetro crítico de controle na aplicação do AR. Ao mesmo tempo, monitorou-se as propriedades de penetração e PG do ligante, para assegurar que uma boa durabilidade fosse alcançada.

Usando esta abordagem, a dosagem do AR foi baseada usando-se o PG do ligante a alta temperatura (*high temperature PG - HT PG*) como sendo o parâmetro de controle, e mantendo-o em um valor constante para todas as misturas com altos teores de RAP, passando-se para um PG-70, com uma margem de segurança (~73°C). O ponto de amolecimento também foi mantido constante (ensaio do anel e bola, em inglês, *R&B – ring and ball*), em aproximadamente 66°C, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Parâmetros de controle utilizados para a dosagem do agente rejuvenescedor: (a) PG a alta temperatura e (b) ponto de amolecimento

Fonte: Cedido e adaptado de Cargill (2018).

A partir disso, foram utilizados os *blending charts* para a dosagem final do agente rejuvenescedor. Segundo a empresa Cargill, em média, a cada 1% de rejuvenescedor que é adicionado, reduz-se o ponto de amolecimento (R&B) da mistura em aproximadamente 1,7°C. Assim, a dosagem do AR foi realizada utilizando-se a Equação 6:

$$T_{Blend} = RPBR \times T_{RAP} + (1 - RPBR) \times T_{Virgin} + \alpha(-1,7) \quad (\text{Eq.6})$$

Onde:

T_{Blend} = Temperatura crítica dos ligantes asfálticos misturados (°C)

$RPBR$ = Razão do ligante do RAP em relação ao teor total de ligante da mistura

T_{RAP} = Temperatura crítica do ligante recuperado do RAP (°C)

T_{Virgin} = Temperatura crítica do ligante asfáltico virgem (°C)

α = teor de agente rejuvenescedor (%)

Na Figura 25 apresentam-se os teores totais de AR dosados para as misturas com 25, 35, 50 e 65% de RAP, que pode ser tanto sobre o teor total, quanto o teor de ligante virgem da mistura.

Figura 25 – Dosagem final do agente rejuvenescedor (laboratório)

Fonte: Cedido e adaptado de Cargill (2018).

3.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE

3.4.1 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) foi realizado de acordo com o método de ensaio ME-136 do DNIT (2018). Para cada teor de RAP, foram moldados, em laboratório, três corpos de prova visando um volume de vazios de 4%. Os corpos de prova foram mantidos em estufa, a temperatura controlada de 25°C, por um período de 4 horas. Em seguida, utilizando-se uma prensa mecânica, foi aplicada uma carga vertical de compressão, até a ruptura completa do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Autora (2017).

A resistência à tração indireta do corpo de prova é obtida por meio do valor da carga de ruptura. Os resultados apresentados na Figura 27 representam a média aritmética das três determinações de RT, para cada tipo mistura, com mais ou menos um desvio padrão representado pela barra de erro.

Figura 27 – Resistência à tração das misturas com RAP, sem adição de agente rejuvenescedor ($V_v=4\%$)

Como pode ser observado, todos os valores de RT das misturas com RAP são maiores que o valor da mistura de controle. As resistências aumentaram até o teor de RAP atingir 50%, embora uma pequena redução tenha sido constatada para a mistura com 65% RAP, mas considerada insignificante levando-se em conta o desvio padrão dessas misturas.

Observa-se ainda que, o grupo das misturas com altos teores de RAP obtiveram valores mais elevados (25 a 30%) que a convencional, quando comparados ao grupo das misturas com baixos teores de RAP (10 a 14%).

Da literatura internacional sabe-se que, o processo de oxidação torna o ligante asfáltico mais quebradiço, com uma ruptura mais frágil. O aumento de RT das misturas com RAP é atribuído a uma maior quantidade de ligante oxidado na mistura. E, conforme mencionado anteriormente, a ativação de um ligante modificado (borracha) residual do RAP pode ter melhorado essa propriedade. Com relação ao volume de vazios, não houve uma variação que pudesse ser considerada relevante nessa avaliação, pois todos estiveram em torno de 4%.

Já na Figura 28 são apresentados os resultados de RT após adição de agente rejuvenescedor nas misturas com 25 e 50% RAP. É possível observar que a adição do AR aumentou um pouco o volume de vazios e reduziu os valores de RT, em ambas as misturas, porém ainda se apresentaram maiores quando comparados com a mistura de controle. Nota-se também que, a adição do AR na mistura com 50% de RAP aproximou muito o valor de resistência dessa mistura ao valor da convencional.

Figura 28 – Resistência à tração das misturas com 25 e 50% RAP, antes e após adição de agente rejuvenescedor ($V_v=4\%$)

A fim de verificar se as misturas atenderam ao parâmetro de RT estabelecido nas normas do DNIT, DER/SP e Prefeitura de SP, na Tabela 23 são apresentados os limites mínimos para as camadas de rolamento e de ligação (*binder*).

Tabela 23 – Especificações de serviço do concreto asfáltico convencional e reciclado para RT

Parâmetro	DNIT		DER/SP		PREFEITURA SP	
	ES 033/2005 (reciclado)		ET-DE-P00/032 (reciclado)		IE – 07/2010 (reciclado)	
	Camada de rolamento	Camada de binder	Camada de rolamento	Camada de binder	Camada de rolamento	Camada de binder
RT por compressão diametral estática a 25°C, mínima (MPa)	0,65	0,65	0,80	0,65	-	0,65

De acordo com a Tabela 23, observa-se que o valor mínimo de RT para camada de *binder* é igual para todos os órgãos (0,65 MPa). E, para camada de rolamento, o valor mínimo de RT é de 0,65 MPa para o DNIT; 0,80 MPa para o DER/SP e nenhum parâmetro é apresentado para a Prefeitura de SP. Desse modo, com relação à RT, constatou-se que todas as misturas com RAP (antes e após adição de agente rejuvenescedor) atenderam com folga aos limites mínimos de resistência à tração estabelecidos por esses órgãos.

3.4.2 Dano por umidade induzida (DUI)

O ensaio de resistência ao dano por umidade induzida (DUI) foi realizado em conformidade com a AASHTO T 283 (2014). A avaliação do dano causado pela umidade evidencia possíveis problemas de adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico, ou mesmo problemas de coesão. Os resultados desse ensaio podem ser analisados para prever a susceptibilidade de descolamento de película (*stripping*) da mistura a longo prazo e avaliar os aditivos líquidos melhoradores de adesividade que são adicionados ao ligante ou os sólidos em pó como, a cal-hidratada ou o cimento Portland, que são acrescentados aos agregados. O dano por umidade contribui para uma variedade de problemas, incluindo deformações permanentes, desgaste e trincamentos que diminuem o desempenho e a vida útil dos pavimentos.

Nesse estudo, para cada teor de RAP, foram moldados seis corpos de prova, sendo três para serem testados secos (Grupo 1 – sem condicionamento) e os outros três para serem testados após a saturação parcial e o condicionamento à água por um ciclo de congelamento/descongelamento dos corpos de prova (Grupo 2 – com condicionamento).

Antes da compactação, as misturas foram submetidas a um processo de cura em uma estufa a 60°C, por um período de 16 horas. Em seguida, as misturas permaneceram na estufa por mais 2 horas para atingir a temperatura de compactação e finalmente foram compactadas visando um volume de vazios de 7%.

Os corpos de prova do Grupo 1 foram envelopados em sacos plásticos, de modo a ficarem hermeticamente fechados e deixados em banho de água a 25°C por 2 horas. Em seguida, os sacos plásticos foram removidos para a medida da carga de ruptura e determinação da resistência à tração.

Já os corpos de prova do Grupo 2 foram condicionados, colocando-os em um recipiente com água destilada e aplicando-se pressão para saturação dos vazios entre 70 e 80%. Em seguida, os corpos de prova foram cobertos por um filme plástico e submetidos a um ciclo de congelamento (-18°C) por 16 horas. O descongelamento é realizado em banho de água a 60°C por mais 24 horas. Na sequência, os corpos de prova são colocados em banho de água a 25°C por 2 horas para finalmente serem

realizadas as medidas de resistência à tração. A Figura 29 ilustra alguns passos do procedimento de condicionamento dos corpos de prova.

Figura 29 – Ilustração do ensaio de dano por umidade induzida: (a) aplicação de pressão para saturação dos vazios com água; (b) congelamento (-18°C); e (c) aquecimento em banho de água para descongelamento (60°C)

(a)

(b)

(c)

Fonte: Autora (2017).

Os resultados apresentados nas Figura 30 e Figura 31 são as médias aritméticas de RT dos três corpos de prova, para cada teor de RAP, com mais ou menos um desvio padrão, do Grupo 1 e Grupo 2, respectivamente.

Figura 30 – Resistência à tração das misturas sem condicionamento em água ($V_v=7\%$)

Figura 31 – Resistência à tração das misturas com condicionamento em água ($V_v=7\%$)

Nas Figura 30 e Figura 31 observa-se que, em ambos os casos, sem e com o condicionamento dos corpos de prova, as misturas com 10 e 20% de RAP (baixos teores) apresentaram resistências menores que a mistura convencional. Nesse ensaio, embora tenha sido notado um aumento, de modo geral, do volume de vazios das misturas com RAP com relação à mistura de controle, apenas as misturas com 10 e 20% de RAP obtiveram resistências menores que o valor da mistura

convencional, com o aumento do V_v de 4% para 7%. Ou seja, o aumento do *target* para o volume de vazios impactou a resistência à tração nas misturas às quais o RAP não foi aquecido. Além disso, verifica-se que todas as misturas com altos teores de RAP apresentaram resistências maiores que a de controle, indicando que o condicionamento do material e/ou a ativação de um ligante modificado pode ter elevado a resistência das misturas. No caso particular da mistura com 25% RAP, sem o condicionamento em água, obteve-se uma resistência maior e, com o condicionamento, um resultado menor que o da mistura de controle. Ou seja, a mistura com 25% RAP parece estar no limite para o não aquecimento do RAP.

Após a adição de agente rejuvenescedor, observa-se na Figura 32 que, sem o condicionamento em água, o AR diminuiu a resistência à tração de ambas as misturas: 25 e 50% de RAP. Já com o condicionamento em água, o AR reduziu a RT da mistura com 50% de RAP, e a mistura com 25% apresentou um valor ligeiramente superior à mistura sem o AR.

Figura 32 – Resistência à tração das misturas sem condicionamento à água, após adição de AR ($V_v=7\%$)

Figura 33 – Resistência à tração das misturas com condicionamento à água, após adição de AR ($V_v=7\%$)

Tanto as especificações de serviço de concreto asfáltico reciclado do DNIT, do DER/SP, quanto da Prefeitura SP, estabelecem que, a razão da resistência à tração (RRT) por compressão diametral estática deve ser superior a 0,7 (ou seja, resistência ao DUI maior que 70%). A Figura 34 apresenta os valores de RRT das misturas com os diferentes teores de RAP.

