CAIO MASCARENHAS RAUL

**Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado
na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas**

São Paulo
2019

CAIO MASCARENHAS RAUL

**Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado
na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas**

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

Orientador: Prof^a. Dra. Kamilla
Vasconcelos Savasini

São Paulo
2019

CAIO MASCARENHAS RAUL

**Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado
na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas**

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

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes

Orientador: Prof^a. Dra. Kamilla
Vasconcelos Savasini

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 alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, dede 20

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Raul, Caio Mascarenhas

Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas / C. M. Raul -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

102 p.

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

1.Asfalto - Reciclagem 2.RAP 3.Reciclagem a Quente
4.Rejuvenescimento I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

*A Deus pela saúde e disposição que
tem me concedido.*

*A minha esposa Stefanny e a toda a
minha Família por todo amor,
paciência e apoio oferecidos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por tudo que me tem preparado e por ter me sustentado ao longo de todos os meus dias.

A minha amada esposa Stefanny que sempre me incentivou e me deu todo o suporte emocional em todos os momentos críticos.

Aos meus pais, Vanderlei e Marisa, a minha irmã Gabrielly e cunhado Fabrício que juntos me educaram e me apoiaram por todo este caminho, sempre me incentivando e me fornecendo todo o suporte necessário. Vocês são a base de todas as conquistas.

A minha orientadora Professora Kamilla não só por todas as orientações profissionais e pessoais, mas pela paciência e sabedoria que sempre me atendeu tanto antes como ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sabendo me direcionar por todos os momentos mais sobrecarregados.

Aos amigos do Laboratório de Tecnologia da Pavimentação, em nome de toda a equipe, não só por todo o conhecimento compartilhado mas por todo o suporte e incentivo fornecido.

Aos amigos Vanderlei, Iuri, Márcia, Matheus e Kazuo por todas as orientações fora de hora, auxílio em ensaios e parcerias necessárias no desenvolvimento do trabalho.

A empresa RoadRunner Engenharia pelo suporte oferecido ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos André e Douglas, que não só ofereceram suporte e incentivo mas sempre foram verdadeiros orientadores na minha vida acadêmica, profissional e pessoal.

A todos, meu respeito e meu mais sincero muito obrigado.

RESUMO

Com o grande número de obras realizadas devido ao trincamento do revestimento asfáltico das rodovias, soluções alternativas têm sido procuradas, a fim de solucionar o problema de uma maneira mais eficiente e vantajosa. Uma das alternativas ao processo de fresagem e recomposição, é a aplicação de camadas intermediárias de alívio de tensões sobre o revestimento deteriorado (SRAM) como forma de mitigar a reflexão das trincas existentes na nova camada asfáltica. Estas camadas, geralmente, são caracterizadas por apresentar um alto teor de ligante modificado e uma granulometria fina, garantindo uma maior capacidade resiliente à camada. Ao mesmo tempo, vem crescendo uma tendência mundial de reciclagem e reaproveitamento do material asfáltico fresado (RAP, do inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement*), que pode ser considerado como uma combinação de agregados e ligante asfáltico envelhecido. O objetivo do presente estudo é avaliar, a nível de análise dos ligantes, a viabilidade de utilizar a parte fina do RAP, mais rica em ligante asfáltico, combinado com um agente rejuvenescedor (AR), nas camadas de SRAM com a consideração de 100% de ativação do ligante asfáltico envelhecido e menor necessidade de adição de ligante modificado novo. As características dos ligantes isolados e combinados com AR, foram avaliadas. Foram realizados ensaios para a obtenção das propriedades viscoelásticas lineares, além de ensaios relacionados à deformação permanente (*Multiple Stress Creep and Recovery*, MSCR), ao trincamento por fadiga (*Linear Amplitude Sweep*, LAS) e ao trincamento em baixas temperaturas (*Bending Beam Rheometer*, BBR). Foi proposta ainda uma nova abordagem no método de dosagem do AR considerando estes resultados. Os resultados demonstraram que a adição de ligante envelhecido ao ligante altamente modificado aumentou a rigidez do ligante novo, diminuiu sua capacidade de recuperação (R), aumentou sua deformação não recuperável (J_{nr}), diminuiu sua vida de fadiga e piorou seu comportamento em baixas temperaturas. A partir do método proposto verificou-se que a adição de um teor próximo a 8,0% do agente rejuvenescedor nesta combinação dos dois ligantes recuperou em parte estas propriedades, mostrando o potencial de utilização do RAP em misturas asfálticas antirreflexão de trincas.

Palavras-Chave: RAP. Rejuvenescimento. Ligante asfáltico. Reciclagem a quente.

ABSTRACT

Due to the large number of rehabilitation jobs carried out due to the asphalt layer cracking on highways, alternative techniques have been studied in order to find more efficient and advantage solutions. One of the alternatives to the milling and recomposition process is the application of stress relief asphalt mixtures on the deteriorated surface, as a way to mitigate the reflective cracking in the new asphalt layer. These layers are generally characterized by highly modified asphalt binders and fine aggregate size particles, ensuring higher resilient capacity to the layer. At the same time, a worldwide trend of recycling and reutilization of the Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) has been growing. The aim of the present study is to evaluate, at the binder level, the viability to use the finer part of the RAP, richer in asphalt binder, combined with a rejuvenating agent (RA), for the stress relief asphalt mixture layers, with 100% activation of the RAP binder consideration, and consequently reduced need of new modified binder. The characteristics of the isolated and combined binders with the rejuvenating agent, were evaluated. Tests to obtain the linear viscoelastic properties, tests related to the binders' characterization in terms of permanent deformation (Multiple Stress Creep and Recovery, MSCR), fatigue cracking (Linear Amplitude Sweep, LAS) and low temperature behavior (Bending Beam Rheometer, BBR) were analyzed. A new approach to the RA design method was proposed considering these results. Results showed that the addition of the RAP aged binder increased the stiffness of the new highly modified binder, decreased its recoverability (R), increased its non-recoverable compliance (J_{nr}), decreased its fatigue life and worsen its low temperature behavior. From the proposed method it was found that the addition of around 8.0% of the rejuvenating agent partially recovered these properties, showing the potential use of RAP in crack anti-reflective asphalt mixtures.

Keywords: RAP. Rejuvenation. Asphalt binder. Hot recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Custo de mistura convencional vs. mistura com RAP	16
Figura 2 - Matriz de experimentos propostos	18
Figura 3 - Mecanismo de reflexão de trincas.....	21
Figura 4 - Posicionamento da camada asfáltica intermediária de alívio de tensões .	25
Figura 5 - Alterações na composição dos ligantes ao longo do tempo	33
Figura 6 - Alterações químicas típicas no asfalto ao longo do processo de envelhecimento e rejuvenescimento	36
Figura 7 - Localização aproximada do trecho de coleta dos materiais.....	39
Figura 8 - Aspecto das frações de RAP completo antes do peneiramento (esquerda/cima) e após peneiramento (direita/baixo)	42
Figura 9 - Granulometria agregados e do RAP após extração de ligante	43
Figura 10 - Ensaios e combinações de ligantes estudadas	46
Figura 11 - Porcentagens dos ligantes para o cenário de 30% de RAP.....	49
Figura 12 - Porcentagens para o cenário de 60% RAP com agente rejuvenescedor	50
Figura 13 – (a) Amostra HiMA, (b) Amostra RL.....	52
Figura 14 - (a) Pesagem do agente rejuvenescedor, (b) Aparato final para mistura dos ligantes e (c) Aspecto final do ligante após mistura	53
Figura 15 - Ilustração do cálculo do FFL a partir da curva de fadiga.....	57
Figura 16 - Princípio ensaio BBR	58
Figura 17 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na curva mestra do $ G^* $	61
Figura 18 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na curva mestra do ângulo de fase	61
Figura 19 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido no diagrama <i>black space</i>	64
Figura 20 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido no Jnr	65
Figura 21 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido no R...	65
Figura 22 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido no ensaio de varredura de deformação	67
Figura 23 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na evolução do dano	68

Figura 24 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na vida de fadiga (N_f).....	69
Figura 25 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na evolução do Creep Stiffness (S) em função do tempo	71
Figura 26 - Influência da adição de variados teores de ligante envelhecido na evolução do m-value em função do tempo	72
Figura 27 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor na curva mestra do $ G^* $ do HiMA+60% RAP	73
Figura 28 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor na curva mestra do ângulo de fase do HiMA+60% RAP.....	74
Figura 29 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor no diagrama <i>black space</i> do HiMA+60% RAP	75
Figura 30 - Valores de $ G^* \sin\delta$ e $ G^* /\sin\delta$, após RTFOT, em função do teor de AR	76
Figura 31 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor no J_{nr} do HiMA+60% RAP	78
Figura 32 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor no R do HiMA+60% RAP	78
Figura 33 - Valores de J_{nr} 3.200 e R 3.200 em função do teor de AR.....	79
Figura 34 - Influência de variados teores de agente rejuvenescedor na evolução tensão do HiMA+60% RAP	80
Figura 35 - Influência de variados teores de agente rejuvenescedor na evolução do dano do HiMA+60% RAP	81
Figura 36 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor na vida de fadiga (N_f) do HiMA+60% RAP	81
Figura 37 - Valores de FFL e pico da tensão em função do teor de AR.....	83
Figura 38 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor na evolução do Creep Stiffness (S) em função do tempo	84
Figura 39 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor na evolução do m-value em função do tempo	85
Figura 40 - Valores de S(60) e m(60) em função do teor de AR	87
Figura 41 - Variação dos teores de AR encontrados.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização convencional do ligante HiMA	41
Tabela 2 - Resultados teor de ligante extração RAP por refluxo.....	43
Tabela 3 – Influência da adição de RAP nos fatores de fadiga dos ligantes (FFL) ...	70
Tabela 4 - Influência da adição de variados teores de ligante envelhecido nos valores de S(60) e m(60)	72
Tabela 5 - Valores de $ G^* \sin\delta$ e $ G^* /\sin\delta$ após RTFOT	76
Tabela 6 - Influência da adição de AR nos fatores de fadiga dos ligantes (FFL)	83
Tabela 7 - Influência de variados teores de agente rejuvenescedor nos valores de S(60) e m(60)	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AR	Agente Rejuvenescedor
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBR	Bending Beam Rheometer
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCP	Concreto Cimento Portland
CCR	Concreto Compactado Com Rolo
CM	Curva Mestra
DSR	Dynamic Shear Rheometer
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
G-R	Glover-Rowe
HiMA	Highly Modified Asphalt
HWTD	Hamburg Wheel Tracking Devices
LAS	Linear Amplitude Sweep
MSCR	Multiple Stress Creep And Recovery
PAV	Pressure Aging Vessel
PG	Performance Grade
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RCAT	Rolling Cylinder Aging Test
RL	Ligante Proveniente do RAP
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SAMI	Stress Absorbing Membrane Interlayer
SBS	Styrene-butadiene-styrene
SRAM	Strain Relief Asphalt Mixture
TST	Time Sweep Test
USAT	Universal Aging Test

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	15
1.2.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1.	REFLEXÃO DE TRINCAS NO PAVIMENTO ASFÁLTICO	20
2.1.1.	Conceito	21
2.1.2.	Medidas para controle e redução da reflexão de trincas	22
2.2.	A UTILIZAÇÃO DE MATERIAL FRESADO	26
2.2.1.	A utilização de RAP em misturas asfálticas.....	26
2.2.2.	Heterogeneidade do RAP.....	27
2.2.3.	Ativação do ligante do RAP.....	28
2.3.	ENVELHECIMENTO E REJUVENESCIMENTO DE LIGANTES ASFÁLTICOS.....	30
2.3.1.	Etapas do envelhecimento asfáltico	31
2.3.2.	Utilização de agente rejuvenescedores.....	34
2.3.3.	Dosagem de agente rejuvenescedor em misturas recicladas.....	37
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1.	SELEÇÃO DE MATERIAIS	39
3.1.1.	Ligante altamente modificado (HiMA).....	39
3.1.2.	Material fresado (RAP)	42
3.1.3.	Agente rejuvenescedor	44
3.2.	COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS DE LIGANTES	44
3.2.1.	Considerações sobre a composição das misturas de ligantes.....	47
3.2.2.	Combinação dos ligantes	50
3.3.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	53
3.3.1.	Caracterização viscoelástica linear dos ligantes.....	53

3.3.2.	<i>Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</i>	54
3.3.3.	<i>Linear Amplitude Sweep (LAS)</i>	55
3.3.4.	<i>Bending Beam Rheometer (BBR)</i>	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1.	EFEITO DA ADIÇÃO DE LIGANTE ENVELHECIDO (RAP) NO HIMA	60
4.1.1.	Caracterização viscoelástica linear	60
4.1.2.	<i>Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</i>	64
4.1.3.	Linear Amplitude Sweep (LAS)	67
4.1.4.	<i>Bending Beam Rheometer (BBR)</i>	71
4.2.	EFEITO DA ADIÇÃO DE AR NA COMBINAÇÃO DE HIMA E RAP	73
4.2.1.	Caracterização viscoelástica linear dos ligantes	73
4.2.2.	<i>Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)</i>	77
4.2.3.	Linear Amplitude Sweep (LAS)	79
4.2.4.	Bending Beam Rheometer (BBR)	84
4.2.5.	Análise da dosagem do AR	87
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1. INTRODUÇÃO

A reabilitação de pavimentos é um dos assuntos que vem ganhando importância em muitas agências rodoviárias, devido ao seu impacto nos custos de manutenção de uma rodovia. Uma vez que o pavimento - seja flexível, rígido, ou composto - atinge uma condição crítica, é necessária sua restauração para recuperar as boas condições à trafegabilidade dos usuários.