Figura 34 – Razão de resistência à tração das misturas recicladas

Os resultados apontam que, mesmo que o comportamento mecânico das misturas com baixos teores de RAP tenha sido divergente das misturas com altos teores de RAP, o requisito de resistência à tração RT por compressão diametral com o efeito do dano por umidade induzida (DUI) foi atendido para todos os teores de RAP na mistura final. Vale considerar que todas as misturas contêm 1,5% de cal hidratada, que é um melhorador de adesividade, o que pode ter corroborado para os resultados obtidos.

3.4.3 Módulo de resiliência (MR)

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado conforme os procedimentos descritos na especificação DNIT 135/2018 – ME. O MR é definido como a relação entre a tensão e a deformação de tração gerada no ensaio de compressão diametral sob carga repetida. Para cada teor de material fresado foram moldados, em laboratório, três corpos de prova, executando-se o ensaio, a temperatura de 25°C, na máquina *Universal Testing Machine* (UTM-25), conforme ilustra a Figura 35.

Figura 35 – Ensaio de módulo de resiliência

Fonte: Autora (2018).

O resultado do ensaio é expresso como a média dos valores obtidos nos cinco últimos pulsos de carga dos três níveis de carga utilizados no módulo de resiliência. Na Figura 36 são apresentadas as médias aritméticas dos três corpos de prova com mais ou menos um desvio padrão, para as misturas com diferentes teores de RAP, sem adição de agente rejuvenescedor.

Figura 36 – Módulos de resiliência (a 25°C) das misturas recicladas, sem adição de AR

A partir da análise da Figura 36 é possível notar uma nítida diferença de comportamento entre as misturas com baixos (até 25%) e altos teores de RAP. Apesar de haver um aumento do módulo de resiliência entre as misturas com baixos teores de RAP, esses resultados foram menores com relação à mistura de controle. Já para as misturas com altos teores de RAP, observou-se um “salto” dos valores de MR quando comparadas com as misturas de baixos teores de RAP e a mistura convencional.

A maior rigidez das misturas com altos teores de RAP pode estar também relacionada com o fato do ligante proveniente do RAP ser mais envelhecido. No entanto, o condicionamento do material durante a dosagem, ou seja, o aquecimento do RAP pode ter influenciado os resultados. Neste caso, esse aquecimento pode ter provocado a ativação do ligante (modificado com borracha) residual do material reciclado, resultando em valores de módulo de resiliência mais elevados nas misturas com altos teores de RAP.

Já nas misturas com baixos teores de RAP, como o material reciclado não foi aquecido e, portanto, não ativou o ligante do RAP, resultou em uma diminuição dos módulos com relação à mistura convencional (observado inclusive pelo volume de vazios um pouco superior ao de projeto). Embora um valor de módulo de resiliência possa ser considerado como um parâmetro positivo em projetos de pavimento, uma rigidez muito elevada também pode ser prejudicial do ponto de vista de trincamento por repetição de carga. Assim, as demais propriedades, tais como resistência à fadiga e à deformação permanente das misturas contendo RAP devem ser avaliadas em conjunto.

Com relação ao volume de vazios, observa-se que, nas misturas com até 25% de RAP, nas quais o material foi incorporado em temperatura ambiente, eles foram maiores em relação à mistura convencional e uma redução do V_v foi observada para as misturas M50 e M65. Essa redução pode estar associada à facilidade de compactação dessas misturas devido à mobilização do ligante durante o seu aquecimento.

Após a adição do agente rejuvenescedor nota-se uma diferença de comportamento entre as misturas com baixo e alto teor de RAP, conforme apresentado na Figura 37. Na mistura com 50% de RAP, com o material aquecido, o AR diminuiu o valor de MR. De fato, o objetivo da adição de um agente rejuvenescedor é reduzir a viscosidade do ligante, indicando, neste caso, que o AR atendeu às expectativas. No entanto, quando o material reciclado não foi aquecido, a adição do AR aumentou o valor de MR da mistura com 25% RAP. Isso pode indicar que não houve uma mistura suficiente entre os materiais (ligante residual do RAP, ligante virgem e AR), o que pode ter ocasionado o aumento da rigidez da mistura.

Figura 37 – Módulos de resiliência (a 25°C) das misturas recicladas, após adição de AR

3.4.4 Módulo dinâmico (MD)

O ensaio de módulo dinâmico foi conduzido de acordo com os procedimentos prescritos na norma da AASHTO T 342 (2011). Para cada teor de RAP, foram ensaiadas três amostras. Os testes foram realizados utilizando a UTM-25 (ilustrada na Figura 38), aplicando-se um carregamento senoidal nas frequências de 0,1; 0,5; 1,0; 5; 10 e 25 Hz, a cada temperatura de 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4°C.

Figura 38 – Realização dos ensaios de módulo dinâmico na UTM-25

Fonte: Autora (2018).

A partir deste ensaio, foram construídas as curvas mestras utilizando o princípio da superposição tempo e temperatura. Os resultados do ensaio nas diferentes temperaturas podem ser “deslocados” em relação ao tempo de carregamento ou frequência, para o alinhamento em uma única curva. O fator de “deslocamento” (*shift factor*), designado $\alpha(T)$, define a mudança necessária a uma determinada temperatura com relação à temperatura de referência.

Neste estudo, utilizou-se o modelo de Hirsch, proposto por Christensen *et al.* (2003) para previsão do módulo dinâmico, a partir da temperatura de referência de 21,1°C e $\log \alpha(T)=0$.

Na Figura 39, apresentam-se as curvas mestras, sem adição de agente rejuvenescedor. Observa-se que, as misturas com baixos teores de RAP (até 25%), apresentaram módulos muito similares ou menores quando comparadas com a mistura de controle, nas zonas de baixas frequências (correspondente a altas temperaturas). Já as misturas com altos teores de RAP (acima de 25%), também nessas zonas, apresentaram uma tendência diferente, com módulos maiores que a mistura de controle. Enquanto que nas zonas de frequências reduzidas mais altas

(equivalentes a temperaturas mais baixas), a rigidez das misturas com os diferentes teores de RAP praticamente não se alterou. Observa-se também que o menor valor de módulo dinâmico foi encontrado para a mistura com 25% RAP.

O aumento de rigidez de uma mistura arbitrária com a presença de RAP, conforme dito anteriormente, poderia estar relacionado ao aumento da viscosidade do ligante oxidado. No entanto, assim como foi constatado nos outros ensaios, considera-se que, o aumento de rigidez nas misturas com altos teores de RAP pode estar atribuído à maneira como o material foi condicionado antes da mistura e compactação, e/ou estar associado à ativação do ligante modificado que contribuiu para o aumento dos módulos.

Uma maior rigidez das misturas asfálticas pode ser favorável para resistir às deformações permanentes em altas temperaturas (ou baixas taxas de carregamento), enquanto que uma menor rigidez pode ser mais favorável em temperaturas intermediárias para resistir a fadiga, ou em temperaturas baixas, para resistir ao trincamento térmico.

Figura 39 – Curvas mestras das misturas com diferentes teores de RAP, sem agente rejuvenescedor

A Figura 40 apresenta as curvas mestras para as misturas com 25% RAP, antes e após a adição do agente rejuvenescedor. Como já discutido anteriormente, os módulos dinâmicos para as misturas com baixos teores de RAP foram similares ou menores em frequências reduzidas mais baixas (ou temperaturas mais altas) quando comparados com a mistura de controle. A adição do agente rejuvenescedor diminuiu o módulo em uma pequena zona de frequência, porém deslocou a curva mestra, colocando o comportamento da mistura com RAP mais similar com a mistura convencional.

Figura 40 – Curvas mestras das misturas com 25% RAP antes e após a adição de agente rejuvenescedor

O aumento do módulo dinâmico, sobretudo nas zonas de baixas frequências (ou elevadas temperaturas) para a mistura com 50% de RAP pode ser observado na Figura 41. Em concordância com o ensaio de módulo de resiliência, a adição do AR reduziu a rigidez da mistura com alto teor de RAP. Verifica-se que a curva mestra da mistura com o AR também se aproxima do comportamento da mistura convencional. Este resultado pode indicar a recuperação das propriedades reológicas do ligante envelhecido do RAP pelo aditivo.

Figura 41 – Curvas mestras das misturas com 50% RAP antes e após a adição de agente rejuvenescedor

Avaliando-se a média do volume de vazios dos corpos de prova do ensaio de módulo dinâmico, conforme apresentado na Tabela 24, verifica-se que a mistura M25 foi a que apresentou o maior volume de vazios. Assim, a menor rigidez dessa mistura pode estar atribuída ao fato de não ter ocorrido uma ativação do ligante residual do RAP para uma densificação/compactação adequada da mistura. Nota-se, ainda, que as misturas com altos teores de RAP apresentaram menores volumes de vazios, devido à facilidade de compactação das misturas pela ativação do ligante durante o condicionamento (aquecimento) do material reciclado.

Tabela 24 – Volume de vazios do ensaio de módulo dinâmico.

Mistura	M0	M10	M20	M25	M25 AR	M35	M50	M50 AR	M65
Vv	6,27	5,98	6,30	6,39	6,31	5,00	5,39	5,52	5,11

3.4.5 *Flow number* (FN)

O ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do *flow number* (FN) foi conduzido com o objetivo de avaliar a susceptibilidade à deformação permanente das misturas asfálticas com os diferentes teores de RAP, em comparação com a mistura de controle. O valor de FN é definido como o ciclo onde a taxa de deformação plástica vertical uniaxial é mínima durante o ensaio uniaxial de carga repetida. Um maior valor de FN indica maior resistência à deformação permanente. Embora a norma brasileira NBR 16505 (2016) prescreva a aplicação de um pulso de carga de 204 kPa, seguido por um período de repouso, a uma temperatura de 60°C, nesse estudo, aplicou-se, para três amostras de cada mistura, uma tensão axial repetida de 600 kPa, a uma temperatura de 54°C, em condições não confinadas. Isso ocorreu devido as amostras não terem tido sensibilidade à tensão mais baixa.

A Figura 42 apresenta os resultados de *flow number* para as misturas sem adição de agente rejuvenescedor. Em concordância com os resultados dos outros ensaios, é possível distinguir uma nítida diferença de comportamento das misturas com baixos e altos teores de RAP. As misturas com altos teores de material reciclado apresentaram um maior número de ciclos, indicando uma melhor resistência à deformação permanente, em comparação com as demais misturas. As misturas com 10 e 20% de RAP também apresentaram um valor de FN maior que a mistura convencional, com exceção apenas para a mistura com 25% RAP, que apresentou um valor médio menor (188 ciclos) que a mistura de controle (252 ciclos), corroborando com o resultado do módulo dinâmico (o mais baixo dentre todas as misturas). Este comportamento pode ser atribuído ao condicionamento e ao teor do RAP durante a operação de mistura e deve ser investigado, assim como a interação entre o ligante virgem e o proveniente do RAP.

Figura 42 – Flow number das misturas sem adição de agente rejuvenescedor

A Figura 43 apresenta os resultados do ensaio de FN após a adição de agente rejuvenescedor para as misturas com 25 e 50% RAP. A mistura com 50% RAP apresentou um decréscimo no valor de FN com a adição do AR, devido à redução na viscosidade do ligante (amolecimento). No entanto, o número de ciclos para ambas as misturas com o agente rejuvenescedor (25 e 50% RAP), ainda é maior do que o número de ciclos da mistura de controle.

Figura 43 – Flow number das misturas com 25 e 50% RAP após adição de agente rejuvenescedor

Segundo o DNIT (2018), no Método Mecanístico-Empírico de Dimensionamento Nacional - MeDiNa, sugerem-se os limites das classes de desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente, conforme os valores de FN, apresentados na Tabela 25:

Tabela 25 – Limites de Flow Number.

Classe	Flow Number (FN)	N recomendado (Condições normais)	N recomendado (condições severas)
1	FN $\geq$ 100ciclos	N < 1e6	Não recomendado
2	100 ciclos $\leq$ FN $\geq$ 300ciclos	1e6 $\leq$ N < 1e7	N < 1e6
3	300 ciclos $\leq$ FN $\geq$ 750ciclos	1e7 $\leq$ N < 1e8	1e6 $\leq$ N < 1e7
4	750 ciclos $\leq$ FN $\geq$ 2000ciclos	N $\geq$ 1e8	1e7 $\leq$ N < 1e8
5	FN $\geq$ 2000ciclos	-	Nser $\geq$ 1e8

Fonte: DNIT (2018).

A linha tracejada em vermelho nas Figura 42 e Figura 43, representa o limite de 750 ciclos. Assim, verifica-se que as misturas com altos teores de RAP atenderiam aos limites estabelecidos pelo DNIT (2018) para um tráfego de $N \geq 1e8$, enquanto as

misturas com baixos teores de RAP (exceto a mistura com 25% RAP) atenderiam para um tráfego $1e7 \leq N < 1e8$, em condições normais.

Conforme comentado anteriormente, o resultado para a mistura com 25% de RAP sem AR apresentou resultados diferentes da tendência esperada. Os resultados observados para a mistura de 25% de RAP podem ser uma indicação de que esse teor realmente atingiu o limite máximo para a eficiência de transferência de calor dos agregados virgens para os materiais reciclados e não ter ocorrido a ativação do ligante. Futuramente, outras análises deverão ser realizadas em outro conjunto de amostras de 25% de RAP nas misturas, mas com o RAP passando pelo processo de condicionamento (aquecimento) antes da compactação.

3.4.6 Vida de fadiga

A fim de avaliar a vida de fadiga de misturas asfálticas recicladas, foi realizado o ensaio de flexão em viga apoiada de quatro pontos, de acordo com a AASHTO T 321 (2017), em misturas de laboratório com 0, 25 e 50% de RAP.

Este ensaio consiste na aplicação de um carregamento senoidal repetido, submetendo-se a amostra à flexão, com rotação livre e translação horizontal em todos os pontos de carga e reação, forçando a amostra de volta à sua posição original (ou seja, deflexão zero) ao final de cada pulso de carga, vide Figura 44. O ponto de falha ocorre no ciclo em que a amostra atinge uma redução de 50% de rigidez em relação à sua rigidez inicial.

Figura 44 – Ensaio de fadiga em viga apoiada em quatro pontos (a) Dispositivo de carregamento; (b) Execução do ensaio

Fonte: (a) Adaptado de AASHTO T 321-17 (2017); (b) Autora (2018).

Este ensaio pode ser realizado sob diferentes temperaturas e frequências de carga. Nesta pesquisa, os testes foram conduzidos a 10 Hz e 20°C. Zaumanis *et al.* (2018) apontam que estes são limiares comuns porque correspondem ao tráfego em movimento rápido, em temperatura de serviço intermediária.

Foram preparadas 12 vigotas (380 x 50 x 63 mm) de misturas asfálticas para cada teor de RAP (0, 25 e 50%). Embora a norma da AASHTO não indique nenhum tratamento específico para determinar a precisão e acurácia/exatidão dos resultados, a norma da ASTM D7460 (2010) estabelece que, devem ser preparadas 9 amostras e testadas, no mínimo, 6 réplicas em diferentes níveis de deformação. Se nos resultados parecerem incluir *outliers*, as amostras extras podem ser testadas. Além disso, esta norma ainda propõe que, os resultados dos ensaios de duas réplicas conduzidos pelo mesmo operador, no mesmo equipamento e no mesmo nível de deformação, não deve diferir de mais de 0,787 na escala log. Desta forma, as curvas de fadiga apresentadas a seguir foram obtidas buscando-se obter o maior R^2 , ou superior a 0,787, para um mínimo de 6 amostras.

A Figura 45 apresenta as curvas de fadiga para misturas com 0 e 25% RAP, antes e após a adição de agente rejuvenescedor. Observa-se que a adição de 25% de RAP (sem condicionamento) diminuiu consideravelmente a vida de fadiga em relação à

mistura de controle. Analisando os parâmetros volumétricos dessas misturas, constatou-se que, na média, houve um pequeno aumento do volume de vazios nas misturas com 25% RAP, fato observado também nos ensaios anteriormente apresentados e indicando que o fato do RAP não ter sido aquecido pode ter impedido a desestruturação dos grumos de RAP, ou seja, a transferência de calor dos agregados virgens para o material reciclado pode não ter sido efetiva para mobilização do ligante remanescente no RAP e completa homogeneização da mistura. Além disso, observa-se do gráfico que, a adição do agente rejuvenescedor melhorou a vida de fadiga da mistura reciclada, sobretudo em amplitudes de deformação mais altas, constatado pela diminuição da inclinação da curva de fadiga.

Figura 45 – Curvas de fadiga das misturas com 0 e 25% RAP (antes e após a adição de agente rejuvenescedor)

Já a Figura 46 apresenta as curvas de fadiga das misturas com 0 e 50% RAP, antes e após a adição de agente rejuvenescedor. Observa-se que, ao contrário do que era esperado (que o aumento do teor de RAP diminuiria a vida de fadiga), nessa pesquisa, a curva da mistura com 50% de material reciclado (sem agente rejuvenescedor) ficou ligeiramente abaixo da mistura convencional, indicando uma boa resistência ao

trincamento dessa mistura, mesmo com um elevado teor de RAP. Neste caso, denota-se que a presença do ligante modificado com borracha no RAP, ou seja, a ativação do ligante modificado remanescente contribuiu para a vida de fadiga e se sobrepôs ao teor de RAP na mistura. Daí a importância da qualidade do RAP, pois como pôde ser constatado neste caso, o aumento de RAP com a presença de ligante modificado com borracha melhorou o desempenho da mistura, em relação à fadiga, conforme aumentou-se o teor de RAP na mistura.

A pesquisa de Gaspar (2019) corrobora com a hipótese de ativação de um ligante modificado neste RAP pois, no estudo do autor, o material fresado designado como “RAP D”, de mesma origem da Rodovia Raposo Tavares, apresentou tendência de grau de ativação de ligante ($DOA\%$) diferente dos RAPs que possuíam ligante asfáltico convencional. O autor realizou ainda uma análise do ligante extraído do RAP que corroborou a presença de modificador por meio do ensaio reológico de *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR), além do ensaio químico de espectroscopia por infravermelho (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, FTIR).

Ainda da Figura 46, observa-se também que a adição do agente rejuvenescedor melhorou a curva de fadiga da mistura com 50% RAP e ultrapassou a mistura convencional, indicando uma boa restauração das propriedades do ligante envelhecido, com relação a durabilidade.

Figura 46 – Curvas de fadiga das misturas com 0 e 50% RAP (antes e após adição de agente rejuvenescedor)

Na Tabela 26 são apresentados os coeficientes de regressão das curvas de fadiga e a rigidez inicial das misturas. A mistura M50 AR foi a que apresentou menor rigidez com 9.764 MPa e a melhor vida de fadiga, seguida da mistura convencional com 9.866 MPa, conforme pôde ser observado dos gráficos. Embora a rigidez das misturas M25 (10.959 MPa) e M50 (10.780) tenham sido próximas, a mistura com 50% obteve uma melhor curva de fadiga, atribuído a ativação do asfalto borracha remanescente no RAP.

Tabela 26 – Coeficientes de regressão e rigidez inicial das misturas com 0, 25 e 50% RAP.

Mistura	Número de amostras	Coeficientes de regressão		R ²	Média da rigidez inicial (MPa)
		K0	K1		
M0	6	7E+17	-5,018	0,9807	9.866
M25	6	4E+17	-5,008	0,9502	10.959
M25 AR	8	2E+15	-4,086	0,8056	11.751
M50	8	1E+18	-5,153	0,9627	10.780
M50 AR	8	4E+17	-4,889	0,9368	9.764

Embora os resultados laboratoriais tenham indicado um bom comportamento das misturas com RAP, o uso de misturas asfálticas recicladas em camadas de rolamento deve ser cuidadosamente avaliado, a fim de evitar o trincamento precoce por fadiga. É altamente recomendável realizar uma análise mecanicista com o intuito de verificar o nível de tensões ao longo da espessura das camadas com misturas asfálticas recicladas na estrutura do pavimento.

4 CAMPO

Para a avaliação do desempenho em campo de misturas asfálticas recicladas, foram construídos, no total, três trechos experimentais com a incorporação de 25% (sem AR), 25% (com AR) e 35% (com AR) de material fresado em misturas asfálticas para aplicação em camadas de revestimentos de uma rodovia com elevado volume de tráfego.

Trata-se da Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), inaugurada em 1978, que desempenha um papel importante no transporte de pessoas e produtos entre as regiões metropolitanas de São Paulo e Campinas, dois dos pólos econômicos mais ricos e ativos do País. Além disso, é uma importante via de acesso a diversos pontos turísticos do interior paulista. Desde 1998, a concessionária CCR AutoBAn administra esta rodovia, a qual é integrante do Sistema Anhanguera-Bandeirantes, composto também pelas rodovias Anhanguera (SP-330), Dom Gabriel Paulino Bueno Couto (SP-300) e Adalberto Panzan (SPI102/330). Em 2018, a Rodovia dos Bandeirantes foi eleita a melhor rodovia do Brasil pelo sétimo ano consecutivo, segundo pesquisa da CNT (CNT, 2018).