O crescente volume de tráfego de pessoas e produtos nas últimas décadas tem sobrecarregado a malha rodoviária do país, acelerando o seu processo de deterioração. Atualmente, grande parte das rodovias brasileiras apresentam condições precárias, levando não somente a uma maior deterioração das camadas dos pavimentos, mas ao desconforto e falta de segurança aos usuários. Deve-se entender que o impacto de uma rodovia em condições precárias não envolve somente os custos necessários para sua restauração - os quais vão aumentando significativamente quanto pior as condições da rodovia - mas também os custos aos usuários (maiores custos de combustível, manutenção mecânica do veículo, troca de pneus, etc.), custos de segurança (maiores custos com acidentes), custos ambientais (maiores emissões de gases poluentes) e custos sociais (maior precariedade de acesso a uma determinada região, dificultando o acesso à saúde, educação, alimentos, infraestrutura básica, etc.).

Outro fator que vem crescendo muito ultimamente e contribuído fortemente para a deterioração dos pavimentos rodoviários brasileiros é o excesso de cargas nas rodovias. Em 2015 foram aprovadas novas tolerâncias de excesso de cargas por eixo rodoviários, que trouxeram como consequência uma aceleração no processo de deterioração dos pavimentos em função do maior patamar de carregamento imposto pelos veículos que trafegam nas rodovias. Segundo Nielsen e Silva (2013), as curvas de equivalente de carga por eixo são exponenciais acentuadas, de forma que qualquer excesso de cargas além do limite permitido gera como consequência um forte impacto no número de eixos equivalente padrão.

Ao longo dos anos, diversos pesquisadores vêm buscando desenvolver melhores estruturas de pavimentos novos e novas técnicas de restauração de pavimentos deteriorados, que sejam mais econômicas e duráveis, face às cargas impostas pelos veículos. Além do projeto, o nível de qualidade das rodovias está intimamente ligado

à seleção de materiais (agregados, ligantes e aditivos), além dos procedimentos de construção. Uma vez que estes fatores são aprimorados, a vida útil da intervenção se prolonga, o que pode reduzir todos os custos derivados da rodovia (VARGAS, 2016).

Neste contexto, muitos estudos estão sendo direcionados à solução de um dos principais problemas em pavimentos deteriorados: a prevenção de trincas (CORREIA, 2010). Um pavimento com o revestimento trincado facilita a infiltração de água, deteriorando de forma mais rápida a sua estrutura e diminuindo a sua capacidade estrutural. Soluções de prevenções de reflexão de trincas têm o principal objetivo de aumentar a vida útil do pavimento, a custos menores do que o recapeamento asfáltico (CORREIA, 2010).

Uma camada antirreflexão de trincas deve ser capaz de absorver as tensões provenientes das trincas existentes no revestimento antigo, absorver as tensões provenientes das variações térmicas, absorver os deslocamentos impostos, sendo capaz de se deformar sem romper e, por fim, transmitir efetivamente as tensões das cargas de tráfego às camadas inferiores do pavimento. Diversas soluções já foram estudadas a fim de mitigar o problema de reflexão de trincas nas camadas novas de revestimento, entre elas a utilização de camadas espessas de reforço, a modificação dos ligantes asfálticos, a utilização de camadas intermediárias reforçadas, a selagem prévia de juntas, a utilização de camadas granulares intermediárias, a utilização de SAMI (*Stress absorbing membrane interlayer*), entre outras (OGUNDIPE, THOM e COLLOP, 2013a; MUKHTAR e DEMPSEY, 1996; BERNUCCI et al., 2006; CORREIA, 2010). O presente estudo estará focado na análise, a nível de ligantes, de camadas de SAMI de misturas asfálticas, aqui tratada como *Strain Relief Asphalt Mixture*, SRAM (GASPAR et al., 2017a; RAUL et al., 2017; VASCONCELOS et al., 2017).

Atualmente, o desenvolvimento sustentável tem sido um dos termos chave quando se trata de pavimentos rodoviários. Segundo Genesseeux (2015), no âmbito nacional e internacional, o setor de infraestrutura de transportes tem incentivado largamente técnicas que utilizem tecnologias sustentáveis e que permitam a redução no consumo de energia e de materiais novos. Por este motivo, a utilização de revestimento asfáltico fresado (RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*) é uma técnica importante, possibilitando tanto a redução no uso de novos materiais (agregados e ligantes), como a diminuição de resíduos sólidos passivos ambientais.

A utilização de RAP em misturas asfálticas, apesar de largamente estudada, continua sendo um grande desafio para os pesquisadores, principalmente no cenário nacional e em teores mais elevados. Avanços para o conhecimento da interação entre os materiais, a gestão da heterogeneidade do RAP, sua granulometria variável, o teor de ativação do ligante envelhecido, as propriedades da mistura final após a usinagem, são ainda necessários para a melhor compreensão do comportamento das misturas recicladas a quente.

Este trabalho foca na análise do efeito da combinação de teores da fração fina do RAP nas propriedades a nível de ligantes de camadas de misturas asfálticas exercendo a função de SRAM, e no desenvolvimento de uma nova abordagem de dosagem do agente rejuvenescedor para recuperação destes parâmetros.

1.1. Justificativa e objetivos

A abordagem do presente estudo consiste na comparação das propriedades dos ligantes em misturas asfálticas do tipo SRAM em função da utilização ou não de ligantes proveniente do RAP (RL) em conjunto com um cimento asfáltico altamente modificado e um agente rejuvenescedor (AR)

As camadas de SRAM são aplicadas em pequena espessura e por sua função antireflexão de trincas devem apresentar uma grande capacidade resiliente, o que pode ser obtido a partir da utilização de ligantes asfálticos modificados aplicados em taxas elevadas na mistura. O objetivo principal do estudo é a verificação da viabilidade de emprego da parte fina do RAP (rica em ligante asfáltico muito embora envelhecido) nestas misturas, com a aplicação de um agente rejuvenescedor e um asfalto altamente modificado para recuperação das propriedades dos ligantes, sugerindo-se uma nova abordagem no procedimento de dosagem.

Uma vez reativado o ligante asfáltico presente no RAP, tem-se, conseqüentemente, um ganho ambiental derivado desse processo (CHIU et al., 2008). Além disto, há um ganho econômico devido à menor quantidade de ligante adicional necessário, dado que o ligante é o material de maior custo na cadeia produtiva de misturas asfálticas (GENNESSEAU, 2015; MOGHADDAM e BAAJ, 2016). A Figura 1 ilustra um comparativo do custo de misturas asfálticas convencionais comparadas com misturas recicladas com RAP.

Figura 1 – Custo de mistura convencional vs. mistura com RAP

Fonte: Adaptado de Zaumanis, Mallick e Frank, 2014b

Porém, em contrapartida, a adição de material reciclado em uma mistura pode influenciar seu desempenho. Apesar de já existirem estudos analisando o impacto da adição de RAP em misturas asfálticas, em sua grande maioria, estes foram voltados para misturas de concreto asfáltico (CA) e utilizando a distribuição granulométrica integral do RAP e não apenas a fração mais fina. Voltado para os ligantes das camadas de SRAM, o presente estudo irá analisar o comportamento reológico resultante da combinação de um ligante envelhecido, combinado com um ligante altamente modificado e um agente rejuvenescedor.

1.2. Estrutura da dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos e, por fim, as referências bibliográficas, como se segue:

O primeiro capítulo destina-se à introdução do tema principal a ser abordado ao longo do trabalho, sua relevância e objetivos propostos na pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os temas que são abordados ao longo do estudo. São avaliadas questões sobre reflexão de trincas, utilização de material fresado em misturas asfálticas e processo de rejuvenescimento de ligantes asfálticos.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais, métodos e procedimentos experimentais realizados para as misturas de ligante asfáltico consideradas no estudo.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões para os procedimentos experimentais realizados.

O mapa esquemático apresentado na Figura 2 resume a parte experimental proposta no presente estudo, desenvolvida ao longo do terceiro e quarto capítulo.

No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais após a análise dos dados levantados.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas no desenvolvimento do trabalho.

Figura 2 - Matriz de experimentos propostos

Fonte: Autor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando é realizada a pavimentação de uma rodovia, objetiva-se, principalmente, a melhoria das condições de circulação do tráfego em uma determinada região. O pavimento consiste em um sistema de camadas apoiado sobre um subleito, com características estruturais inferiores, com a finalidade de melhorar sua condição de suporte e regularidade, protegendo-o do clima e das tensões impostas pelo tráfego. A pavimentação resulta em melhores condições de circulação, conforto, economia e segurança aos usuários.

Apesar de existirem divergências sobre qual a melhor forma de classificação (BALBO, 2007), uma vez que existem imprecisões nas nomenclaturas clássicas, os pavimentos tradicionalmente são divididos em dois tipos: flexível e rígido, onde o pavimento flexível apresenta a camada de revestimento final asfáltica e o pavimento rígido em placas de concreto de cimento Portland. Ao longo da vida útil dos pavimentos estes são submetidos aos carregamentos cíclicos do tráfego e de temperatura e a camada de revestimento asfáltico fica sujeita ao trincamento por fadiga, ou mesmo térmico, revelando trincas ao longo de sua extensão (CORREIA, 2010; OGUNDIPE, 2012). Independente da classificação adotada para a estrutura do pavimento, o presente trabalho foca na remediação de trincas em pavimentos com camada superficial asfáltica.

Estas trincas também podem ser provenientes de outros fatores como: problemas construtivos, camadas inferiores já deterioradas, variações climáticas, etc. O trincamento do revestimento compromete a impermeabilização da camada, tornando o pavimento exposto à infiltração de água, acelerando sua deterioração. A restauração de pavimentos flexíveis objetiva, portanto, o prolongamento de sua vida útil mantendo condições adequadas de circulação, conforto, segurança e economia (CORREIA, 2010).

O processo de reabilitação tradicional, quando o defeito se apresenta no revestimento asfáltico, é a remoção de toda, ou parte, da camada deteriorada pelo trincamento através do processo de fresagem, previamente a qualquer outra solução que venha a ser empregada. A camada deteriorada de revestimento é retirada da estrutura para que não venha a comprometer o desempenho da solução futura. Vale ressaltar que este material fresado nem sempre é reutilizado e se torna, em alguns casos, um

passivo ambiental, com necessidade de um local adequado para ser descartado (ABDO, 2016).

A reabilitação de pavimentos asfálticos trincados por meio de aplicação de uma nova camada asfáltica é uma intervenção que vem sendo utilizada ao longo dos anos. Esta prática tem demonstrado que raramente a intervenção atinge a vida útil prevista por causa do aparecimento de trincas prematuras originadas no revestimento antigo. Uma vez que seja aplicada apenas uma nova camada de rolamento sobre o pavimento deteriorado sem prévio tratamento, as trincas existentes irão naturalmente refletir para a nova camada e a reabilitação não será bem-sucedida. Este fenômeno é comumente conhecido como reflexão de trincas. As duas causas principais da reflexão de trincas são as variações térmicas diárias/sazonais e o carregamento do tráfego (OGUNDIPE, THOM e COLLOP, 2013a; OGUNDIPE, THOM e COLLOP, 2013b). Diversas técnicas foram desenvolvidas para mitigação da reflexão de trincas, de forma que não seja necessária a prévia remoção da camada asfáltica deteriorada, ou pelo menos, não completamente.

2.1. Reflexão de trincas no pavimento asfáltico

Quando um pavimento asfáltico chega a uma condição crítica de deterioração com o tempo, é necessária uma intervenção para que o mesmo volte a apresentar boas condições de superfície. Entre os defeitos que ocorrem, uma das principais formas de deterioração é o trincamento, que pode ser causado, entre outros motivos, por trincamento térmico ou por fadiga da camada asfáltica (OGUNDIPE, 2012; CORREIA, 2010; BERNUCCI et al., 2006; TREVINO, 2004). A Figura 3 apresenta um esquema do mecanismo de reflexão de trincas.

Figura 3 - Mecanismo de reflexão de trincas

Fonte: Adaptado de Ogundipe (2012).

2.1.1. Conceito

Lytton (1989) e Ogundipe (2012) mencionam que a reflexão de trincas pode simplesmente ser definida pela propagação das trincas existentes no pavimento antigo da base para o topo do revestimento novo. Segundo Bernucci et al. (2006) tensões de tração elevadas são desenvolvidas na camada de recapeamento asfáltico devido aos movimentos originados nas trincas existentes do revestimento antigo deteriorado. A reflexão de trincas se dá de baixo para cima no recapeamento.

O fenômeno de reflexão de trincas pode ser definido como a propagação de uma trinca pré-existente em um revestimento antigo para uma nova camada subjacente devido à movimentação causada pelas tensões geradas pelo tráfego de veículos e movimentações térmicas da estrutura. A reflexão de trincas é mais crítica em situações de baixa temperatura, devido ao enrijecimento do revestimento asfáltico, bem como de elevado volume de tráfego, ou de grande magnitude de cargas (BERNUCCI et al., 2006).

Trevino (2004) lista as possíveis causas para a reflexão de trincas em uma camada de revestimento asfáltico:

- a) Trincas ou juntas na camada antiga de concreto de cimento Portland;
- b) Trincas de retração térmica na camada antiga de concreto asfáltico;
- c) Trincas em bloco induzidas pela camada antiga de concreto asfáltico, ou trincas induzidas pela retração das camadas de solo;

- d) Trincas longitudinais na camada antiga de concreto asfáltico;
- e) Trincas por fadiga na camada antiga de concreto asfáltico.

2.1.2. Medidas para controle e redução da reflexão de trincas

A possibilidade de reflexão de trincas em projetos de restauração de pavimentos é um fator que deve ser levado em conta, adotando-se métodos para a sua redução. Para mitigar a propagação de trincas é necessário eliminar, ou pelo menos diminuir, as deformações e tensões produzidas na região das trincas do pavimento antigo (CORREIA, 2010).

Diversas soluções já foram estudadas a fim de se reduzir o problema de reflexão de trincas nas camadas novas de revestimento, entre elas a utilização de camadas espessas de reforço, a modificação dos ligantes asfálticos (com polímero, fibra, borracha, etc.), a utilização de camadas intermediárias reforçadas, a selagem prévia de juntas, a utilização de camadas granulares intermediárias, a utilização de SAMI, entre outras (OGUNDIPE, THOM e COLLOP, 2013a; MUKHTAR e DEMPSEY, 1996; BERNUCCI et al., 2006; CORREIA, 2010).