Figura 47 –Rodovia dos Bandeirantes (SP-348)

Fonte: www.dersa.sp.gov.br (2018).

No ano de 2018, a concessionária realizaria as obras de um projeto gerencial de restauração dos pavimentos da SP-348, no segmento compreendido entre os quilômetros 13+360 e 96+000 (pistas Norte e Sul). Dentro deste cenário, aproveitou-se a oportunidade para construir os trechos experimentais objetos deste estudo para a avaliação da aplicabilidade em campo de pavimentos com revestimentos de misturas asfálticas com incorporação de RAP.

4.1 CONDIÇÃO INICIAL DO PAVIMENTO

A Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) é a autarquia estadual responsável por regular e fiscalizar o Programa de Concessões Rodoviárias. Dentre os indicadores exigidos por esta agência para a avaliação do desempenho de pavimentos constam: a deflexão característica (D_c), o quociente de irregularidade (QI), ou *international roughness index* (IRI), o afundamento de trilha de roda (ATR), o índice de gravidade global (IGG) e o percentual de trincamento (%FC-2 e %FC-3). Na Tabela 27 são apresentados os parâmetros de desempenho dos pavimentos dos quilômetros totais onde foram implantados os trechos experimentais (faixa 5, pista norte da Rodovia dos Bandeirantes), nas campanhas de monitoramento nos anos de 2016 e 2017.

Tabela 27 – Parâmetros de desempenho dos pavimentos da SP-348, pista norte, faixa 5, nas campanhas de monitoramento em 2016 e 2017.

SP-348, pista norte, Faixa 5										
	km inicial	km final	Dadm	Dc	IRI	QI	ATR	IGG	%FC2	%FC3
2016	25,0	26,0	36	26	2	21	3	4	0	0
	26,0	27,0	36	16	2	25	4	10	0	0
	27,0	28,0	36	21	2	24	4	6	0	0
2017	25,0	26,0	-	-	2	32	1	21	2	0
	26,0	27,0	-	-	2	23	1	4	0	0
	27,0	28,0	-	-	2	26	1	10	1	0

Embora todos os parâmetros de avaliação do pavimento estivessem dentro dos limites estabelecidos pela ARTESP, os segmentos apresentavam alguns defeitos localizados, com a presença de trincas transversais, longitudinais, couro de jacaré e remendos, conforme pode ser observado na Figura 48.

**Figura 48 – Defeitos localizados na faixa 5, pista norte da Rodovia dos Bandeirantes (SP-348).
(a) km 25+106; (b) km 25+145; (c) km 26+266; (d) km 26+325; (e) km 27+767; (f) km 27+858**

Fonte: Imageamento CCR Engellog (2018).

4.2 PROJETO DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO

Para a manutenção dos pavimentos da Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), foi desenvolvido um projeto a partir das severidades das patologias encontradas em campo, definindo-se as seguintes soluções:

- Selagem de trincas;
- Fresagem e recomposição com espessuras variando-se de 2, 5 ou 10 cm;
- Fresagem e recomposição com espessuras de 5 ou 10 cm e aplicação de geogrelha;
- Reparo profundo localizado.

Dentre as soluções do projeto, a alternativa “fresagem e recomposição com espessura de 10 cm e aplicação de geogrelha”, era a que apresentava segmentos de intervenções com maiores extensões, conforme pode ser observado na retrógrafa da Figura 49 e indicada pela cor roxa.

Figura 49 – Retirgráfica de soluções do projeto de manutenção de pavimento

Desta forma, os trechos experimentais 1 (25% RAP sem AR) e 2 (25% RAP com AR) foram escolhidos nos segmentos compreendidos entre os km 25+000 ao 25+300 e km 27+700 ao 28+000, respectivamente. Já o trecho experimental 3 (35% RAP com AR) teve apenas 62 metros de extensão, localizando-se no km 26+235 ao 26+297, pois a usina foi limitada a produzir cerca de 60 toneladas de massa asfáltica para não comprometer nenhum equipamento durante a produção da mistura com o teor de 35% de material reciclado, considerado alto para a configuração atual da usina (25% RAP). Consecutivamente, no segmento do km 26+297 ao 26+363, foi aplicada a mistura convencional, sem adição de material reciclado. A Tabela 28 sintetiza as informações dos trechos experimentais.

Tabela 28 – Localização dos trechos experimentais

SP-348, Pista Norte, Faixa 5							
Trecho experimental	Data execução	km inicial	km final	Extensão (m)	Teor RAP (%)	Procedência do RAP	AR
1	18/08/18	25+000	25+300	300	25	SP-330 km 18	Não
2a	22/08/18	27+700	27+820	120	25	SP-348 km	Sim
2b	06/10/18	27+820	28+000	180	25	SP-348 km	Sim
3	08/12/18	26+235	26+297	62	35	SP-348 km	Sim
Referência	08/12/18	26+297	26+363	66	0	-	Não

Na solução prevista em projeto, a recomposição das caixas de fresagem era com mistura asfáltica do tipo *gap graded* com CAP modificado por polímero tipo RET (Elvaloy 60/85 E) e aditivo surfactante redutor de temperatura para misturas mornas. Todavia, como os estudos laboratoriais desta pesquisa foram realizados empregando-se uma “Faixa III” como referência, a recomposição das caixas de fresagem nos trechos experimentais foi realizada com aplicação de mistura asfáltica Faixa III DER/SP. Com relação ao CAP, foi utilizado o mesmo previsto em projeto, por questões contratuais com a empresa fornecedora de asfalto durante as obras. A geogrelha especificada era de fibra de vidro com resistência à tração de 100 kN nos dois sentidos (horizontal e vertical) a um alongamento máximo de 4%.

Conforme indica a literatura internacional e com base nos ensaios laboratoriais ao longo da pesquisa, recomenda-se a utilização de um agente rejuvenescedor para restauração das propriedades reológicas do ligante envelhecido do RAP. Para isso, foi utilizado o agente rejuvenescedor ANOVA 1815 da Cargill no trecho experimental

com o teor de RAP considerado alto (35%) e em um dos trechos com 25% RAP a fim de se comparar com o segmento sem a aplicação do AR.

4.3 USINA

As misturas asfálticas recicladas foram produzidas pela empresa Usicity. A usina de asfalto que foi utilizada é do tipo gravimétrica, modelo CSD 2500 da Lintec, com capacidade de 160 t/h. A Tabela 29 apresenta a descrição técnica da usina.

Tabela 29 – Descrição técnica da usina

Produção por batelada	2500 kg
Tempo do ciclo da batelada	45 s
Temperatura do gás de exaustão	90-120°C
Capacidade do queimador	13 MW

Fonte: Lintec-ixon (2018).

A usina possui um sistema opcional de reciclagem para um máximo de 25% de material reciclado, que inclui um alimentador com duas câmaras, a correia transportadora e a entrada de RAP diretamente no misturador. Com esta configuração, o material reciclado é aquecido no próprio misturador, via transferência de calor dos agregados virgens superaquecidos. A pesagem do material reciclado é feita automaticamente e está totalmente integrada no sistema de controle.

A adição do agente rejuvenescedor foi feita na linha do ligante por meio de um dispositivo que injeta o produto no “panelão de CAP”. A Figura 50 apresenta a visão geral da usina, a correia transportadora de material fresado do alimentador para entrada no misturador e o dispositivo para adição do agente rejuvenescedor na linha do ligante.

Figura 50 – Usina gravimétrica - Usicity. (a) Visão geral da usina; (b) Correia transportadora de material reciclado (lado esquerdo); (c) Entrada de RAP no misturador; (d) Adição do AR na linha do ligante asfáltico

Fonte: (a) e (b) Empresascity (2018); (c) e (d) Autora (2018).

4.4 CONSTRUÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

É muito importante ressaltar que os materiais utilizados na parte laboratorial (Capítulo 3) dessa pesquisa são diferentes dos materiais empregados durante a construção dos trechos experimentais por motivos alheios à pesquisa. Enquanto o RAP dos ensaios laboratoriais teve procedência da Rodovia Raposo Tavares (SP-270), pertencente à concessionária SPVias, os RAPs dos trechos experimentais foram obtidos a partir das obras de restauração dos pavimentos na Via Anhanguera (SP-330) e na Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), pertencentes à concessionária AutoBAn. Assim sendo, foram

realizadas novas caracterizações de materiais e dosagens das misturas, conforme será apresentado adiante.

4.4.1 Caracterização dos materiais

O RAP incorporado nas misturas foi obtido a partir da fresagem de revestimentos asfálticos das obras que estavam sendo realizadas pela empreiteira FREMIX nas rodovias da concessionária AutoBAn. Tão logo era gerado, o material era transportado e estocado no pátio da usina Usicity.

Para o trecho experimental 1, o RAP foi proveniente das obras do km 18 da Via Anhanguera, sendo coletadas 2 amostras (Amostra 1 e 2), enquanto que para os trechos experimentais 2 e 3, o RAP foi oriundo do km 25 da Rodovia dos Bandeirantes, coletando-se apenas uma amostra (Amostra 3).

Os ensaios de extração e recuperação do ligante do RAP foram realizados pela empresa Imperpav Projetos e Consultoria Ltda para a caracterização do material. Em seguida, parte das amostras dos ligantes recuperados foram enviadas ao laboratório do CPR para a determinação do PG. A Tabela 30 apresenta os ensaios e as normas utilizadas para a caracterização do RAP e na Tabela 31 são apresentados os resultados.

Tabela 30 – Ensaios de caracterização do RAP

Ensaio	Norma
Extração do CAP por refluxo com tricloroetileno	ASTM D2172 (2017) – método B
Granulometria dos agregados antes e após a extração do CAP	DNER-ME 083/98
Recuperação do CAP pelo método de Abson	ASTM D1856-09 (2015)
Ponto de amolecimento sobre o CAP recuperado	ABNT NBR 6560 (2016)
Penetração a 25°C, 100g, 5s	ABNT NBR 6576 (2007)
Viscosidade Brookfield em 3 temperaturas	ABNT NBR 15184 (2004)
Ductilidade a 25°C	ABNT NBR 6293 (2015)
Massa específica máxima teórica pelo método RICE	ABNT NBR 15619 (2016)
Performance Grade (PG)	ASTM D6373 (2016)

Tabela 31 – Resultados dos ensaios de caracterização do RAP

Ensaio	Procedência do RAP		
	km 18 da SP-330	km 25 da SP-348	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Teor de CAP/Mistura (% em massa)	4,42	4,56	5,11
Ponto de amolecimento (°C)	58	60	58
Penetração (25°C, 100g, 5s) (0,1mm)	23	22	29
Ductilidade a 25°C (cm)	74	>100	73
Viscosidade Brookfield (cPa)	135°C	823	925
	150°C	382	433
	177°C	148	160
Massa específica máxima teórica RICE (g/cm ³)	Antes da extração do CAP	2,534	2,527
	Após a extração do CAP	2,734	2,734
Performance Grade (PG)	PG-76	PG-76	PG-70

Na Figura 51 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas das amostras de RAP, antes e após a extração do ligante asfáltico.