Ogundipe (2012) definiu SAMI como camadas intermediárias projetadas para dissipar energia através de deformações horizontais e verticais, permitindo assim o movimento (vertical/horizontal) das subcamadas sem causar grandes tensões de deformação no reforço/revestimento. Mukhtar e Dempsey (1996) definiram SAMI como camada de um material resiliente que é aplicada sobre a superfície do pavimento antigo, antes do reforço asfáltico.

Apesar do termo SAMI estar comumente associado às misturas asfálticas, se uma membrana for aplicada entre duas camadas de pavimento com o objetivo de absorção de tensões, de acordo com a tradução literal do termo, a mesma também pode considerada uma camada de SAMI, como é o caso de geogrelhas e geotêxteis, por exemplo. Portanto, como o termo *stress absorbing membrane interlayers* pode abranger diferentes tipos de camadas, o presente estudo utilizou a terminologia *stress relief asphalt mixture* (SRAM), já utilizada por outros autores (GASPAR et al., 2017a; RAUL et al., 2017; VASCONCELOS et al., 2017), para se referir especificamente a camadas intermediárias de misturas asfálticas que, de fato, são o foco do presente estudo.

Para uma camada de revestimento, as características mecânicas das camadas inferiores são essenciais para garantir o controle da magnitude das tensões, de forma que não ocorra trincamento prematuro na camada de superfície (PINTO e PREUSSLER, 2002). Portanto, uma camada antirreflexão de trincas deve ser capaz de absorver as tensões provenientes das trincas existentes no revestimento antigo, absorver as tensões provenientes das variações térmicas, absorver os deslocamentos impostos, sendo capaz de se deformar sem romper e, por fim, transmitir efetivamente as tensões das cargas de tráfego às camadas inferiores do pavimento.

Determinados tipos de camadas intermediárias têm a capacidade de redirecionar a trinca existente, propagando-as na direção horizontal. A trinca gera um descolamento localizado entre a camada nova e o revestimento antigo e, neste processo, perde parte de sua energia de propagação, sendo dissipada na camada de bloqueio (CORREIA, 2010). A seguir são apresentadas algumas técnicas utilizadas para o controle do processo de reflexão de trincas.

- a) Utilização de camadas espessas de revestimento: o aumento da espessura da camada de reforço adicionada sobre o revestimento antigo deteriorado por si só não impede ou previne o fenômeno de reflexão de trincas, entretanto, esta técnica diminui sua velocidade de surgimento e severidade. A maior espessura de material asfáltico reduz tanto as tensões de flexão e cisalhamento, impostas pelo tráfego solicitante, como as impostas por variações térmicas na camada do revestimento, evitando as movimentações de dilatação e retração (GASPAR et al., 2017a);
- b) Utilização de geossintéticos: os geossintéticos podem atuar de duas maneiras distintas na prevenção da reflexão de trincas: desviando as trincas, ou convertendo-as em microfissuras ao se propagarem, aliviando as tensões (ANTE, 2012). A presença de geotêxteis na interface entre o revestimento antigo e o novo, principalmente quando impregnados com ligante asfáltico, faz com que ocorra um retardo na reflexão das trincas. Segundo Ante (2012), a geogrelha possui uma rigidez superior à da mistura asfáltica, redirecionando a trinca para o plano horizontal. Um fator fundamental é a aderência completa entre a camada de geossintético e a estrutura antiga para que o movimento das trincas seja dispersado horizontalmente.

- c) Execução de selagem de trincas: a selagem de trincas é uma solução muito utilizada para a manutenção preventiva de pavimentos. Segundo Correia (2010), seu grande sucesso deve-se à sua simplicidade, eficácia, alta durabilidade e custo baixo. Quando utilizada como manutenção preventiva de pavimentos pode vir a evitar intervenções maiores e de grande custo. Por ser um serviço muito pontual, esta técnica, em geral, somente é vantajosa quando na aplicação de trincas isoladas. Nos casos de grandes áreas deterioradas, com trincas interligadas, são indicadas outras técnicas.

Quando executado em um pavimento com condições adequadas, o processo de selagem inibe a propagação e interligação das trincas. O processo sela as trincas com uma emulsão, ou lama asfáltica, impedindo assim a entrada de água e outros materiais, além de evitar o bombeamento de finos e proporcionar o alívio de tensões térmicas.

- d) Utilização de camadas de interrupção de trincas: este tipo de técnica, geralmente, é aplicado quando as movimentações das camadas subjacentes ao novo revestimento são maiores, o que poderia comprometer a eficácia de outras técnicas. A técnica consiste na aplicação de camadas de misturas abertas, com poucos finos, servindo para a dissipação das trincas. O grande número de vazios interconectados efetivamente interrompe a propagação da trinca, mesmo quando sujeita a grandes movimentações. Se a mistura não estiver bem compactada poderá se tornar instável, ocasionando problemas futuros como trilhas de roda (CORREIA, 2010).
- e) Utilização de camadas asfálticas intermediárias de alívio de tensões: esta técnica, tópico de análise do presente estudo, consiste na aplicação de camadas de alta resiliência executadas na superfície do revestimento antigo deteriorado sobre o qual será executado o recapeamento. Camadas com baixo valor de módulo aliviam as tensões acima das trincas existentes, reduzindo a taxa de propagação de trincas (CORREIA, 2010). Estas camadas intermediárias, chamadas de SRAM (*Strain Relief Asphalt Mixture*) podem ser constituídas de micro revestimentos asfálticos, tratamentos superficiais por penetração em ligantes modificados, ou até mesmo misturas asfálticas usinadas com elevado teor de ligante modificado em camadas delgadas. A

Figura 4 demonstra o posicionamento e o princípio mecânico das camadas de SRAM.

Figura 4 - Posicionamento da camada asfáltica intermediária de alívio de tensões

Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2006).

Comumente, estas camadas são empregadas com agregados de granulometria fina e com ligantes modificados por polímeros ou borracha. O uso de modificadores nos ligantes melhora as suas propriedades reológicas, durabilidade e diminui sua susceptibilidade térmica. A função da camada intermediária é de absorção de qualquer tipo de movimentação ocorrida na junta/trinca dissipando a tensão antes que atinja a camada de reforço aplicada na sequência. A camada atua dissipando movimentos e tensões em trincas e juntas de severidade média e baixa, devido às características de recuperação elástica do ligante asfáltico empregado.

Segundo Ogundipe, Thom e Collop (2013b), o potencial de retardamento de trincas dependem de diversos fatores como a rigidez e a espessura da camada de SRAM, a espessura da camada de reforço, o carregamento e a temperatura. Verificou-se que quanto menor a espessura da camada de SRAM e da camada de reforço, maior o benefício relativo do SRAM no comportamento do pavimento. O estudo também demonstrou que camadas de SRAM são mais efetivas em temperaturas do pavimento de 20 a 30°C, pois perdem parte da eficiência em temperaturas de 10°C, ou inferiores.

2.2. A utilização de material fresado

Como já mencionado anteriormente, considerando-se que as condições de base e sub-base se apresentem adequadas, uma das alternativas comumente utilizadas para se evitar a reflexão das trincas presentes na camada de revestimento antiga para a camada nova é a fresagem do concreto asfáltico existente previamente a aplicação do reforço. Esta alternativa, além exigir o processo prévio de fresagem do pavimento, produz uma quantidade de material fresado, que se torna em alguns casos um passivo ambiental, o qual deve ser descartado ou reutilizado de alguma forma (ABDO, 2016). Assim como o aço, alumínio, vidro, plástico, entre outros, o concreto asfáltico (CA) também é um material com grande aplicabilidade na reciclagem de pavimentos. Quando o concreto asfáltico degradado é fresado, o mesmo passa a ser denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP).

Mais de 80% dos materiais fresados das rodovias dos Estados Unidos são reutilizados, podendo ser utilizados em pavimentos novos, como material de base e sub-base (ABDO, 2016), ou como parte da mistura de concreto asfáltico. Os maiores limitantes ambientais da aplicação de uma camada de concreto asfáltico vêm da exploração para a produção do asfalto e da necessidade de aquecimento do mesmo para aplicação rodoviária. Uma vez que no processo de reciclagem a quente parte do asfalto necessário é reduzido devido à reativação do ligante já presente no RAP, tem-se, conseqüentemente, um ganho ambiental derivado desse processo (CHIU et al., 2008). Estima-se que dezenas de milhões de toneladas de RAP tenham sido utilizadas desde o meio dos anos 70 com ganhos econômicos substanciais em comparação à utilização de concretos asfálticos novos (SONDAG et al., 2002).

2.2.1. A utilização de RAP em misturas asfálticas

O maior uso do RAP é voltado para misturas asfálticas (ABDO, 2016). O RAP é misturado com agregados “virgens”, ligante asfáltico e, eventualmente, aditivo para produzir uma mistura asfáltica reciclada. A porcentagem de RAP adicionada depende muito da agência reguladora, dos padrões utilizados, do local de aplicação da mistura, etc. (VALDÉS et al., 2011).

De acordo com Valdés et al. (2011) e Abdo (2016), restrições ambientais estão causando uma tendência de aumentar estas porcentagens de RAP adicionadas nas

misturas recicladas aplicadas na construção e restauração de pavimentos asfálticos. Com base nisto estes autores realizaram um estudo utilizando duas porcentagens de RAP (40% e 60%) nas misturas asfálticas a fim de se determinar o comportamento das mesmas em comparação às misturas asfálticas convencionais (sem RAP). Foi verificado que um aumento na porcentagem de RAP nas misturas asfálticas aumenta a sua rigidez, e que as misturas com altos teores de RAP apresentaram um comportamento muito similar às misturas de alto módulo, tanto na rigidez como na fadiga, na tensão indireta, e na fratura. Atualmente, já existem diversos estudos considerando misturas usinadas com maiores teores de RAP, chegando em alguns casos até 100% (ALMEIDA, GOMES, SANGIORGI et al., 2016; SEGUNDO, BRANCO, VASCONCELOS et al., 2017).

Conforme já bem conhecido e reportado pela bibliografia, o aumento do teor de RAP resulta em um aumento da rigidez da mistura, devido ao ligante já envelhecido presente no RAP. Este aumento na rigidez pode ser um fator benéfico quanto a resistência à deformação permanente (embora com menor recuperação elástica, a mistura possui uma deformação menor) e desempenho em altas temperaturas, entretanto em temperaturas baixas e intermediárias o trincamento térmico e por fadiga tenham uma tendência de serem diretamente prejudicados.

2.2.2. Heterogeneidade do RAP

Um dos principais desafios na utilização de agregados reciclados é lidar com a sua heterogeneidade. Em uma mesma fonte de RAP podem existir materiais de locais variados, com ligantes e agregados diferentes e granulometria também distintas. Portanto, cuidados devem ser tomados previamente à utilização destes materiais, principalmente em teores elevados (GENNESSEAU, 2015). Valdés et al. (2011) chegaram à conclusão que o uso de altas porcentagens de RAP (60%) na preparação de misturas era viável, porém deve ser tomado o cuidado de caracterizar e manusear as pilhas de RAP de maneira adequada, a fim de se evitar amostras muito heterogêneas.

A análise de uma amostra de RAP muito heterogêneo é muito perigosa, uma vez que as misturas preparadas podem resultar em propriedades completamente diferentes das esperadas. Caso uma análise de uma dosagem tenha sido feita com base em uma amostra heterogênea, por exemplo, o resultado de toda obra pode estar

comprometido. Valdés et al. (2011) e Don Brock e Richmond (2007) a preparação das misturas usando RAP fracionado estocado em diferentes frações, desta forma é possível reduzir a variação do teor de ligante e granulometria.

Ainda, uma vez analisadas as frações granulométricas do RAP nota-se uma grande variação nos teores de ligante (VALDÉS et al., 2011; GENNESSEAU, 2015). Segundo Genesseeux (2015), uma vez que o ligante asfáltico na mistura está distribuído de acordo com a superfície específica dos grãos, a parte fina da mistura é mais rica em ligante do que a parte graúda, portanto, os erros de amostragem não estão somente ligados à granulometria da mistura final, mas também ao teor de ligante. Dessa forma, o destorroamento e o fracionamento do RAP podem proporcionar um maior controle na dosagem da mistura reciclada.

Segundo Oliveira et al. (2012) uma separação adequada das frações do RAP é essencial para alcançar as especificações desejadas de uma mistura. Se um processo de separação das frações do RAP eficiente é utilizado é possível se obter uma mistura final com um menor efeito do envelhecimento proveniente do ligante do RAP.

Quando analisada a parte mais fina do material, verifica-se um teor de ligante maior e com uma variação menor quando comparada com a parte graúda. Genesseeux (2015) separou o RAP em 4 frações diferentes, onde a fração mais fina (0-2 mm) apresentou teor de ligante de 8,5% enquanto a mais graúda (8-12 mm) um teor de apenas 3,2%. Isto demonstra a importância da parte fina do RAP no teor de asfalto. Notou-se ainda que as propriedades do ligante extraído da fração graúda eram muito próximas às do extraído da fração fina, uma vez que o RAP examinado tinha origem de apenas uma fonte.

2.2.3. Ativação do ligante do RAP

Outro ponto importante a ser analisado é a questão da ativação do ligante do RAP e da mistura entre o ligante asfáltico presente no RAP, já envelhecido, e o ligante “novo”, ou agente de reciclagem, a ser aplicado na mistura (LO PRESTI et al., 2019), uma vez que o mecanismo que governa a interação reológica entre estes dois ligantes não é inteiramente compreendido. Existem três cenários que podem ser considerados quanto à ativação do ligante proveniente do RAP:

- a) 0% de ativação, ou seja, o RAP atua como um agregado dentro da mistura reciclada. Também chamado de “agregado negro” ou “*black rock*”;
- b) 100% de ativação, ou seja, todo o ligante proveniente do RAP é ativado e encontra-se disponível para ser combinado com o ligante virgem adicionado;
- c) Ativação parcial, ou seja, apenas uma parte do ligante proveniente do RAP é ativado e fica disponível para ser combinado com ligante virgem. Esta porcentagem de ativação e posterior mistura entre ligantes é dependente de diversos fatores como as propriedades do ligante, a temperatura de usinagem, o tempo de envelhecimento e os aditivos adicionados (GENNESSEAUX, 2015; LO PRESTI et al., 2019).

Segundo Shirodkar et al. (2013), a maioria das agências dos Estados Unidos assumem 100% de ativação do RAP. Gennesseaux (2015) verificou, através de ensaios mecânicos, as hipóteses de mobilização de 0%, 50% e 100% do ligante de uma mistura reciclada com 50% de RAP e concluiu que o ligante envelhecido ainda possui propriedades viscoelásticas e sua mobilização foi igual ou próxima de 100%, isto é, o RAP em misturas asfálticas não deve ser considerado como um agregado negro (*black rock*), mas sim como uma combinação de agregados e ligante asfáltico envelhecido, apesar de ainda existir bastante questionamento sobre essa ativação do ligante proveniente do RAP.

O principal desafio das análises é estimar as propriedades da combinação dos ligantes envelhecido e virgem. Alguns estudos, como os realizados por Gaspar et al. (2017b), Huang et al. (2005) e Zearley (1979), buscaram analisar a relação entre os ligantes a partir da extração do mesmo por etapas, concluindo que a combinação dos mesmos não é homogênea, apresentando um gradiente nas características do ligante proveniente do RAP a medida que se aproxima do agregado do RAP. É possível perceber a influência do RAP com o aumento da rigidez, redução do ângulo de fase e redução da deformação permanente. Da mesma forma, diversos outros estudos buscaram analisar esta interação através de outras técnicas e ferramentas como cromatografia de permeação em gel, espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier e espectroscopia ultravioleta, além da análise da reologia dos ligantes (Gaspar et al., 2017b).

Técnicas de análise que não envolvam a extração dos ligantes são largamente estudadas, uma vez que a extração do ligante não só demanda tempo e recursos,

mas diversos estudos mostraram que esta técnica pode alterar as propriedades do ligante (RICCARDI et al., 2017). A potencial presença de solvente residual, mesmo que em pequena quantidade, pode alterar significativamente as propriedades do ligante. Uma presença de apenas 0,5% de solvente no ligante pode causar uma diminuição de 50% na sua viscosidade (RICCARDI et al., 2017). Diversos estudos buscaram analisar a relação entre os ligantes sem a necessidade de extração dos mesmos (RICCARDI et al., 2016; RICCARDI et al., 2017; BOOSHEHRAN, MOGAWER e BONAQUIST, 2013).

2.3. Envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos

Todo o ligante asfáltico sofre alterações ao longo do tempo, desde a sua produção em uma refinaria até o fim de sua vida útil. Estas modificações podem alterar completamente o comportamento das suas características físicas, químicas e reológicas, o que pode resultar em uma mistura asfáltica mais rígida e propícia à fadiga, apresentando menor durabilidade (SILVA, 2011). Este processo de aumento da consistência e rigidez do ligante asfáltico, traduzido pela perda de suas propriedades mecânicas, é comumente denominado de envelhecimento (SILVA, 2011; POROT et al., 2017; POROT e GRADY, 2016; ABDO, 2016; MORILHA, 2004). Este envelhecimento está associado a diversos fatores como o contato com o oxigênio, incidência de radiação UV, variações de temperatura, excesso de carga dos veículos, teor de vazios após a compactação etc. (SILVA, 2005; OSMARI e ARAGÃO, 2016; ZAUMANIS, MALLICK E FRANK, 2014; MORILHA, 2004).

O envelhecimento do asfalto é explicado por quatro mecanismos: oxidação, endurecimento exsudativo, endurecimento físico e perda de voláteis (HUNTER, SELF e READ, 2015; SILVA, 2011). Segundo Morilha (2004) e Silva (2005) o endurecimento devido à oxidação vem sendo considerado o principal motivo do envelhecimento do ligante asfáltico. A oxidação, em conjunto com alguns fatores que governam a velocidade de reação e seus eventuais efeitos são de grande relevância para a qualidade do ligante e da mistura asfáltica. Esta acontece principalmente durante a fabricação das misturas asfálticas e, de forma mais lenta, ao longo de sua vida útil. Já o endurecimento exsudativo é resultante da migração de componentes oleosos do ligante para o agregado mineral e o endurecimento físico é atribuído à reordenação

de moléculas e à cristalização de parafinas da fração saturada do ligante asfáltico (SILVA, 2005).

Os principais fatores que influenciam no envelhecimento do asfalto a curto prazo – sendo considerados os processos de estocagem, manuseio e aplicação – são a temperatura e grau de exposição do mesmo ao oxigênio, ou seja, quanto maior a superfície específica e a temperatura de um ligante, maior o seu grau de oxidação (TONIAL, 2001). Um ligante asfáltico já aplicado em um pavimento, possui uma grande superfície específica, porém está sujeito a uma temperatura baixa (quando comparada aos valores de usinagem), levando assim a um envelhecimento mais lento. Entretanto, se considerarmos temperaturas elevadas e grande superfícies específicas, como as que inevitavelmente ocorrem ao longo do processo de usinagem, manuseio, espalhamento e compactação, o envelhecimento é acelerado, podendo a viscosidade do ligante ser multiplicada por duas a quatro vezes em um intervalo inferior a duas horas (TONIAL, 2001).

2.3.1. Etapas do envelhecimento asfáltico

O asfalto constitui uma composição complexa de hidrocarbonetos de massa molar e estruturas químicas diferentes (SILVA, 2005). A fórmula exata do ligante asfáltico é muito variável pois ele é um resíduo da produção do refino do petróleo cru e dependente do tipo de petróleo disponível no momento do refino. Segundo Silva (2005), devido à complexidade de sua composição química, pesquisadores elaboraram métodos de separação dos ligantes segundo a sua solubilidade em solventes específicos. A metodologia mais utilizada e citada na literatura separa por cromatografia as seguintes frações determinadas como SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos) (HUNTER, SELF e READ, 2015).

O equilíbrio entre o teor destas frações está intimamente relacionado com as propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico. Segundo Tonial (2001), no processo de envelhecimento ocorre uma diminuição no teor de aromáticos, que se transformam em resina e posteriormente em asfaltenos, resultando, ao final do processo, em uma pequena variação do teor de saturados e resinas, uma diminuição de aromáticos e um aumento dos asfaltenos.

Conforme já reportado em diversas bibliografias (SILVA, 2005; SILVA, 2011; MORILHA, 2004; TONIAL, 2001; HUNTER, SELF e READ, 2015) o envelhecimento

do ligante asfáltico pode ser separado em três principais etapas: [1] o processo de usinagem da mistura asfáltica, onde o ligante asfáltico é aquecido a altas temperaturas (160° - 180°) em contato com o oxigênio para ser misturado aos agregados, também aquecidos, formando uma película fina de alta superfície específica. Devido às altas temperaturas e elevada superfície específica, esta normalmente é a etapa de maior impacto no envelhecimento total sofrido pela ligante. [2] o processo de estocagem, transporte, espalhamento e compactação, onde o ligante asfáltico fica em constante contato com o oxigênio a alta temperaturas e [3] o processo de envelhecimento ao longo da vida útil do pavimento, onde o mesmo não está sujeito às temperaturas altas da usinagem, mas sofre danos devido ao tráfego e condições climáticas como presença de oxigênio, radiação ultravioleta (UV), além de variações de temperatura.

A Figura 5, publicada no *Shell Bitumen Handbook* (HUNTER, SELF e READ, 2015), baseada em um estudo das alterações na composição dos ligantes em pavimentos em serviço (CHIPPERFIELD et al., 1970), ilustra as três etapas do processo de envelhecimento, onde o eixo Y é representado pelo denominado Índice de Envelhecimento, que é a razão entre a viscosidade a uma dada condição de envelhecimento (η_r) e a viscosidade inicial do ligante (η_0). A figura ilustra ainda a evolução esperada dos componentes químicos do ligante ao longo de todo o processo de envelhecimento. As amostras analisadas foram extraídas dos 3 mm superiores dos corpos de prova analisados.

Figura 5 - Alterações na composição dos ligantes ao longo do tempo

Fonte: Adaptado de Hunter, Self e Read, 2015

Na Figura 5 é possível notar que ao longo do processo de usinagem o ligante estudado por Chipperfield et al. (1970) sofreu grande parte de seu envelhecimento (etapa 1), ao longo do processo de espalhamento e compactação sofreu um salto um pouco menor de envelhecimento (etapa 2) e, por fim, ao longo de sua vida foi sofrendo uma evolução de envelhecimento constante. É possível notar ainda um aumento do teor de asfaltenos no processo de usinagem e compactação e um aumento gradual ao longo dos anos, enquanto os teores de resinas e aromáticos diminuíram ao longo do tempo (HUNTER, SELF e READ, 2015).

Atualmente, são utilizadas duas principais técnicas para simulação do envelhecimento de ligantes asfálticos em laboratório: o *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), preconizado pela ASTM D2872, que busca simular o envelhecimento do asfalto durante o processo de usinagem causado pelo contato de pequenas películas de ligante em contato com o ar aquecido do tambor de usinagem, e o *Pressure Aging Vessel* (PAV), preconizado pela ASTM D6521, que busca simular o envelhecimento do ligante a longo prazo, ou seja, durante a sua vida útil. O ensaio é realizado sob alta pressão e longos prazos, objetivando simular anos de tráfego de veículos e intempéries.

A sequência RTFOT+PAV tem sido amplamente utilizada na literatura para simulação clássica do envelhecimento de ligantes asfálticos (SILVA, 2005). Esta é uma questão que recentemente vem sendo muito discutida, uma vez que após 25 anos do PAV como o teste especificado no SUPERPAVE, alguns pesquisadores demonstraram que este ensaio não é capaz de simular de 5 a 10 anos de envelhecimento em campo (OSMARI et al., 2019). Segundo Moulliet et al. (2016) o procedimento de envelhecimento a longo prazo em laboratório normatizado provavelmente subestima a evolução real sofrido pelas misturas asfálticas. Este fenômeno é ainda mais crítico em países tropicais.

Diversos pesquisadores têm buscado desenvolver ou adaptar testes que simulem adequadamente o envelhecimento dos ligantes a longo prazo (OSMARI et al., 2019). Algumas alternativas existentes para o PAV incluem o *Universal Aging Test* (USAT), *Rolling Cylinder Aging Test* (RCAT) e adaptações do procedimento do PAV com envelhecimentos de 40, 60 e até 80 h (OSMARI et al., 2019; YOUTCHEF, 2016)

2.3.2. Utilização de agente rejuvenescedores

Conforme já mencionado, verificou-se que a adição de RAP nas misturas asfálticas reflete geralmente em um aumento de sua rigidez, devido ao ligante envelhecido já presente no material fresado. Todo o material fresado possui um teor de ligante asfáltico envelhecido, pois este já passou pelo processo de usinagem e ao longo de sua vida útil sofreu efeitos de tráfego, temperatura, chuva, tempo, contato com o oxigênio, radiação UV, entre outros, o que naturalmente resulta em uma maior rigidez e consistência da camada asfáltica (SILVA, 2005; OSMARI e ARAGÃO, 2016; ZAUMANIS, MALLICK E FRANK, 2014; OSMARI et al., 2017).

O crescente emprego de técnicas de reciclagem tem motivado o desenvolvimento de tecnologias que resgatem as propriedades perdidas devido ao envelhecimento dos ligantes (OSMARI e ARAGÃO, 2016). Se não tratado corretamente, este aumento de rigidez pode comprometer o desempenho da mistura reciclada ao longo de sua vida útil, podendo proporcionar defeitos prematuros. O surgimento prematuro de trincas na camada de SRAM, por exemplo, comprometeria o funcionamento da camada dentro da estrutura, contrapondo inteiramente o propósito dessa solução.

Este ligante asfáltico, entretanto, pode ter suas propriedades parcialmente recuperadas se incorporados certos aditivos químicos, denominados agentes rejuvenescedores. Segundo Silva (2011), estes têm o objetivo de reposição de algumas partes das frações leves, óleos maltenos e resinas, conferindo aos ligantes rejuvenescidos características semelhantes à de um ligante asfáltico novo. Em geral, os agentes rejuvenescedores recuperam as propriedades dos ligantes envelhecidos reconstituindo as suas composições químicas (SHEN, AMIRKHANIAN, MILLER, 2008). Para baixos teores de RAP, a utilização de ligantes virgens com maior penetração, ou ligantes modificados, pode ser considerada para compensar o efeito do envelhecimento. Entretanto, para teores mais elevados o uso de agentes rejuvenescedores passa a ser considerado (ZAUMANIS, MALLICK E FRANK, 2014).

O conceito de rejuvenescimento do ligante asfáltico, em princípio, é simples, consistindo em repor os óleos perdidos ao longo do processo de envelhecimento, reequilibrando a composição do ligante de maneira que ele se torne menos frágil. Para isto os agentes rejuvenescedores normalmente possuem óleos que reduzem a viscosidade dos ligantes, melhorando sua adesividade, coesão e flexibilidade. Isto requer uma combinação de maltenos, para facilitar e garantir a incorporação destas frações no ligante asfáltico (SILVA, OLIVEIRA e JESUS, 2012). A Figura 6 demonstra as alterações típicas na composição química do ligante asfáltico durante o processo de envelhecimento e rejuvenescimento conforme fracionamento Rostler. Neste processo o ligante é separado em primeiras acidafinas, segundas acidafinas, polares e asfaltenos, inicialmente feita com n.pentano para precipitação dos alfatlenos e em um segundo momento as demais frações são resultado de reações com ácido sulfúrico em diferentes concentrações (SANT'ANA, 2015).