Figura 51 – Granulometria das amostras de RAP antes e após extração de ligante (campo)

Os agregados virgens (brita 1, brita 0 e pó de pedra) utilizados para compor as misturas eram de granito, provenientes da pedreira Riuma Ambiental. Já o ligante asfáltico, conforme dito anteriormente, foi o do tipo CAPFlex 60/85 Elvaloy com aditivo surfactante redutor de temperatura de usinagem, especificado como ADWARM-BR. Nas Tabela 32 e Tabela 33 são apresentadas as características dos materiais virgens. Com relação ao agente rejuvenescedor, foi empregado o ANOVA 1815 da marca

Cargill, o mesmo utilizado e já caracterizado na parte laboratorial da pesquisa (Capítulo 3).

Tabela 32 – Caracterização dos agregados virgens

Característica	Método	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra
Densidade real	ASTM C127 (2015) ASTM C128 (2015)	2,70	2,68	2,70
Densidade aparente	ASTM C127 (2015) ASTM C128 (2015)	2,67	2,64	2,62
Densidade efetiva	ASTM C127 (2015) ASTM C128 (2015)	2,68	2,66	2,66
Absorção (%)	ASTM C127 (2015) ASTM C128 (2015) ASTM C1252 (2017)	0,42	0,50	1,06
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 035 (1998)	21,80	-	-

Tabela 33 – Caracterização do ligante asfáltico

Característica	Método	Especificação (DNIT 129/2011)	CAP 60/85 Elvaloy Ad-Warm (Trecho referência)	CAP 60/85 Elvaloy Ad- Warm (Trechos 1, 2 e 3)
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576	40-70	59	46
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	Mín. 60	64,5	68
Massa específica a 25°C (g/cm³)	AASHTO T228 (2009)	-	1,007	1,019
Viscosidade Brookfield a 135 °C (cP)	NBR 15184	Máx. 3000	1520	1850
Viscosidade Brookfield a 150 °C (cP)	NBR 15184	Máx. 2000	648	824
Viscosidade Brookfield a 175 °C (cP)	NBR 15184	Máx. 1000	201	272,5

4.4.2 Dosagem das misturas recicladas

A dosagem das misturas asfálticas recicladas foi realizada pela Usicity, conforme a metodologia Marshall, tendo como referência a Faixa III do DER/SP. O alvo do volume de vazios foi de 5%, conforme indicação da CCR Engelog, para uma faixa de tráfego de veículos pesados.

Já a dosagem do agente rejuvenescedor foi novamente realizada pela empresa Cargill, utilizando o produto Anova 1815. Conforme citado anteriormente, o ligante asfáltico utilizado nos ensaios laboratoriais da pesquisa (CAP convencional 30/45) foi diferente dos trechos experimentais (CAP Elvaloy 60/85). Apesar disso, a dosagem como um percentual de ligante virgem mudou ligeiramente devido a um maior teor de

ligante proveniente do RAP. Com relação ao teor total de ligante, a dosagem final do AR se manteve a mesma da utilizada durante os testes de laboratório, sendo um pouco mais conservadora para os trechos experimentais, resultando em um percentual de 0,6 e 1,4%, em relação ao percentual total de ligante asfáltico, para as misturas com 25 e 35% de RAP, respectivamente.

Figura 52 – Dosagem do agente rejuvenescedor

Nas Tabela 34 e Tabela 35, são apresentados, resumidamente, os projetos e os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas dos trechos experimentais 1, 2 e 3.

Tabela 34 – Projeto das misturas recicladas dos trechos experimentais

Material		Teor em massa de mistura (%)		
		Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3
Ligante asfáltico novo	CAP 60/85 Elvaloy			
	ADWARM +			
	ANOVA	2,84	2,60	2,04
Ligante proveniente do RAP		1,16	1,30	1,86
Ligante total		4,0	3,9	3,9
Agregados	Brita 1	22,00	22,00	10,00
	Brita 0	26,00	26,00	30,00
	Pó de pedra	27,00	27,00	25,00
	RAP	25,00	25,00	35,00
Agente rejuvenescedor	Anova 1815	0,00	0,023	0,054

Tabela 35 – Parâmetros volumétricos das misturas

Mistura	Teor de projeto (%)				<i>G_{mb}</i> (g/cm ³)	<i>G_{mm}</i> (g/cm ³)	<i>V_v</i> (%)	VAM (%)	RBV (%)
	CAP residual do RAP	CAP virgem	AR	Total					
M25	1,16	2,84	0,000	4,00	2,394	2,519	4,99	14,38	65,33
M25 AR	1,30	2,58	0,023	3,90	2,391	2,507	4,74	13,89	65,88
M35 AR	1,86	1,99	0,055	3,90	2,394	2,506	4,47	13,64	67,17
M0	0,00	4,70	0,000	4,70	2,356	2,476	4,81	15,81	69,56

4.4.3 Calibração da usina

Previamente à construção dos trechos experimentais foi realizada a calibração da usina para a produção das misturas com RAP. Cabe ressaltar que, embora o ligante asfáltico empregado continha aditivo surfactante para redução de temperatura na produção de misturas mornas, as misturas tiveram que ser usinadas em temperatura quente. Durante o processo de calibração da mistura com 35% de RAP, verificou-se que, na temperatura de usinagem morna (~140°C), alguns agregados não ficaram completamente recobertos pelo ligante asfáltico, ou seja, as misturas aparentavam-se, “carijó”. Isso pode indicar que o método de aquecido do RAP, via transferência de calor dos agregados virgens superaquecidos não foi suficiente para um teor de 35%, extrapolado para uma usina desenvolvida para os 25% de RAP. Na Figura 53 é possível observar o aspecto da mistura com 35% RAP durante a calibração da usina na temperatura morna.

Figura 53 – Processo de calibração da usina (a) Mistura com 35% RAP em temperatura morna; (b) Agregados não envolvidos pelo ligante asfáltico

Fonte: (a) Cedido por Walter Faria (218); (b) Autora (2018).

Na Tabela 36 são apresentadas as temperaturas de usinagem dos materiais, determinadas após o processo de calibração da usina.

Tabela 36 – Temperatura de usinagem dos materiais

Trecho experimental	Teor RAP (%)	Temperatura		
		RAP	Agregados virgens	Ligante asfáltico
1	25	Ambiente (~15/20°C)	230	160
2	25	Ambiente (~15/20°C)	230	160
3	35	Ambiente (~15/20°C)	240	160

4.4.4 Sequência executiva da aplicação

Por questões operacionais devido o tráfego elevado, as obras na Rodovia dos Bandeirantes são realizadas durante o período noturno a fim de minimizar quaisquer transtornos aos usuários.

A execução do trecho experimental 1 (25% RAP sem AR) teve início na noite do dia 18/08/2018 (sábado) e finalizou-se na manhã do dia 19/08/2018 (domingo). Para a execução do trecho experimental 2 (25% RAP com AR), a Cargill solicitou a vinda de um consultor dos Estados Unidos para o apoio e o acompanhamento de todo o processo. O engenheiro chegou ao Brasil em uma segunda-feira e por este motivo, a execução do trecho 2 teve que ser subdividida em duas partes (a e b) pois a janela de

trabalho durante os dias úteis da semana é mais curta e não seria possível executar todo o trecho em apenas 1 noite. Assim, a primeira parte foi realizada na noite de 22/08/18 (quarta-feira) no km 27+700 ao 27+820. Já a segunda parte foi realizada na noite de 06/10/18 (sábado) no km 27+820 ao 28+000. Por fim, o trecho experimental 3 foi executado na noite de 08/12/18 e finalizou na madrugada de 09/12/18.

Do ponto de vista das etapas construtivas, não foi observada nenhuma diferença com relação ao processo convencional. As etapas de fresagem, aplicação da geogrelha e recomposição do revestimento foram iguais para todos os trechos.

4.4.4.1 Fresagem do revestimento asfáltico

A fresagem do revestimento asfáltico foi realizada com uma profundidade de 10 cm (Figura 54). Após esta operação, foi possível observar a condição da camada de base remanescente do pavimento. Conforme ilustrada na Figura 55, a base do trecho experimental 1 apresentava um elevado grau de trincamento, com trincas interligadas em blocos. Já a base do trecho 2, apresentava trincas transversais, enquanto que, no trecho 3, encontrava-se mais íntegra em relação às demais.

Figura 54 – Fresagem do revestimento asfáltico

Fonte: Autora (2018).

Figura 55 – Camadas de base dos pavimentos (a) Trecho 1 - elevado grau de trincamento; (b) Trecho 2 – trincas transversais; (c) Trecho 3

Fonte: Autora (2018).

4.4.4.2 Deflexões

As leituras de deflexões foram realizadas pela empresa Copavel com equipamento do tipo KUAB - FWD (*Falling Weight Deflectometer*), conforme ilustrado na Figura 56. Este dispositivo aplica cargas dinâmicas à superfície do pavimento, de magnitude e duração semelhantes às de uma carga de roda pesada. A resposta da estrutura do pavimento é medida em termos de deformação vertical, ou deflexões, em uma determinada área por meio de sensores.

As medidas de deflexão foram realizadas no fundo da caixa de fresagem (antes da aplicação da massa asfáltica) e no topo da camada de revestimento, tanto no eixo quanto na trilha de roda externa da faixa, com espaçamento de 20 metros e alternância a cada 10 metros. Infelizmente não foi possível obter o levantamento para o trecho experimental 2b devido a um problema técnico no equipamento no dia da obra. Os dados são apresentados a seguir no item de controle tecnológico.

Figura 56 – KUAB (FWD – *Falling Weight Deflectometer*)

Fonte: Autora (2018).

4.4.4.3 Geogrelha

A imprimação betuminosa ligante foi realizada conforme a norma ET-DE-P00/20 do DER/SP (2005), aplicando-se emulsão de ruptura rápida, tipo RR-2C, modificada por polímero. A pintura foi feita somente abaixo da geogrelha, com emprego de espargidor manual (“caneta”) e, em seguida, aplicou-se a geogrelha manualmente (Figura 57).