Figura 6 - Alterações químicas típicas no asfalto ao longo do processo de envelhecimento e rejuvenescimento

Fonte: Adaptado de Silva, Oliveira e Jesus, 2012.

Segundo Moghaddan e Baaj (2016), a escolha de tipo de agente rejuvenescedor deve ser realizada com muito cuidado, uma vez que as alterações que o mesmo causa no ligante asfáltico devem atender às necessidades de curto e longo prazo. A curto prazo, o agente rejuvenescedor deve ser capaz de se difundir rapidamente para ativar o ligante envelhecido para produzir uma mistura homogênea. A longo prazo, o agente rejuvenescedor deve ser capaz de alterar quimicamente o ligante de forma a melhorar suas características reológicas, minimizando a propensão à fadiga e aos trincamentos nas baixas temperaturas. Estas alterações não devem prejudicar o desempenho à deformação permanente e promover condições suficientes para evitar dano por fadiga e desgaste (MOGHADDDAN e BAAJ, 2016). Ainda, Ongel e Hugener (2015) e Grilli, Gnisci e Bocci (2017), observaram que algumas amostras com a utilização de agente rejuvenescedor apresentaram um desempenho a longo prazo inferior ao das amostras virgens, evidenciando a importância da análise da performance do agente rejuvenescedor selecionado.

2.3.3. Dosagem de agente rejuvenescedor em misturas recicladas

A utilização de agente rejuvenescedor em misturas asfálticas recicladas exige uma nova etapa no processo de dosagem da mistura que é a definição da quantidade do agente rejuvenescedor. O teor considerado deve ser balanceado de forma a diminuir a rigidez e aumentar a vida de fadiga da mistura, sem causar um aumento na deformação permanente da mesma (ZAUMANIS, MALLICK E FRANK, 2014; MERCADO et al., 2018).

Existem diversos métodos utilizados para a determinação do teor ótimo de agente rejuvenescedor em uma mistura asfáltica. São utilizados desde métodos baseados em análises de propriedades empíricas, como penetração e ponto de amolecimento, até métodos baseados nas propriedades fundamentais do material, como módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e ângulo de fase (δ) (OSMARI e ARAGÃO, 2016). Os métodos tradicionais baseiam-se na determinação dos teores capazes de restaurar as características do ligante asfáltico desejado como penetração, ductilidade, ponto de amolecimento e viscosidade.

Atualmente outras metodologias têm sido propostas considerando parâmetros mais complexos dos ligantes asfálticos. Segundo Mercado et al. (2018), alguns pesquisadores têm selecionado o teor ótimo de agente rejuvenescedor de acordo com *blending charts* baseados na viscosidade e/ou penetração, enquanto outros pesquisadores têm considerado o sistema *Performance Grade* (PG). Outro parâmetro muito utilizado para a dosagem de misturas recicladas é o parâmetro *Glover-Rowe* (G-R), que é calculado com valores de rigidez e ângulo de fase a 15°C e frequência de 0,005 rad/s (MERCADO et al., 2018).

Os *blending charts* também são comumente utilizados para a dosagem do teor de RAP nas misturas recicladas. Os mesmos podem ser descritos simplificadaamente como uma relação entre variadas porcentagens de RAP, ou agente rejuvenescedor, em função dos valores de algum parâmetro (Ex: temperaturas críticas PG, penetração, viscosidade etc.). Pesquisadores têm consistentemente recomendado a utilização destes gráficos para dosagem de misturas recicladas (SHIRODKAR, 2013).

Zaumanis, Mallick e Frank (2014) analisaram o efeito de diversos agentes rejuvenescedores com o objetivo de avaliar os efeitos nos ligantes envelhecidos e determinar uma metodologia de dosagem destes agentes de forma a recuperar os parâmetros da especificação Superpave. Para isto desenvolveram *blending charts* em

função do teor de rejuvenescedor para os variados agentes considerados no estudo. Dentre as principais conclusões, verificou-se que: (i) todos os agentes rejuvenescedores puderam ser ajustados para recuperar o PG e a penetração dos ligantes virgens originais, (ii) a penetração aumenta exponencialmente com o teor de rejuvenescedor e (iii) agentes orgânicos de origem vegetal requerem doses menores quando comparados com os derivados de petróleo.

Mercado et al. (2018) realizaram uma análise semelhante utilizando *blending charts* para comparar o teor ótimo de um agente rejuvenescedor baseado nas temperaturas altas e baixa do PG, assim como o parâmetro G-R e o ΔT_c , que é a diferença de temperatura do BBR (*Bending Beam Rheometer*) em que o *creep stiffness* (S) e o *m-value* alcançam os valores especificados na metodologia do PG (AASHTO M320, 2015) de 300 MPa e 0,30, respectivamente. Verificou-se que a dosagem do agente rejuvenescedor pela temperatura baixa do PG resultou em teores mais baixos e a dosagem pelo ΔT_c resultou em teores mais altos. A dosagem pela temperatura alta, por sua vez apresentou valores intermediários, além de apresentar melhor restauração das propriedades dos ligantes, mesmo após envelhecimento.

Ainda, segundo Osmari (2016), apesar de estas metodologias representarem um avanço nas técnicas de dosagem de agentes rejuvenescedores em comparação com metodologias que se baseiam somente em parâmetros empíricos, o grau PG dos ligantes asfálticos ainda não é um parâmetro suficiente para verificar o grau de rejuvenescimento dos materiais asfálticos envelhecidos, posto que materiais com a mesma classificação podem apresentar características muito distintas em relação aos parâmetros considerados. Vale observar ainda que a dosagem pelo grau PG não leva em consideração parâmetros provenientes de ensaios recentemente desenvolvidos, como o de fadiga LAS (*Linear Amplitude Sweep*).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais considerados no desenvolvimento do presente estudo e os procedimentos experimentais realizados para avaliação das propriedades reológicas das combinações resultantes das misturas de ligante envelhecido (extraído do RAP, RL) e ligante altamente modificado, seja adicionando aditivo rejuvenescedor, ou não.

3.1. Seleção de materiais

3.1.1. Ligante altamente modificado (HiMA)

O ligante asfáltico altamente modificado utilizado no estudo foi proveniente de um trecho executado na rodovia SC-114, trecho Painei – São Joaquim. Na Figura 7 é apresentado um mapa esquemático da localização aproximada do trecho onde os materiais utilizados foram coletados.

Figura 7 - Localização aproximada do trecho de coleta dos materiais

Fonte: Autor.

No local foi aplicada uma mistura de Concreto Asfáltico Usinado a Quente na faixa C DNIT 3/8" adaptada à SAMI, citada como SRAM no presente estudo. Esta mistura é indicada para camada de pavimento executada sobre um revestimento antigo

deteriorado, para posterior aplicação de um recapeamento asfáltico. Esta camada intermediária serve como camada de absorção, retardando as trincas de refletirem para o concreto asfáltico novo, eliminando em alguns casos a necessidade de intervenção prévia de correção do revestimento existente. A camada normalmente é composta por uma porção de agregados de tamanho nominal menor e um ligante modificado, proporcionando uma característica mais resiliente à camada e aliviando as tensões geradas no fundo do novo revestimento.

A mistura aplicada utilizou um ligante asfáltico altamente modificado por Polímero (AMP) denominado de HiMA (*Highly Modified Asphalt*). O HiMA pode ser caracterizado por um ligante asfáltico com uma taxa de incorporação de polímero SBS superior aos ligantes modificados convencionais, porém ainda resultando em uma mistura viável para usinagem e aplicação em campo. O ligante utilizado no trecho supracitado e, em consequência, no estudo em questão, foi o mesmo utilizado por Reis et al. (2016) e teve como base para modificação um CAP 50-70 com a adição de 7,5% do polímero tipo SBS. Segundo Reis et al. (2016), este ligante foi classificado como um PG 88-22 segundo a especificação americana Superpave (AASHTO M320, 2015) ou PG 76-22E, segundo a avaliação considerando o ensaio de MSCR (AASHTO M 332, 2014).

Reis et al. (2016) compararam o desempenho do HiMA e mais quatro ligantes asfálticos em relação à deformação permanente utilizando-se do HWTD (*Hamburg Wheel Tracking Devices*). Os resultados demonstraram que a mistura utilizando o HiMA apresentou uma deformação inferior a 1/7 da deformação sofrida pela mistura com ligante CAP 50-70 convencional. A mistura com HiMA também apresentou deformação inferior à mistura usinada com um ligante modificado AMP 60/85. No estudo, o desempenho superior do HiMA foi relacionado com o elevado ponto de amolecimento e alta recuperação elástica, proporcionando a mistura asfáltica uma maior resistência à temperatura e ao efeito das cargas. Na Tabela 1 é apresentada a caracterização convencional do ligante HiMA recebida juntamente com o material em conjunto com o valor limite especificado para a maior classe de ligante modificado (65/90-E) na Resolução nº 32 (2010) da Agência Nacional do Petróleo (ANP).

Tabela 1 - Caracterização convencional do ligante HiMA

Método	Ensaio	Resultado	Especificação ANP (65/90-E)
NBR-6576	Penetração à 25°C, 5s, 100 g (0,1 mm)	45	40 – 70
NBR-6560	Ponto de Amolecimento (°C)	84	mín. 65
NBR-11341	Ponto de Fulgor (°C)	308	mín. 235
NBR-15184	Visc. Brookfield a 135°C, SP21, 20 rpm (cP)	2.170	máx. 3.000
NBR-15184	Visc. Brookfield a 150°C, SP21, 50 rpm (cP)	997	máx. 2.000
NBR-15184	Visc. Brookfield a 177°C, SP21, 100 rpm(cP)	309	máx. 1.000
NBR-15086	Recuperação Elástica à 25°C, 20 cm (%)	96	mín. 90
NBR-6296	Densidade Reativa à 20/4°C	1,003	-
Ensaio no resíduo do RTFOT			
NBR-15235	Variação em Massa (%)	0,02	máx. 1,0
NBR-6560	Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	4	-5 a +7
NBR-6576	Penetração Original (%)	71,8	mín. 60
NBR-15086	Recuperação Elástica Original a 25 °C (%)	95,3	mín. 80

Fonte: Compasa do Brasil Asfaltos e Serviços – Certificado de Qualidade 18/05/16 e Resolução ANP Nº 32 (2010)

A composição seca da mistura aplicada no trecho executado, faixa C DNIT 3/8” adaptada à SAMI, é constituída por 1% de Cal – CH I, 60% de Pedrisco 3/8” e 39% de Pó de Pedra, sendo os dois últimos de natureza basáltica e provenientes da pedreira São Joaquim. A granulometria dos agregados é apresentada na Figura 9. Foi recebido ainda, juntamente com os materiais, o projeto de dosagem da mistura asfáltica, realizado pela metodologia Marshall, que resultou em um teor ótimo de ligante HiMA de 6,5%.

Esta mistura foi considerada como controle no presente estudo e, portanto, o teor de 6,5% foi mantido em todos os cenários analisados, de forma que não houve alteração da dosagem quando da utilização do RAP na composição das misturas.

3.1.2. Material fresado (RAP)

O material asfáltico fresado utilizado é proveniente da BR-381, rodovia Fernão Dias. O material foi fresado da faixa 2, da pista sentido São Paulo, na altura do km 949. Após a fresagem, o material foi guardado em barris de plástico para transporte e estocagem. Para o desenvolvimento do presente estudo foi separado um dos barris estocados com o material fresado para caracterização e realização dos ensaios necessários. Este barril foi considerado como única fonte de material fresado.

Para a separação da fração fina do RAP, em um primeiro momento foi feita a secagem do material em temperatura ambiente. Para isto estendeu-se o material sobre uma lona plástica durante uma semana, realizando o revolvimento diário do mesmo até que este apresentasse um aspecto visual seco. Após este processo utilizou-se um peneirador elétrico para separação do material em duas frações, passante e retido na peneira #4 (abertura 4,76 mm), limite da porção miúda/graúda pela ABNT NBR 7211:2005. Por fim, o material passante na peneira #4, porção de interesse no presente estudo, foi homogeneizado, quarteado e armazenado em sacos plásticos. A Figura 8 demonstra o aspecto das frações de RAP antes e após o processo de peneiramento.

Figura 8 - Aspecto das frações de RAP completo antes do peneiramento (esquerda/cima) e após peneiramento (direita/baixo)

Fonte: Autor.

Para caracterização do teor de ligante e obtenção de material para realização dos ensaios reológicos foi feita uma extração, por refluxo, do ligante - descrito na norma ASTM D2172 (2017), método B - em três amostras e consequente separação do RAP em ligante envelhecido e agregado. A Tabela 2 demonstra o resultado de teor de ligante com valor médio de 5,7%.

Tabela 2 - Resultados teor de ligante extração RAP por refluxo

Amostra	Teor de Ligante (%)
Amostra 1	6,0%
Amostra 2	5,6%
Amostra 3	5,6%
Média	5,7%

Fonte: Autor

A granulometria dos agregados do RAP, após a extração do ligante é apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Granulometria agregados e do RAP após extração de ligante

Fonte: Autor.

3.1.3. Agente rejuvenecedor

O agente rejuvenecedor (AR) utilizado no presente trabalho, fornecido pela Kraton Polymers, foi o SYLVAROADTM RP 1000. Este aditivo é produzido a partir de óleo vegetal de pinheiro e foi especificamente desenvolvido para ser eficaz no tratamento de ligantes asfálticos envelhecidos (POROT, 2016). O mesmo tem sido analisado largamente em diversos estudos (POROT et al., 2017; VEERARAGAVAN et al., 2017; POROT e GRADY, 2016; GOMES et al., 2016). A dosagem típica é de 3 a 7% em massa do ligante asfáltico envelhecido, dependendo de suas propriedades (POROT, 2016).

Turner, Taylor e Tran (2015) analisaram o efeito deste AR em ligantes asfálticos. Concluiu-se que 1% do AR é capaz de recuperar aproximadamente 2 graus da temperatura crítica do ligante envelhecido, aproximando-o do ligante virgem. A adição de AR não alterou significativamente as perdas de massa nos envelhecimentos a curto e longo prazo. Verificou-se ainda que apesar de ter diminuído a rigidez dos ligantes asfálticos, quando comparado com o ligante envelhecido sem o tratamento, não houve benefícios nas propriedades elásticas/viscosas das misturas.

3.2. Composição das misturas de ligantes

No presente estudo, a influência do ligante envelhecido foi analisada apenas na escala de ligante asfáltico (sem os agregados). Neste tópico são descritos os procedimentos para análise da combinação resultante da mistura dos ligantes: envelhecido (RL) e HiMA, seja adicionando agente rejuvenecedor, ou não.

Foram estabelecidos seis cenários de comparação substituindo-se 0%, 15%, 30%, 45%, 60% e 75% das porcentagens de agregados secos da mistura de projeto por RAP, passante na peneira #4, além da comparação com o ligante puro envelhecido do RAP. Estes teores foram selecionados com o objetivo de abranger de forma uniforme um espectro de utilização dos agregados reciclados.

Para a análise do efeito do AR analisou-se o cenário em que 60% dos agregados secos foram substituídos por RAP. Selecionou-se esta combinação por ser uma mistura com alto teor de ligante envelhecido, favorecendo assim a visualização dos benefícios do agente rejuvenecedor. Foram estabelecidos três cenários de comparação com diferentes teores de agente rejuvenecedor: 5%, 7,5% e 10%, além

do cenário base com 0% de AR já mencionado. Observa-se que os teores de agente rejuvenescedor são determinados sobre a massa de ligante de RAP na mistura e não sobre a massa total.

Na Figura 10 é apresentado novamente um fluxograma esquemático das combinações e ensaios propostos. Têm-se, portanto, 10 combinações de ligantes diferentes analisadas no estudo, os quais foram denominados de:

- a) RL: ligante extraído diretamente da porção fina do RAP;
- b) HiMA: ligante altamente modificado (HiMA);
- c) HiMA+15% RAP: mistura de ligantes resultante da substituição de 15% dos agregados secos da mistura de referência por RAP;
- d) HiMA+30% RAP: mistura de ligantes resultante da substituição de 30% dos agregados secos da mistura de referência por RAP;
- e) HiMA+45% RAP: mistura de ligantes resultante da substituição de 45% dos agregados secos da mistura de referência por RAP;
- f) HiMA+60% RAP: mistura de ligantes resultante da substituição de 60% dos agregados secos da mistura de referência por RAP;
- g) HiMA+60% RAP+5% AR: mistura de ligantes resultante da substituição de 60% dos agregados secos da mistura de referência por RAP tratada com 5% da massa de ligante do RAP de AR;
- h) HiMA+60% RAP+7,5% AR: mistura de ligantes resultante da substituição de 60% dos agregados secos da mistura de referência por RAP tratada com 7,5% da massa de ligante do RAP de AR;
- i) HiMA+60% RAP+10% AR: mistura de ligantes resultante da substituição de 60% dos agregados secos da mistura de referência por RAP tratada com 10% da massa de ligante do RAP de AR;
- j) HiMA+75% RAP: mistura de ligantes resultante da substituição de 75% dos agregados secos da mistura de referência por RAP;

Figura 10 - Ensaios e combinações de ligantes estudadas

Fonte: Autor.

3.2.1. Considerações sobre a composição das misturas de ligantes

No presente estudo um dos grandes desafios foi a escassez de material para análise, em especial da parte de agregados. Por este motivo foram estabelecidos processos de combinação de ligantes, com o objetivo de economia de serviços e materiais, que não envolviam a usinagem dos diferentes cenários de misturas e subsequente extração dos ligantes. Dessa forma, para realização dos ensaios dos diversos cenários combinados de ligante altamente modificado, ligante proveniente do RAP e agente rejuvenescedor não foram realizadas as misturas completas, e sim a mistura direta dos ligantes asfálticos (e AR, quando necessário).

Outro ponto importante na consideração da combinação dos ligantes asfálticos é a questão da homogeneização entre o ligante asfáltico presente no RAP, já envelhecido, e o ligante “novo” a ser aplicado na mistura, uma vez que o mecanismo que governa a interação reológica entre estes dois ligantes ainda não é inteiramente compreendido e diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos na tentativa de quantificação dessa interação. Um dos grandes desafios é estimar a porcentagem de ativação do ligante asfáltico envelhecido na mistura reciclada final. Esta porcentagem de ativação vem sendo atribuída a uma característica mais peculiar do RAP em questão (LO PRESTI et al., 2019), enquanto a interação é dependente de diversos fatores como as propriedades dos ligantes, a temperatura de usinagem, o tempo de envelhecimento e aditivos adicionados (GENNESSEAU, 2015; GASPAR et al., 2017b). Gennesseaux (2015) concluiu que a ativação do ligante envelhecido seria próxima de 100% para misturas com até 50% de RAP para misturas produzidas em laboratório, apesar de ressaltar que seriam necessários avanços adicionais antes de uma utilização generalizada. Para combinação das misturas no presente estudo adotou-se a premissa de ativação de 100% do ligante envelhecido proveniente do RAP.

Quando se adiciona certa porcentagem de RAP na mistura asfáltica a quente, é necessário um ajuste da massa de agregados pois o material reciclado passa a ser considerado como uma combinação de ligante envelhecido e agregado. Baseando-se na massa ajustada de agregados (agregados virgens + agregados provenientes do RAP), na massa de ligante envelhecido (proveniente do RAP) e no teor de ligante da mistura de referência (6,5%), é possível determinar a massa de ligante altamente modificado (HiMA) necessária para combinar cada cenário. Para determinação da

composição das misturas considerou-se que o teor de ligante final de todas as misturas seria igual ao de referência de 6,5%. Desta forma, substituindo-se um determinado teor dos agregados secos por RAP, é possível dividir o RAP em agregados e ligante (com base no teor de 5,7% determinado por extração por refluxo – ASTM D2172, 2017) e calcular a massa de agregados final (agregado virgem+agregado do RAP) e a massa de ligante proveniente do RAP presentes na mistura. Por fim, a partir da premissa de manter o teor de ligante final da mistura igual à referência (6,5%), é possível calcular a massa de HiMA a ser acrescentada para compor os vários cenários.

Como exemplo da composição podemos supor uma substituição de 30% de RAP nos agregados secos de 100 kg da mistura de referência. Originalmente esta mistura era composta por 93,5 kg de agregados secos e 6,5 kg de HiMA. Ao se substituir 30% dos agregados por RAP (com teor de 5,7%) teremos que os 93,5 kg serão compostos respectivamente por 65,45 kg de agregados virgens, 26,44 kg de agregados provenientes do RAP e 1,61 kg de ligante proveniente do RAP. Com base na nova massa de agregados (virgens=65,45 kg e provenientes do RAP=26,44 kg) e a quantidade de ligante proveniente do RAP (1,61 kg), já presente na mistura, é possível se calcular a quantidade adicional de ligante HiMA necessária a se adicionar na mistura para se obter um teor final de 6,5%, resultado neste exemplo em 4,78 kg. Desta forma, para o cenário de substituição de 30% dos agregados secos por RAP, a combinação final do ligante da mistura será composta por 74,8 % de HiMA ($4,78 \div (4,78 + 1,61) = 74,8\%$) e 25,2% de ligante proveniente do RAP ($1,61 \div (4,78 + 1,61) = 25,2\%$).

A partir desta análise determinou-se que nos cenários em que 15%, 30%, 45%, 60% e 75% dos agregados secos da mistura de referência foram substituídos por RAP, o teor de ligante de 6,5% da mistura resultante é composto por 87,5%, 74,8%, 61,9%, 48,7% e 35,3% de HiMA, respectivamente, sendo o restante de ligante envelhecido do RAP. A Figura 11 exemplifica o processo considerado para o cenário de 30% de RAP.

Figura 11 - Porcentagens dos ligantes para o cenário de 30% de RAP

Fonte: Autor.

Para as combinações analisadas que possuem o agente rejuvenescedor, o processo de determinação das misturas foi semelhante, apenas com a alteração da consideração do agente rejuvenescedor como integrante da massa de ligante envelhecido considerada. Desta forma, inicialmente determinou-se a massa de ligante envelhecido necessária e, em seguida, dividiu-se essa massa em ligante envelhecido + agente rejuvenescedor.

Novamente, observa-se que os teores de agente rejuvenescedor são determinados sobre a massa de ligante do RAP na mistura e não sobre a massa total. A utilização de 5% de AR em uma amostra de 100 g de ligante envelhecido, por exemplo, seria composta de 5 g de AR e 95 g de ligante envelhecido.

A Figura 12 apresenta o processo considerado para os cenários com AR na composição. Como o teor de agente rejuvenescedor é considerado apenas na massa de ligante proveniente do RAP, a porcentagem de HiMA do cenário de 60% (considerado para as misturas com AR) é a mesma do cenário sem o AR.

Figura 12 - Porcentagens para o cenário de 60% RAP com agente rejuvenescedor

Fonte: Autor.

3.2.2. Combinação dos ligantes

Entende-se ainda que, como a combinação dos ligantes que se deseja analisar é a resultante após a usinagem da mistura, o ligante altamente modificado deve estar envelhecido na mistura, para isto utilizou-se o HiMA após o *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), de acordo com a ASTM D2872 (2012). Como o RAP é acrescentado em um segundo momento na usinagem, não recebendo aquecimento direto, mas apenas por transferência de calor do resto da mistura, considerou-se que este não

passaria por envelhecimento significativo durante a usinagem. Portanto, combinou-se o ligante HiMA, envelhecido pelo RTFOT, e o ligante diretamente extraído das amostras da porção fina (passante na peneira #4) do RAP nas porcentagens de 15%, 30%, 45%, 60% e 75%.

As amostras sem o agente rejuvenescedor foram pesadas em cápsulas pequenas (de ensaio de penetração), com uma balança de alta precisão. O processo de combinação dos ligantes sem o agente rejuvenescedor foi realizado obedecendo as seguintes etapas:

- a) Os ligantes foram aquecidos até uma temperatura mínima que possibilitasse o manuseio para a pesagem (cerca de 130~140 °C);
- b) Adicionou-se uma massa de ligante altamente modificado na cápsula de mistura (cerca de 10 a 15 g). Optou-se por adicionar o ligante HiMA antes do ligante do RAP (RL) por ser de mais difícil manuseio devido à presença do polímero, dificultando a pesagem com precisão;
- c) Dada a massa de ligante HiMA adicionada na cápsula de mistura, adicionou-se a quantidade de RL necessária para compor cada cenário;
- d) A cápsula, imediatamente após a pesagem dos dois ligantes, foi levada a um forno pré-aquecido a 120 °C por 10 min e então os ligantes foram misturados manualmente por 3 min com uma espátula;
- e) Repetiu-se o processo até a combinação de todos os cenários desejados.

Para os cenários que havia incorporação de AR, por sua vez, estabeleceu-se um processo diferenciado, de forma a favorecer a ação de rejuvenescimento. Para a mistura das diferentes combinações analisadas (60% de RAP com 5%, 7,5% e 10% de AR) foi utilizado um misturador adaptado a partir de um Thermosel de viscosímetro Brookfield em amostras de 18 g.

As amostras com o agente rejuvenescedor foram pesadas para os diversos cenários em papel antiaderente, com uma balança de alta precisão. As amostras após a pesagem são ilustradas na Figura 13.

Figura 13 – (a) Amostra HiMA, (b) Amostra RL

(a)

(b)

Fonte: Autor.

O processo de combinação dos ligantes com o agente rejuvenescedor, ilustrado na Figura 14, foi realizado obedecendo as seguintes etapas:

- a) Os ligantes foram aquecidos até uma temperatura mínima que possibilitasse o manuseio para a pesagem (cerca de 130~140 °C);
- b) Os ligantes HiMA e proveniente do RAP foram pesados individualmente em papel antiaderente compondo os cenários analisados;
- c) Após esfriar até temperatura ambiente, as amostras foram inseridas em uma cápsula do viscosímetro Brookfield e colocadas em um Thermosel aquecido a 150° C por 5 min para acomodação dos ligantes;
- d) Adicionou-se a quantidade de AR necessária para compor os cenários desejados;
- e) Montou-se o aparato final para combinação dos ligantes utilizando o Thermosel, um misturador elétrico e uma haste adaptada;
- f) Cada combinação de ligante do RAP, HiMA e AR foi misturada por 60 min a 150 rotações por minuto. Este processo objetivou proporcionar a completa incorporação e ação do AR na mistura.

Figura 14 - (a) Pesagem do agente rejuvenescedor, (b) Aparato final para mistura dos ligantes e (c) Aspecto final do ligante após mistura

Fonte: Autor

Por fim, para realização dos ensaios de *Bending Beam Rheometer* (BBR) (ASTM D6648, 2016) as amostras foram envelhecidas no *Pressure Aging Vessel* (PAV) por 20 h a 100°C de acordo com a metodologia ASTM D6521 (2018).

3.3. Procedimentos experimentais

Neste ponto do estudo são apresentadas as metodologias para realização dos ensaios de caracterização reológica dos ligantes analisados. Os ligantes asfálticos foram avaliados através da caracterização viscoelástica linear (curva mestra), utilizando o *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), além de ensaios de deformação permanente, *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) e fadiga, *Linear Amplitude Sweep* (LAS), ambos também no DSR, e trincamento térmico no *Bending Beam Rheometer* (BBR), conforme descritos a seguir.

3.3.1. Caracterização viscoelástica linear dos ligantes

Os ligantes foram testados utilizando o DSR disponível no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os ensaios foram realizados com deformação controlada, de magnitude pequena o suficiente para garantir que as amostras permanecessem no regime viscoelástico

linear ($\gamma=0,01\%$), sob uma faixa de frequências (1 a 100 rad/s) e temperaturas variadas a cada 6°C (46°C, 52°C, 58°C, 64°C, 70°C e 76°C), com uma geometria paralela de 25 mm de diâmetro e com um gap de 1 mm. Observa-se que para as amostras de HiMA antes e após o envelhecimento foram realizados levantamento de dados também na temperatura de 40°C e para as amostras com agente rejuvenescedor foram realizados ensaios com temperaturas a cada 12°C (40°C, 52°C, 64°C e 76°C). Foram realizados ensaios em duas amostras para cada cenário de ligante e apresentados os resultados de módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e ângulo de fase (δ).