Figura 57 – (a) Imprimação betuminosa ligante; (b) Aplicação de geogrelha

(a)

(b)

Fonte: Autora (2018).

4.4.4.4 Recomposição do revestimento asfáltico

O lançamento e espalhamento da massa asfáltica foi realizado com equipamento do tipo vibroacabadora (Figura 58) em duas camadas com 5 cm de espessura cada uma. Entre as camadas foi feita uma pintura de ligação para aderência entre as mesmas. A compactação foi feita com 8 passadas do rolo pneumático e 6 passadas do rolo tandem sobre cada camada (Figura 59). As figuras a seguir mostram a sequência de aplicação, compactação da camada de revestimento e os trechos experimentais finalizados.

Figura 58 – Espalhamento de massa asfáltica com vibroacabadora

Fonte: Autora (2018).

Figura 59 – Compactação (a) rolo pneumático; (b) rolo tandem

(a)

(b)

Fonte: Autora (2018).

Figura 60 – Trecho experimental 1 (25% RAP sem AR)

Fonte: Autora (2018).

Figura 61 – Trecho experimental 2 (25% RAP com AR)

Fonte: Autora (2018).

Figura 62 – Trecho experimental 3 (35% RAP com AR)

Fonte: Autora (2018).

Figura 63 – Trecho referência (0% RAP)

Fonte: Autora (2018).

4.4.5 Controle tecnológico

Para o controle tecnológico das obras, foram extraídos corpos de prova da pista para a determinação das densidades de pista, e consequente determinação do grau de compactação, volume de vazios e espessura dos corpos de prova. Na Tabela 37 são apresentados os resultados.

Tabela 37 – Parâmetros de controle tecnológico da obra

Trecho	Coleta CP km	Densidade pista	Densidade laboratório	G.C.	Vazios (%)	Espessura
1	25+0,60	2,371	2,394	99	5,4	10,1
1	25+120	2,386	2,394	100	4,8	10,8
1	25+180	2,327	2,394	97	7,2	11,2
1	25+240	2,376	2,394	99	5,2	10,7
1	25+295	2,395	2,394	100	4,5	10,7
2a	27+760	2,334	2,391	98	6,9	10,0
2a	27+780	2,366	2,391	99	5,6	11,1
2a	27+790	2,305	2,391	96	8,0	9,8
2b	27+853	2,347	2,391	98	6,2	10,51
2b	27+888	2,369	2,391	99	5,3	11,00
2b	27+913	2,388	2,391	100	4,6	10,21
2b	27+948	2,361	2,391	99	5,6	11,72
3	26+270	2,383	2,394	100	5,4	10,34
referência	26+330	2,346	2,356	100	4,9	11,25

Segundo a especificação particular da CCR Engelog (R11, 2014) para execução de concreto asfáltico, o grau de compactação da mistura deve ser $\geq 97\%$. Da Tabela 37 observa-se que apenas um CP (coletado no km 27+790), localizado no segmento do trecho experimental 2a, com 25% RAP com agente rejuvenescedor, não atendeu ao limite mínimo. Com relação ao volume de vazios, embora nota-se uma variabilidade deste parâmetro, a especificação estabelece que, para a faixa III DER/SP, em pista, os valores deverão estar entre 3,5 a 7,5%. Dessa forma, verifica-se que todos os CPs estão dentro do limite de aceitação.

Com os dados do levantamento deflectométrico, foram construídas as curvas da bacia de deflexão no fundo da caixa fresada e após a restauração da camada asfáltica para cada segmento dos trechos experimentais. As linhas vermelhas apresentadas na Figura 64 são as médias das bacias. Conforme pode ser observado, houve uma dispersão muito grande dos dados, sobretudo no fundo da caixa fresada onde foi implantada a mistura com 25% RAP. Isso pode ter sido causado pelo trincamento da camada de base remanescente do pavimento, conforme ilustrado na Figura 55.

Foram realizadas algumas tentativas de retroanálise para o cálculo do módulo de resiliência das misturas recicladas, no entanto, não foi possível obter resultados que pudessem ser considerados representativos.

Figura 64 – Bacias de deflexões (a) M25 – fundo da caixa; (b) M25 – após restauração; (c) M25 AR – fundo da caixa; (d) M25 AR – após restauração; (e) M35 AR – fundo da caixa; (f) M35 AR após restauração; (g) M0 – fundo da caixa; (h) M0 – após restauração

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, buscou-se avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com diferentes teores de material fresado para aplicação em camadas finais de revestimento.

Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica referente ao tema incluindo as melhores práticas para a gestão do RAP, as adaptações necessárias em usinas de asfalto para a reciclagem a quente/morna, a dosagem de misturas asfálticas recicladas e resultados de estudos relacionados ao comportamento mecânico de misturas recicladas.

Além disso, foram realizados, em laboratório, os ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do *flow number* e fadiga na flexão de quatro pontos, conforme metodologias nacionais e internacionais adotadas no meio rodoviário. Avaliou-se ainda, o efeito da adição de um agente rejuvenescedor (óleo de base vegetal modificado) em misturas com baixo (25%) e alto (50%) teor de RAP.

Posteriormente, foram construídos trechos experimentais incorporando-se 25% de RAP (com e sem AR) e 35% de RAP (com AR) na camada de rolamento de uma estrutura de pavimento existente, além de um trecho de controle.

De modo geral, foi possível concluir que a técnica da reciclagem a quente com a utilização de altos teores de RAP em camadas de rolamento de pavimento é viável e promissora. No entanto, essa técnica ainda é limitada no Brasil sobretudo devido a indisponibilidade de usinas adaptadas para incorporação do material reciclado.

Com base na pesquisa bibliográfica exposta no Capítulo 2, conclui-se que:

- Previamente a qualquer etapa de reciclagem a quente de uma mistura asfáltica, cabe ressaltar que uma boa gestão do RAP aumenta a qualidade da mistura final. Deve-se ter um controle do material desde o momento da operação de fresagem do revestimento deteriorado; o beneficiamento, fracionamento e estocagem do material; o monitoramento das pilhas (controle de granulometria, teor de ligante, umidade); até a fase de usinagem.

- Com relação à produção de misturas recicladas, podem ser utilizadas tanto usinas gravimétricas quanto contínuas, porém ambas necessitam de adaptações para a incorporação do RAP ao processo.

Um dos princípios adotados para aquecer e dar trabalhabilidade ao material reciclado é utilizar o excesso de calor proveniente do superaquecimento dos agregados virgens. No entanto, através dessa concepção, quanto maior for o teor de RAP na mistura, maior teria que ser a temperatura de aquecimento dos materiais virgens. Além disso, a umidade dos materiais é outro fator importante, pois também influencia na temperatura para a remoção da água e secagem dos agregados. Tanto o teor de RAP como a umidade do material influenciam a temperatura de usinagem, e na prática, nem sempre é possível atingir apenas utilizando a técnica de superaquecimento dos agregados virgens. Ao mesmo tempo, é necessário evitar a oxidação do ligante remanescente no material reciclado. Assim, a incorporação de altos teores de RAP na mistura final pode implicar em maiores custos com adaptações, pois requer o aquecimento do material de modo separado (tambor secador exclusivo para RAP) dos materiais virgens e/ou sem o contato com a chama do queimador.

Em vista disso, o teor de RAP na mistura reciclada pode ser limitado pela capacidade dos equipamentos da usina e pela tecnologia do processo de produção disponível.

- A adição do agente rejuvenescedor na linha de produção pode ser realizada em diversos locais da usina, sendo os principais: à montante, ou à jusante, do tambor secador de RAP, ou diretamente no ligante virgem. Deve-se, no entanto, avaliar a recomendação do fabricante do produto, os custos de adaptações necessárias e ainda a difusão do produto no ligante do RAP.
- Não existe um consenso sobre o efeito do teor de RAP no comportamento mecânico de misturas recicladas. Com base nos resultados das pesquisas de diversos autores, observou-se que a maioria relatou um aumento de rigidez e maior resistência à deformação permanente em misturas com altos teores de RAP, quando comparados à mistura de controle. No entanto, com relação à resistência à tração e a vida de fadiga, verificou-se resultados bastante divergentes. Alguns autores relatam que o ligante envelhecido pode prejudicar o desempenho da mistura, outros obtêm resultados bastante satisfatórios ou até melhores que uma mistura convencional. Assim, reitera-se sobre a

importância da avaliação e investigação das propriedades do material reciclado para a incorporação às misturas asfálticas.

Do Capítulo 3, referente à análise laboratorial, é possível concluir que, do ponto de vista do comportamento mecânico, principal objetivo desta pesquisa, as misturas asfálticas recicladas, mesmo com altos teores de RAP, podem apresentar-se similares ou até melhores que uma mistura convencional. Vale salientar que, a presença de um ligante modificado residual do RAP utilizado nesse estudo, e sua ativação e interação com o ligante novo, pode ter contribuído para um bom comportamento das misturas. Além disso, foi possível obter as seguintes constatações:

- Com relação a dosagem das misturas, além dos agregados e do ligante virgem, pode-se considerar o RAP como um terceiro elemento, cuja caracterização é fundamental para o projeto da mistura reciclada. O teor de ligante residual, a porcentagem de sua contribuição na mistura (grau de ativação e interação), as massas específicas do RAP (agregados e ligante) e a reologia do ligante envelhecido são parâmetros importantes que afetam as propriedades volumétricas e mecânicas.
- O condicionamento do RAP é um fator que deve seguir um protocolo e uma padronização. Esta etapa deverá simular as condições de usinagem do material (remoção de umidade, aquecimento, mistura), conforme a capacidade/adaptação da usina.
- Durante a dosagem seguindo-se a metodologia Marshall, verificou-se que, o condicionamento (aquecimento) do material fresado pode ter influenciado os resultados, sobretudo devido à ativação do ligante residual do RAP. Em princípio, foi assumido que todo o ligante do material reciclado seria ativado e se misturaria/interagiria com o ligante novo. No entanto, verificou-se que, para obter o volume de vazios ótimo, a quantidade adicionada de ligante virgem (especialmente para as misturas com altos teores de RAP) foi maior que a calculada, considerando 100% de mistura entre os materiais. Apesar disso, foi possível obter uma significativa redução no consumo de ligante novo.
- Os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas dessa pesquisa foram avaliados com relação às especificações de serviço/execução de concreto asfáltico reciclado a quente na usina, do DNIT, DER/SP e Prefeitura de SP.

Com base na especificação do DNIT, verificou-se que, quanto ao RBV, nenhuma mistura atendeu a este parâmetro para camada de rolamento, nem mesmo a mistura convencional. Porém, as misturas com até 50% de RAP atenderam para camada de *binder* e apenas a mistura convencional atendeu ao VAM.