3.3.2. Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

A literatura atribui aos agregados a maior responsabilidade no combate à deformação permanente de misturas asfálticas, porém, o ligante também possui um papel importante nessa matriz, podendo auxiliar de forma significativa (LEANDRO, VASCONCELOS e BERNUCCI, 2017; LEANDRO, 2016). A premissa inicial do presente trabalho é que os materiais aqui avaliados são destinados a camadas de SRAM, tipicamente conhecidas e caracterizadas por possuírem espessuras pequenas e serem aplicadas antes de camadas asfálticas de maiores espessuras, atuando primordialmente no combate à reflexão de trincas, mas ainda tendo o papel de ser uma camada resiliente, de forma que o ensaio de MSCR, por meio dos parâmetros J_{nr} (explicado a seguir), além do percentual de recuperação, podem também auxiliar na compreensão dos efeitos do RAP e do AR nas misturas de ligantes.

Os ligantes foram testados com o mesmo DSR utilizado para a caracterização viscoelástica linear e foram seguidos os procedimentos preconizados pela especificação ASTM D7405-15 para realização do ensaio de *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR). Vale observar que o parâmetro de deformação permanente original do Superpave ($G^*/\sin\delta$) também poderia ser utilizado para verificação do desempenho da composição com ligante extraído do RAP, porém este parâmetro não captura o verdadeiro potencial de recuperação do ligante asfáltico sobre carregamento e descarregamento, principalmente para ligantes modificados (VASCONCELOS et al., 2016), de forma que se optou pela consideração do ensaio de MSCR.

Aplicou-se carregamento nas amostras em ciclos de tensão constante durante 1 segundo, seguidos de período de repouso de 9 s. Foram aplicados vinte ciclos com

uma tensão de 100 Pa, nos quais os dez primeiros foram utilizados apenas para acomodação da amostra, e dez ciclos com uma tensão de 3.200 Pa. Foram testadas duas amostras com geometria paralela de 25 mm de diâmetro e gap de 1 mm, sendo adotada a média dos resultados para a análise.

Apesar do teste de MSCR ser comumente realizado na temperatura alta do PG dos ligantes, foram selecionadas três temperaturas de modo a se determinar o comportamento dos mesmos em diferentes condições. Os testes, portanto, foram realizados nas temperaturas de 64°C, 70°C e 76°C para todos os ligantes analisados, sem aditivo rejuvenescedor. Para os ligantes com aditivo rejuvenescedor foi utilizada apenas a temperatura de 76°C devido à escassez das amostras de RL e ser a condição mais crítica.

Foram determinados os valores do J_{nr} (*non-recoverable creep compliance*) e R (*percent recovery*) para as tensões de 100 Pa e 3.200 Pa.

3.3.3. Linear Amplitude Sweep (LAS)

O ensaio de fadiga *Linear Amplitude Sweep* (LAS) foi realizado de acordo com a especificação AASHTO TP 101-14. O LAS foi concebido com o objetivo principal de ser um ensaio de fadiga rápido e eficiente, poupando horas de ensaio consequentes de outros testes, como, por exemplo, o *Time Sweep Test* (TST) (CAMARGO, 2016; HINTZ et al., 2011; HINTZ e BAHIA, 2013; BESSA, 2017).

O ensaio de LAS foi proposto inicialmente por Jonhson (2010). A análise de seus resultados foi proposta baseada na mecânica do dano contínuo viscoelástico através da taxa de acúmulo de dano. O autor correlacionou e validou os resultados ao comportamento de misturas asfálticas em laboratório e campo. Desde então diversas outras abordagens têm sido estudadas por pesquisadores para obter a resistência a fadiga de ligantes asfálticos através do LAS (BESSA, 2017).

As amostras foram preparadas em uma geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro com gap de 2 mm. Em um primeiro momento foi realizada uma varredura de frequências (0,2 a 30 Hz), com deformação baixa o suficiente para não causar dano ao material e o mantê-lo no regime viscoelástico linear ($\gamma=0,1$). Em um segundo momento, foi realizada uma varredura linear de amplitudes de deformação (0% a 30%) ao longo de 3.100 ciclos em uma frequência constante de 10 Hz de forma a causar

um dano por fadiga acelerado no material. Por fim, utilizou-se a teoria simplificada do dano contínuo viscoelástico para calcular a vida de fadiga com base nos resultados da varredura de frequências e amplitudes.

Outra abordagem para determinação da resistência ao dano através do ensaio de LAS poderia ser o índice de tolerância ao dano, obtido através da determinação do tamanho da fissura na ruptura (MARTINS, 2014). Segundo Bessa (2017), normalmente o tamanho da trinca na ruptura (a_f) é considerado no valor mínimo da taxa de crescimento da trinca. Isto ocorre no momento em que a resistência à fadiga começa a diminuir rapidamente, isto é, quando o material começa a romper. Quando maior o valor de a_f , maior o a resistência ao trincamento por fadiga do material (BESSA, 2017).

Com apenas um ensaio de LAS é possível determinar a curva de fadiga teórica para diversas deformações. Estabeleceu-se uma temperatura de ensaio de 20°C, uma vez que a fadiga de revestimentos asfálticos ocorre em temperaturas de intermediárias a baixas. Foram ensaiadas duas amostras para cada ligante. Observa-se ainda que as amostras com 45% de RAP não foram analisadas devido a alterações em seus resultados.

Ainda, segundo Martins (2014), o critério de N_f para classificação de ligantes permite avaliar adequadamente o comportamento dos mesmos em relação à resistência ao dano, entretanto, o parâmetro fator de fadiga de ligantes (FFL) apresenta vantagens na caracterização dos materiais, visto que leva em consideração a inclinação da curva de fadiga e, conseqüentemente, a variação da vida de fadiga (N_f) com o nível de deformação imposto. Para cálculo do FFL foi determinada a área sob a curva de fadiga no espaço log-log considerando as mesmas deformações propostas por Martins (2014) de 1,25% e 2,5%, ilustrado na Figura 15 e na equação a seguir.

$$FFL = \frac{(\log N_{f,1,25\%} + \log N_{f,2,5\%})}{2} \times (\log 0,025 - \log 0,0125)$$

Figura 15 - Ilustração do cálculo do FFL a partir da curva de fadiga

Fonte: Martins, 2014.

3.3.4. *Bending Beam Rheometer (BBR)*

O ensaio para analisar o comportamento a baixas temperaturas *Bending Beam Rheometer (BBR)* foi realizado de acordo com a especificação ASTM D6648 (2016). O ensaio de BBR foi concebido para determinar a resposta de ligantes asfálticos à aplicação de uma carga constante a baixas temperaturas e é utilizado principalmente para determinar os valores do *flexural creep stiffness (S)* e do *logarithmic creep velocity (m-value)*. Este ensaio faz parte da classificação de ligantes asfálticos prevista no Superpave para determinação do *Performance Grade (PG)*, preconizada pela AASHTO M 320 (2015).

Uma carga constante de 980 ± 50 mN é aplicada por 240 s no ponto médio de uma viga prismática simplesmente apoiada. A deflexão no ponto médio da viga é registrada ao longo do tempo. Na Figura 16 é demonstrado o princípio do ensaio de BBR.

Figura 16 - Princípio ensaio BBR

Fonte: Sybilski, Vanelstraete e Partl, 2004.

Na sequência a *flexural creep stiffness* $S(t)$ e sua taxa de variação $m(t)$ podem ser calculados ao longo do tempo. Conforme preconizado pela AASHTO M 320 (2015), a temperatura baixa do PG pode ser determinada quando o $S(60)$ for ≤ 300 MPa e o $m(60)$ for $\geq 0,3$. Para isto é recomendado que os valores médios de $S(60)$ e $m(60)$ de pelo menos três temperaturas sejam utilizados para determinação da temperatura baixa crítica do PG, não sendo recomendada a extrapolação das curvas (SYBILSKI, VANELSTRAETE E PARTL, 2004).

No presente estudo as amostras foram moldadas de acordo com o preconizado pela metodologia ASTM D6648 (2008). A preparação do material para a moldagem envolveu diversas etapas prévias:

- a) Extração do ligante envelhecido do RAP;
- b) Envelhecimento a curto prazo do HiMA no RTFOT;
- c) Combinação dos diversos cenários de HiMA RTFOT+RAP+AR. Observa-se que as amostras que continham agente rejuvenescedor, misturadas no Thermosel, foram combinadas em três etapas, uma vez que foram necessários 50 g para os pratos do PAV e cada etapa produzia no máximo 18 g.
- d) Envelhecimento a longo prazo no PAV das diversas amostras.

Como o objetivo do presente estudo é a comparação do desempenho das diferentes combinações de ligantes em baixas temperaturas, optou-se por realizar os ensaios em apenas uma temperatura. Como as amostras possuem comportamentos bastante diferentes, as temperaturas críticas baixas do PG de cada cenário tendem a ser diferentes. Por outro lado, realizando o ensaio em diferentes temperaturas para cada amostra a base de referência para comparação fica comprometida. Por este motivo, selecionou-se apenas uma temperatura para realização dos ensaios de todas as amostras. Como o ligante altamente modificado de referência para o presente estudo (HiMA) possui um PG 76-22E (Reis et al, 2016), foi selecionada a temperatura de ensaio de -12 °C de acordo com a AASHTO M332 (2014).

Por fim, foram determinadas as curvas de *Stiffness* (S) e *m-value* (m) em função do tempo para todas as amostras analisadas. Foram analisados ainda os valores de S(60) e m(60) em função dos teores de agente rejuvenescedor aplicados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e discussões no desenvolvimento do presente estudo, sendo analisados os principais efeitos caracterizados pelas combinações propostas. Em uma primeira etapa, analisou-se o efeito da adição do ligante envelhecido, proveniente do RAP, no comportamento do ligante altamente modificado (HiMA) quando às características viscoelásticas lineares, deformação permanente, fadiga e comportamento em baixas temperaturas.

Na sequência, em uma segunda etapa, analisou-se o efeito que a adição de um agente rejuvenescedor teria nesta combinação e a influência deste nas propriedades analisadas anteriormente. Foi proposto ainda um método para dosagem deste agente rejuvenescedor. Considerou-se como cenário de referência a amostra de HiMA RTFOT puro, uma vez que este seria o desempenho, após aplicação em campo, que a mistura teria caso não tivesse sido aplicada nenhuma porcentagem de RAP.

4.1. Efeito da adição de ligante envelhecido (RAP) no HiMA

4.1.1. Caracterização viscoelástica linear

As curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) do HiMA, antes e após o envelhecimento no RTFOT, e as curvas mestras dos outros seis cenários – sem o agente rejuvenescedor – analisados para uso em camadas de SRAM são apresentadas na Figura 17 e na Figura 18, respectivamente, para temperatura de referência de 52°C.

Figura 17 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na curva mestra do $|G^*|$

Fonte: Autor.

Figura 18 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na curva mestra do ângulo de fase

Fonte: Autor.

É possível verificar na Figura 17 o efeito do envelhecimento do RTFOT no ligante altamente modificado (HiMA). Conforme esperado, a amostra envelhecida se apresentou mais rígida que a original. O aumento da rigidez do ligante, e consequentemente da mistura asfáltica, tende a aumentar a resistência à formação de trilhas de roda, entretanto pode resultar no desenvolvimento e/ou aceleração de outros defeitos tais como trincamento por fadiga, trincamento térmico e deterioração devido ao desgaste e à umidade (CHEN e HUANG, 2000; BELL, WIEDER e FELLIN, 1994). Observa-se que o ligante do RAP, o qual foi envelhecido ao longo do tempo por meio de diversos outros mecanismos (umidade, envelhecimento fotoquímico, etc.), apresenta valores mais elevados que todos os demais ligantes analisados.

Analisando as curvas mestras do $|G^*|$ dos demais ligantes, na Figura 17, verificou-se com o aumento do teor de RAP na mistura, maior tendência da curva descolar da referência do ligante modificado e ir em direção à curva do ligante extraído do RAP, isto é, conforme se aumentou a porcentagem de RAP na mistura, maior foi o valor do seu módulo de cisalhamento dinâmico medido ($|G^*|$), para uma mesma frequência. Em frequências baixas, ou temperaturas altas, esta tendência não se torna um problema quando analisado do ponto de vista de deformação permanente. Todavia, quando em frequências intermediárias e altas, ou temperaturas intermediárias e baixas, o aumento da rigidez pode causar problemas de fadiga e trincamento térmico prematuro (MORILHA, 2004; CHEN e HUANG, 2000; BELL, WIEDER e FELLIN, 1994). Nota-se ainda que o ligante HiMA, seja envelhecido ou não, apresenta um leve incremento do $|G^*|$ em frequências mais baixas (temperaturas mais altas), o que é um fator benéfico quando considerado o afundamento de trilha de rodas. Este efeito é perdido quando adicionado o ligante proveniente do RAP, devido a redução da quantidade de polímero dentro da mistura de ligante analisada.