Já conforme a especificação do DER/SP, segundo o parâmetro RBV, as misturas com até 50% de RAP atenderam tanto para a camada de *binder* como de rolamento. Porém, somente as misturas com até 20% de RAP atenderam ao VAM.

Para a Prefeitura de São Paulo, com relação ao RBV, apenas a mistura com 65% RAP não atende, e com relação ao VAM, as misturas com até 20% de material reciclado atendem ao limite mínimo.

Adicionalmente, foi realizada uma verificação seguindo-se a especificação *Superpave*, embora sabe-se que o processo de compactação Marshall seja por impacto e a americana seja giratória, alterando-se as propriedades volumétricas. No entanto, sucederia que as misturas com até 50% de RAP atenderiam aos parâmetros de VAM e RBV. Tendo em vista essas constatações e, com base na pesquisa bibliográfica realizada, recomenda-se a revisão/atualização das especificações brasileiras de forma a adequar os critérios e parâmetros, considerando também novos métodos de dosagem de misturas asfálticas com materiais reciclados.

- Com relação à resistência à tração e ao dano por umidade induzida (DUI), aferiu-se que todas as misturas asfálticas (com e sem agente rejuvenescedor) atenderam aos requisitos estabelecidos nas normas do DNIT e DER/SP, independente do teor de material fresado.
- Nos resultados do ensaio de módulo de resiliência a 25°C, observou-se um aumento dos valores para as misturas com altos teores de RAP. O aumento de rigidez poderia estar relacionado ao ligante asfáltico envelhecido, mais consistente. No entanto, conforme constatou-se a presença de um ligante modificado com borracha, o aumento de MR pode ser atribuído também à ativação desse ligante. Após a adição do AR, o valor de MR diminuiu para a mistura com 50% RAP, ou seja, a viscosidade do ligante diminuiu, indicando neste caso, que o AR atendeu às expectativas. No entanto, quando o material reciclado não foi aquecido, a adição do AR aumentou o valor de MR da mistura com 25% RAP. Isso pode indicar que não houve uma mistura adequada entre

os materiais (ligante residual do RAP, ligante virgem e AR) e ter ocasionado o aumento da rigidez da mistura.

- Quanto aos resultados de módulo dinâmico, notou-se que as misturas com baixos teores de RAP (até 20%) apresentaram valores semelhantes ou inferiores em zonas de frequência reduzida (correspondentes a altas temperaturas), quando comparados com a mistura de controle, enquanto que misturas com altos teores de RAP apresentaram maiores $|E^*|$ nesta mesma zona. Assim como no ensaio de MR, essa diferente tendência foi atribuída à maneira pela qual o RAP foi condicionado para esses dois grupos. Para misturas com 50% RAP, a adição de agente rejuvenescedor reduziu o módulo dinâmico, mas a tendência não ficou clara para os 25% de RAP. O não aquecimento do material nesta quantidade mostrou ser um limitante durante a preparação da mistura, devido à não ativação do ligante do RAP.
- Com base nos resultados do ensaio uniaxial de carga repetida e determinação do *flow number*, foi observada uma diferença significativa entre misturas com baixos e altos teores de RAP. As misturas com altos teores de RAP apresentaram maiores valores de FN, indicando boa resistência à deformação permanente. O uso de agente rejuvenescedor diminuiu os valores de FN, mas ainda se mantiveram acima da mistura de controle.
- Com relação ao ensaio de fadiga, intuitivamente, a expectativa era de que conforme aumenta-se o teor de material reciclado na mistura, a vida de fadiga diminuiria devido a presença do ligante envelhecido. No entanto, observou-se nesse estudo que, a mistura com 50% de RAP (sem agente rejuvenescedor) apresentou uma curva de fadiga melhor que a mistura com 25% RAP, e também muito similar à mistura convencional. Dessa forma, reforça-se a hipótese de ativação e interação do ligante modificado com borracha do RAP, o que contribuiu para o bom comportamento da mistura com alto teor de material reciclado. A adição de agente rejuvenescedor melhorou a vida de fadiga para misturas com baixo e alto teor de RAP, indicando a restauração das propriedades do ligante do RAP pelo aditivo.
- Certificou-se da importância do conhecimento das informações da procedência do RAP para uma melhor interpretação dos resultados dos ensaios

laboratoriais, bem como de suas propriedades. A qualidade do RAP (homogeneidade, tipo e granulometria do agregado, tipo de ligante – se modificado ou não) irá exercer um papel fundamental no comportamento/desempenho da mistura reciclada. Dessa forma, a gestão do RAP ao longo de todo o processo, desde o momento de geração; beneficiamento; homogeneização; estoque; ensaios laboratoriais; é fundamental para a garantia de um material de qualidade.

- Misturas com altos teores de RAP devem ser avaliadas com relação ao uso de um agente rejuvenescedor, ou mesmo de um ligante asfáltico novo de menor consistência. A dosagem do AR, bem como a restauração das propriedades do ligante envelhecido, são de extrema importância, pois afeta diretamente na porcentagem de ligante virgem adicionado à mistura.

Já do Capítulo 4, durante a construção dos trechos experimentais, foi possível concluir:

- Durante a calibração da usina (adaptada para 25% de RAP), foi realizada a tentativa de se extrapolar para um teor de 35% de RAP e, com o método de aquecimento do material reciclado via transferência de calor com os agregados virgens superaquecidos, não foi possível produzir uma mistura com a técnica “morna”. Ou seja, a temperatura de usinagem teve influência na ativação do ligante do RAP para misturas com maiores teores de material reciclado.
- É extremamente importante utilizar usinas adaptadas compatíveis com o teor e umidade do RAP, para que seja possível aquecer e dar trabalhabilidade ao material reciclado de forma adequada e eficiente.
- Do ponto de vista de aplicação da mistura reciclada, não foi observada nenhuma diferença com relação à mistura convencional. Os cuidados construtivos são os mesmos àqueles do processo com materiais virgens.
- Ratificou-se a importância da condição de toda a estrutura do pavimento (base, sub-base, subleito). O desempenho em campo de qualquer mistura asfáltica (independente do teor de RAP) aplicada como camada de revestimento será diretamente influenciada pelas condições de apoio. Bases não íntegras podem comprometer o desempenho das misturas asfálticas e dificultar a avaliação dos parâmetros de desempenho. Em vista da condição de trincamento da base

cimentada da estrutura do pavimento remanescente e, com a quantidade de dados obtidos do levantamento deflectométrico, não foi possível realizar uma avaliação estrutural e mecanicista representativa das camadas de revestimento com as misturas recicladas.

Até o momento de conclusão desta pesquisa, realizou-se o acompanhamento das condições dos trechos experimentais, verificando-se que, do ponto de vista qualitativo, não foram observados defeitos superficiais no revestimento do pavimento. No entanto, sugere-se realizar uma avaliação estrutural, periodicamente, e a longo prazo.

Por fim, conclui-se que, no momento atual em que o apelo ambiental clama pela utilização consciente dos recursos naturais e pela busca de alternativas que diminuam os impactos ambientais, a reciclagem a quente demonstra ser uma alternativa que contribui para o reaproveitamento dos materiais da forma mais nobre, pois reutiliza tanto os agregados quanto o ligante asfáltico. No entanto, as propriedades mecânicas das misturas recicladas devem ser cuidadosamente avaliadas a fim de se obter desempenhos satisfatórios. O uso de misturas recicladas a quente é uma técnica promissora para alcançar a sustentabilidade na cadeia da pavimentação.

Sugestões para pesquisas futuras:

- Avaliar o efeito do condicionamento (aquecimento) do material reciclado nas propriedades volumétricas e no comportamento mecânico das misturas com RAP.
- Monitorar os trechos experimentais e acompanhar a evolução dos defeitos nos revestimentos, a fim de avaliar o desempenho em campo das misturas recicladas a longo prazo.
- Avaliar o grau de ativação do ligante do RAP (*degree of binder activity - DoA*) e a interação do ligante envelhecido com o novo (*degree of blending - DoB*) das misturas recicladas.
- Realizar um estudo econômico e ambiental como complementação desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)**. AASHTO T 342. Estados Unidos, 2011.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Determining the Asphalt Binder Content of Asphalt Mixtures by the Ignition Method**. AASHTO T 308. Estados Unidos, 2018.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending**. AASHTO T 321. Estados Unidos, 2017.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. AASHTO T 315. Estados Unidos, 2012.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA)**. AASHTO T 164. Estados Unidos, 2014.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. AASHTO T 283. Estados Unidos, 2014.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate**. AASHTO T 85. Estados Unidos, 2014.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate**. AASHTO T 84. Estados Unidos, 2013.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Specific Gravity of Semi-Solid Asphalt Materials**. AASHTO T 228. Estados Unidos, 2009.

____AASHTO. **Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)**. AASHTO T 209. Estados Unidos, 2012.

____AASHTO. **Standard Practice for Recovery of Asphalt Binder from Solution by Abson Method.** AASHTO R 59. Estados Unidos, 2011.

Al-Qadi, I. L.; AURANGZEB, Q.; CARPENTER, S. H.; PINE, W. L.; TRAPANIER, J. **Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures.** Research Report FHWA-A-ICT-12-002, Illinois Center for Transportation, Rantoul. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using Toluene and the Rotary Evaporator.** ASTM D7906-14, 2014.

____ASTM. **Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder.** ASTM D6373-16, 2016.

____ASTM. **Standard Test Method for Density of Liquid Coating, Inks, and Related Products.** ASTM D1475-13, 2013.

____ASTM. **Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending.** ASTM D7460-10, 2010.

____ASTM. **Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.** ASTM D7175-15, 2015.

____ASTM. **Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials.** ASTM D5-13, 2013.

____ASTM. **Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures.** ASTM D2172, 2017.

____ASTM. **Standard Test Method for Recovery of Asphalt From Solution by Abson Method.** ASTM D1856-09 (Reapproved 2015), 2015.

____ASTM. **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.** ASTM C127-15, 2015.

____ASTM. **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.** ASTM C128-15, 2015.

____ASTM. **Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).** ASTM D36-14, 2014.

AMMANN – **Usinas de asfalto** – Catálogo de divulgação. Gravataí, Rio Grande do Sul, 2012.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Hot-Mix Recycling.** Manual Series n. 20 (MS-20). Second Edition. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola.** NBR 6560, 2016.

____ABNT. **Ligantes asfálticos – Determinação da ductilidade.** NBR 6293, 2015.

____ABNT. **Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas.** NBR 15619, 2016.

____ABNT. **Materiais asfálticos – Determinação da penetração.** NBR 6576, 2007.

____ABNT. **Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida.** NBR 16505, 2016.

____ABNT. **Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** NBR 14184, 2004.

AL-QADI, I. L.; AURANGZEB, Q.; CARPENTER, S. H.; PINE, W. J.; TREPANIER, J. **Impact of high RAP content on structural and performance properties of asphalt mixtures.** Research Report FHWA-ICT-12-002, Illinois Department of Transportation, Bureau of Material and Physical Research, Springfield, IL, 2012.

AL-ROUSAN, T.; ASI, I.; AL-HATTAMLEH, O.; AL-QABLAN, H. **Performance of Asphalt Mixes Containing RAP.** Jordan Journal of Civil Engineering, Vol. 2, Nº 3, 2008.

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

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

ASTEC. **Double Barrel XHR Dryer/Drum Mixer.** Disponível em: <<https://www.astecinc.com/products/drying-mixing/double-barrel-xhr-dryer-mixer.html>>. Acesso em: 19 fev. 2019.

BANASIAK, D. **RAP Alters Asphalt Plant Design.** ROADS & BRIDGES,2000. Disponível em: <<https://www.roadsbridges.com/rap-alters-asphalt-plant-design>>. Acesso em: 03 ago. 2017.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS : ABEDA, 2007.

BOHN, K. A. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Tecnologia, RS, 2017.

BRITISH STANDARD. **Bituminous mixtures – Material specifications. Part 8: Reclaimed asphalt.** BS EN 13108-8:2016. United Kingdom, 2016.

BROCK, J. D.; RICHMOND, J. L. **Milling and Recycling.** [S.l.]. 2007. (Technical paper T-127).

CARPENTER, S. H. & WOLOSICK, J. R. **Modifier influence in the characterization of hot mix recycled material.** Transportation Research Record No. 777, p. 15-22. Estados Unidos, 1980.

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

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Tecnologia, RS, 2016.

CHRISTENSEN, D.W.; PELLINEN, K. & BONAQUIST, R. F. **Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 72. Lexington, KY. 2003.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias**. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. Federal Highway Administration, Report Nº FHWA-HRT-11-021, Turner-Fairbank Highway Research Center, Federal Highway Administration, McLean, VA. Form DOT F 17007.7 (8-72). 2011.

DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM – DER/SP. **Concreto Asfáltico**. Especificação Técnica ET-DE-P00/027. São Paulo, Brasil, 2005.

_____. DER/SP. **Concreto asfáltico reciclado a quente em usina**. Especificação Técnica ET-DE-P00/032. São Paulo, Brasil, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Agregados – análise granulométrica**. Método de Ensaio. DNER-ME 083/98. Rio de Janeiro, Brasil. 1998.

_____. DNER. **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Método de Ensaio DNER-ME 043/95. Rio de Janeiro, Brasil, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE COMBUSTÍVEIS - DNC – **Regulamento Técnico DNC 04**. Portaria 44/97 – Especificações dos aditivos asfálticos para misturas à quente, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material**. Norma DNIT 129/2011 - EM. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

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

____ DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, p. 310. 2006. (IPR - 720).

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

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

____ DNIT. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Norma DNIT 031/2006 - ES. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

____ DNIT. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de serviço**. Norma DNIT 033/2005 - ES. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

EAPA. **Asphalt in figures 2015**. [S.l.]. Disponível em: < <https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/2015.pdf> >. Acesso em: 10 jan 2017.

EMPRESACITY. **Usicity**. Disponível em: <<http://www.empresacity.com.br/usicity/usicity-diferenciais/>>. Acesso em: 15 nov 2018.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors**. AP 42, Fifth Edition, Vol I: Stationary Point and Area Sources. Chap. 11: Mineral Products Industry. 2004. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s01.pdf>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

FRANK, B. **New Law Permits 100 Percent RAP on Streets.** Equipment Worlds's Better Roads, Highway Contractor, 2014. Disponível em: <<http://raptech.us/library/Highway-Contractor-New-Law.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2017.

GARDINER, M. S. & WAGNER, C. **Use of reclaimed asphalt pavement in Superpave hot-mix asphalt applications.** Transportation Research Record. 1681, p. 1-9. Transportation Research Board, Washington, D. C. 1999.

GASPAR, M. S. **Mecanismos de interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

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

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

HANSEN, K. R. & COPELAND, A.. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2016.** Information Series 138. NAPA. Lanham, 2017.

HANSEN, K. R.; & NEWCOMB, D. E. **Asphalt Pavement Mix Production Survey on Reclaimed Asphalt Pavement, Reclaimed Asphalt Shingles, and Warm-mix Asphalt Usage: 2009-2010.** Federal Highway Administration - FHWA. Washington, DC. 2011. (Information Series 138).

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

ISLAM, M. R.; MANNAN, U. A.; RAHMAN, A. A. & TAREFDER, R. A. **Effects of reclaimed asphalt pavement on hot-mix asphalt.** Advances in Civil Engineering Materials. Vol. 3. N° 1, p. 291-397. 2014.

IZAKS, R.; HARITONOV, V.; KLASA, I. & ZAUMANIS, M. **Hot mix asphalt with high RAP contents**. 1st International Conference on Structural Integrity. Procedia Engineering 114, p. 676-684. 2015.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Federal Highway Administration, Report N° FHWA-SA-98-042. Form DOT F 17007.7 (8-72). 1997.

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

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

KUEHL, R.; KORZILIUS, J.; MARTI, M. **Synopsis of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Material**. MN/RC - 2016RIC08, p. 32. Minnesota, 2016.

LINTEC-IXON. **Usinas de Asfalto e Centrais de Concreto**. Disponível em: <<http://www.lintec-ixon.com.br/pt/produto/usinas-de-asfalto-em-container/csd-2500-b>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

MARTIN, A. E.; ZHOU, F.; ARAMBULA, E.; PARK, E. S.; CHOWDHURY, A.; KASEER, F.; CARVAJAL, J.; HAJJ, E.; DANIEL, J.; GLOVER, C. **The effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios**. National Cooperative Highway Research Program - NCHRP. Project No. 9-58. Phase I. Interim Report. Texas, Estados Unidos, 2015.

MOGAWER, W.; BENNERT, T.; DANIEL, J. S.; BONAQUIST, R.; AUSTERMAN, A.; BOOSHEHRIAN, A. **Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures**. Road Materials and Pavement Design. Vol. 13, p. 183-208. 2012.

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.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Recycling**. Disponível em: <<http://www.asphaltpavement.org/recycling>>. Acesso em: 10 maio. 2018.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY. **NCAT Researchers Explore Multiple Uses of Rejuvenators**. Disponível em: <<http://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/info-pubs/newsletters/atnspring2014.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2019.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP. **Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content**. NCHRP Report 752. Washington, D.C. Estados Unidos, 2013.

NOROUZI, A.; SABOURI, M.; KIM, Y. R. **Evaluation of the fatigue performance of high RAP asphalt mixtures**. Journal of Taylor and Francis Group, p. 1069-1077. 2014.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Instrução de execução IE-07/2010: Camadas de concreto asfáltico reciclado a quente em usina**. Secretaria de Infraestrutura Urbana, São Paulo, 2010.

RISLEY, K. **Plant Operations**. In.: APAM Annual Asphalt Paving Conference, 54th, 2010, Michigan. Disponível em: <<http://www.apa-mi.org/docs/PlantOperations.pdf>>. Acesso em: 01 jul. 2017.

SABOURI, M.; BENNERT, T.; DANIEL, J. S. & KIM, Y-R. **A comprehensive evaluation of the fatigue behavior of plant-produced RAP mixtures**. Road Materials and Pavement Design, p. 1-26. 2015.

SHAH, A.; MCDANIEL, R. S.; HUBER, G. A.; GALLIVAN, V. L. **Investigation of properties of plant-produced reclaimed asphalt pavement mixtures**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board N°. 1998, p. 103-111. Washington, D.C., 2007.

SONDAG, M. S.; CHADBOURN, B. A. & DRESCHER, A. **Investigation of recycled asphalt pavement (RAP) mixtures**. Report N° MN/RC-2002-15, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN. 2002.

TOMLINSON, C.R. **The effect of high RAP and high asphalt binder content on the dynamic modulus and fatigue resistance of asphalt concrete**. M.S. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. 2012.

WANG, Y. D.; KESHAVARZI, B.; KIM, Y. R. **Fatigue Performance Analysis of Pavements with RAP Using Viscoelastic Continuum Damage Theory**. KSCE Journal of Civil Engineering, 22 (6), p. 2118-2125. 2018.

WEST, R. & COPELAND, A.. **High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice – Lessons Learned**. NAPA. Lanham, 2015.

WEST, R.; TIMM, D.; WILLIS, R.; POWELL, B.; TRANS, N.; WATSON, D.; SAKHAEIFAR, M.; BROWN, R.; ROBBINS, M.; VARGAS-NORDCBECK, A.; VILLACORTA, F. L.; GUO, X.; NELSON, J. **Phase IV NCAT Pavement Test Track Findings**. NCAT Report 12-10. Auburn, AL. 2012.

WEST, R.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. **Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content..** NCHRP 752. Project Number 09-46. Auburn, AL. 2013.

WIRTGEN GROUP. **Different types of milling drums**. Disponível em: <<https://www.wirtgen.de/en/technologies/application/cold-milling/operating-principle-large-milling-machines/fraesen.php>>. Acesso em: 02 abril 2019.

WORLD HIGHWAYS. **Efficient asphalt recycling**. vol. 27, issue n. 8, p. 44, October 2018.

WORLD HIGHWAYS. **Processing RAP mix**. vol. 26, issue n. 6, p. 47, July/Aug. 2017.

YOUNG, T. **Recycling Hot Mix Asphalt Pavements**. Information Series 123. NAPA, 1996.

ZAUMANIS, M.; BOESIGER, L.; KUNZ, B.; CAVALLI, M. C.; POULIKAKOS, L.D. **Determining optimum rejuvenator addition location in asphalt production plant.** Construction and Building Materials 198, p. 368-378. 2019.

ZAUMANIS, M; CAVALLI, M. C. & POULIKAKOS, L. D. **Design of 100% RAP Hot-Mix Asphalt to Balance Rutting and Cracking Performance.** ISAP Conference in Fortaleza. 2018.

ZAUMANIS, M.; CAVALLI, M. C.; POULIKAKOS, L. D. **Effect of rejuvenator addition location in plant on mechanical and chemical properties of RAP binder.** International Journal of Pavement Engineering. 2018.

ZAUMANIS, M. & MALLICK, R. B. **100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis.** Resources Conservation and Recycling. 2014.

ZAUMANIS, M. & MALLICK, R. B. **Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art.** International Journal of Pavement Engineering, 16:1, p. 39-55, 2015.