Tipicamente, um comportamento viscoelástico de ligantes asfálticos termoreologicamente simples demonstra um aumento no módulo de cisalhamento dinâmico e uma redução no ângulo de fase à medida que a frequência aumenta (temperatura diminui). Na Figura 18 é possível verificar que o ligante altamente modificado apresenta um comportamento diferente do mencionado. À medida que a frequência aumenta, o ângulo de fase também aumenta, levando, por exemplo, a comportamentos menos viscosos em baixas frequências (temperaturas mais altas), o que pode ser um fator benéfico à mistura. Este aumento da parcela elástica em

temperaturas mais altas pode ser atribuído à baixa viscosidade do ligante asfáltico base da modificação, quando comparado com a do polímero, de forma que a elasticidade do polímero em si foi capaz de influenciar as propriedades mecânicas do ligante modificado (AIREY, 2003). Em frequências mais altas, a maior rigidez do ligante atenua este efeito, que demonstra a habilidade do polímero em se dispersar/dissolver no ligante asfáltico e criar uma rede elástica contínua. A presença e natureza deste efeito é função das propriedades químicas e físicas do polímero SBS, do ligante asfáltico base para modificação e da compatibilidade entre estes dois componentes (AIREY, 2003). À medida que o teor de ligante proveniente do RAP aumenta na mistura, a curva se aproxima da do RAP puro, semelhando seu comportamento de um material viscoelástico considerado termoreologicamente simples.

Na Figura 19 é apresentado o diagrama *black space* para os cenários analisados. Devido ao comportamento do ângulo de fase verificado na Figura 18, o diagrama *black space*, na Figura 19, também apresenta um comportamento diferenciado do convencional para o ligante altamente modificado. À medida que o ligante envelhece, tipicamente a curva no diagrama *black space* tem a tendência de se mover para baixo, indicando uma redução no ângulo de fase para um mesmo valor de módulo. Na Figura 19 é possível verificar que à medida que o módulo de cisalhamento dinâmico aumenta, o ângulo de fase também aumenta, levando, por exemplo, a comportamentos menos viscosos em baixos módulos (tipicamente temperaturas mais altas). Novamente é possível verificar o comportamento elástico do polímero influenciando na resposta mecânica do ligante modificado.

O aumento da porcentagem de RAP nas combinações gradualmente altera a inclinação da curva, aproximando-a do RAP puro, que por sua vez apresentou um comportamento típico. Por fim, analisando a curva do HiMA RTFOT e a do HiMA original, sem envelhecimento, é possível verificar a diminuição do ângulo de fase para um mesmo valor de módulo (devido ao envelhecimento do ligante).

Figura 19 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido no diagrama *black space*

Fonte: Autor.

4.1.2. Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Os valores de J_{nr} (*non-recoverable creep compliance*) e R (*percent recovery*) para as tensões de 100 Pa e 3.200 Pa são apresentados para todos os ligantes - sem agente rejuvenescedor – na Figura 20 e Figura 21, respectivamente, para as temperaturas de 64°C, 70°C e 76°C.

Figura 20 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido no J_{nr}

Fonte: Autor.

Figura 21 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido no R

Fonte: Autor.

Analisando os valores de J_{nr} na Figura 20, é possível notar uma tendência de aumento com o aumento da porcentagem de RAP na composição da mistura. Reis et al. (2016) justificaram o bom desempenho do HiMA na deformação permanente de misturas asfálticas através do alto ponto de amolecimento e elevada recuperação elástica. A

formação de uma rede contínua de polímero presente no ligante asfáltico, devido ao seu alto teor, proporciona um maior comportamento elástico da mistura (KRÓL, RADZIEWSKI e KOWALSKI, 2015).

Outro ponto verificado é o menor valor de J_{nr} do ligante proveniente do RAP quando comparado com cenários de maiores teores de RAP nas misturas de ligantes. O J_{nr} cresce gradualmente à medida que o ligante de RAP é adicionado e sofre uma queda quando finalmente é analisado o cenário com 100% de RAP. Isto ocorre, pois, a mistura do ligante base para modificação, proveniente do HiMA, e o ligante envelhecido do RAP resultam em uma diminuição da rigidez do RAP puro, reduzindo a sua resistência à deformação permanente, a qual não é completamente compensada pela presença do polímero devido ao baixo teor resultante da combinação. Nos cenários com menores teores de RAP o efeito do polímero volta a compensar a baixa resistência à deformação permanente dos ligantes. Isto fica mais evidente nas temperaturas mais altas, onde a viscosidade do ligante é menor e o efeito da rede contínua do polímero é maior.

Um maior aumento do J_{nr} também pode ser observado com o aumento da temperatura e do carregamento para as amostras contendo ligante proveniente do RAP, sugerindo que além de ser mais sensível à temperatura, o ligante envelhecido é mais sensível às mudanças de carregamento. Também é possível se verificar que o HiMA sofreu uma variação menor com a mudança de temperatura do que os ligantes contendo ligante do RAP.

Por outro lado, o aumento do teor de ligante proveniente do RAP resultou na redução do percentual de recuperação (R) das misturas. Na Figura 21 é possível notar que à medida que o teor de ligante envelhecido aumenta, o valor de R diminui, isto é, a recuperação elástica que o ligante é capaz de oferecer diminui. A diminuição da recuperação elástica está diretamente relacionada à diminuição da quantidade de polímero presente na mistura. Este parâmetro teve uma sensibilidade menor às mudanças de temperatura e de carregamento, quando comparado com o J_{nr} . Similarmente ao comportamento do J_{nr} , o ligante HiMA sofreu uma variação menor com a variação de temperatura do que as misturas contendo ligante envelhecido.

4.1.3. Linear Amplitude Sweep (LAS)

Os resultados analisados no presente estudo foram baseados no modelo S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*), considerando a tensão de pico como critério de ruptura. Nesta consideração o pico da tensão é considerado o ponto em que o ligante asfáltico é mais propenso a romper (AASHTO TP 101, 2014). A Figura 22 ilustra a variação da tensão de cisalhamento em função da varredura de amplitude de uma das amostras para cada combinação de ligantes analisada.

Figura 22 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido no ensaio de varredura de deformação

Fonte: Autor.

A Figura 22 demonstra que o ligante puro proveniente do RAP alcançou um valor de pico de tensão de 1,82 MPa, a uma deformação de 5,1%, e a amostra do HiMA RTFOT alcançou um valor pico de 0,61 MPa, a uma deformação de 11,6%. As amostras combinadas de 15%, 30%, 60% e 75%, por sua vez, alcançaram valores pico de 0,67 MPa, 0,74 MPa, 1,0 MPa e 1,1 MPa em deformações de 9,3%, 8,1%, 6,7% e 6,5%, respectivamente. É possível notar a tendência de quanto maior o teor de RAP na mistura mais rápido a tensão aumenta.

Outro fator interessante é o comportamento das curvas após o ponto de ruptura dos ligantes. As misturas que contêm os menores percentuais de RAP apresentam uma queda da tensão mais “suave”, enquanto as amostras que possuem maiores porcentagens de RAP apresentam um colapso mais brusco. Este comportamento poderia ser explicado pela habilidade do polímero de criar uma rede elástica contínua, já discutida anteriormente, que é rompida aos poucos, retardando a taxa de queda da tensão.

O ensaio de LAS também fornece informações sobre as curvas de dano dos ligantes. Estas curvas são capazes de representar a queda na integridade inicial do material ao passo que o dano aumenta. As curvas integridade (C) versus intensidade do dano (D) do HiMA, do RAP e dos outros cinco cenários – sem o agente rejuvenescedor – analisados para uso em camadas de SRAM são apresentadas até o ponto de ruptura (pico tensão) na Figura 23 para temperatura de 20°C.

Figura 23 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na evolução do dano

Fonte: Autor.

Conforme esperado, a Figura 23 demonstra que a integridade de todos os ligantes decresce com o aumento da intensidade do dano. É possível notar uma redução mais crítica para o ligante extraído do RAP puro, quando comparado com os demais

cenários, ao passo que o ligante do HiMA possui a redução mais suave, evidenciando o benefício da modificação. As demais porcentagens apresentaram curvas intermediárias entre o ligante extraído do RAP e do ligante HiMA, aproximando-se da curva do RAP à medida que o seu teor é aumentado na composição. Conforme discutido anteriormente, a rede elástica formada pela presença do polímero influencia o comportamento dos ligantes, reduzindo sua taxa de queda da integridade.

Na Figura 24 são apresentadas as curvas de vida de fadiga (N_f) em função da deformação aplicada (%) do HiMA, do RAP e dos outros cinco cenários sem o agente rejuvenescedor.

Figura 24 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na vida de fadiga (N_f)

Fonte: Autor.

É possível notar que o N_f calculado para o ligante altamente modificado (HiMA) é significativamente maior para uma mesma deformação quando comparado com o ligante extraído do RAP (Figura 24). O aumento da porcentagem de RAP nas misturas provocou o decréscimo gradual do N_f .

Outra questão interessante de se observar é que, devido à maior inclinação da curva do ligante extraído do RAP, os N_f de todas as misturas ficam mais próximos em deformações muito baixas, podendo levar a conclusões que o comportamento das

misturas é semelhante. Neste ponto é necessário se tomar cuidado pois em níveis muito baixos de deformação a tendência das misturas é não atingir a fadiga, uma vez que não haverá dano a ser acumulado, perdendo o sentido da comparação. Por outro lado, quando analisadas as curvas em deformações mais elevadas podemos verificar claramente o benefício da modificação do ligante.

Por fim, da mesma forma que os demais parâmetros, determinou-se ainda o fator de fadiga de ligantes (FFL) para as amostras analisadas, visto que leva em consideração a inclinação da curva de fadiga e, conseqüentemente, a variação da vida de fadiga (N_f) com o nível de deformação imposto. A Tabela 3 apresenta um resumo dos valores de $N_{f1,25\%}$, $N_{f2,5\%}$ e FFL determinados para cada amostra considerada.

Tabela 3 – Influência da adição de RAP nos fatores de fadiga dos ligantes (FFL)

Amostra	$N_{f1,25\%}$	$N_{f2,5\%}$	FFL
RAP	3,3E+05	1,0E+04	1,43
HiMA+75% RAP	5,1E+05	2,7E+04	1,53
HiMA+60% RAP	5,7E+05	3,0E+04	1,54
HiMA+30% RAP	4,7E+05	4,0E+04	1,55
HiMA+15% RAP	5,7E+05	5,8E+04	1,58
HiMA	6,3E+05	7,7E+04	1,61

Fonte: Autor.

Conforme esperado, é possível notar uma diminuição do FFL à medida que o teor de RAP na mistura aumenta, apesar do pequeno range de valores encontrado, variando-se apenas de 1,43 a 1,61. Martins (2014) ensaiou 9 tipos de ligantes asfálticos e encontrou valores de FFL variando de 1,13 a 1,91, a 19°C, progressivamente para os ligantes com menor resistência ao trincamento por fadiga até o com maior resistência, respectivamente. Uma das amostras ensaiadas por Martins (2014) foi um ligante altamente modificado (HiMA), que resultou em um valor de FFL de 1,91, valor cerca de 20% superior ao do presente estudo. Esta diferença possivelmente pode ser explicada devido às diferentes temperaturas de ensaio e/ou diferentes composições dos materiais.

4.1.4. *Bending Beam Rheometer (BBR)*

Os valores de S (*Stiffness*) e m -value (m) ao longo do tempo para a temperatura de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ são apresentados para todos os ligantes, sem agente rejuvenescedor, na Figura 25 e na Figura 26, respectivamente.

A partir da Figura 25 é possível verificar, conforme esperado, uma queda da rigidez ao longo do tempo para todas as amostras. É possível notar que à medida que o teor de ligante envelhecido na amostra aumenta, aumenta a sua rigidez, o que, consequentemente torna a amostra mais suscetível a trincamento a baixas temperaturas. Por outro lado, a partir da Figura 26, conforme esperado, é possível notar uma queda no valor de m à medida que o teor de RAP aumenta na mistura, ou seja, a combinação com 60% de RAP possui um valor de m ao longo do tempo superior à de 30% de RAP e a do HiMA. Este menor valor de m reflete uma menor taxa de decréscimo da rigidez em baixas temperaturas, favorecendo novamente o trincamento a baixas temperaturas.

Figura 25 - Influência da adição de diferentes teores de ligante envelhecido na evolução do Creep Stiffness (S) em função do tempo

Fonte: Autor.

Figura 26 - Influência da adição de variados teores de ligante envelhecido na evolução do m-value em função do tempo

Fonte: Autor.

Observando os limites previstos na classificação *Performance Grade* (PG) da AASHTO (M-320, 2015), a temperatura baixa do PG pode ser determinada quando o $S(60)$ for ≤ 300 MPa e o $m(60)$ for $\geq 0,3$. A Tabela 4 apresenta dos valores de $S(60)$ e $m(60)$ médio das amostras ensaiadas para as combinações de ligantes analisadas.

Tabela 4 - Influência da adição de variados teores de ligante envelhecido nos valores de $S(60)$ e $m(60)$

Amostra	$S(60)$ [MPa]	$m(60)$
HiMA+60% RAP	311,04	0,2801
HiMA+30% RAP	267,57	0,3019
HiMA	244,42	0,3285

Fonte: Autor.

A partir da Tabela 4 verifica-se que, considerando os limites previstos na classificação Superpave, as amostras de HiMA e HiMA+30% RAP apresentaram os seus valores satisfatórios. Observa-se que a amostra HiMA+30% RAP apresentou o valor médio de $m(60)$ muito próximo do limite de 0,3, tendo uma das duas amostras ensaiadas apresentado valor inferior a 0,3 e outra ligeiramente superior, elevando a média das

duas para pouco mais de 0,3. As amostras de HiMA+60% RAP, por sua vez, apresentaram valores tanto de S(60) como de m(60) fora dos limites estabelecidos pela metodologia Superpave, ou seja, a temperatura baixa do PG para esta combinação é superior a -22 °C.

4.2. Efeito da adição de AR na combinação de HiMA e RAP

4.2.1. Caracterização viscoelástica linear dos ligantes

As curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) do HiMA RTFOT, do RAP, da combinação HiMA+60% RAP, além das curvas dos outros três cenários – com o agente rejuvenescedor – analisados para uso em camadas de SRAM são apresentadas na Figura 27 e na Figura 28, respectivamente, para temperatura de referência de 52°C.

Figura 27 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor na curva mestra do $|G^*|$ do HiMA+60% RAP

Fonte: Autor.

É possível notar que o efeito do agente rejuvenescedor foi benéfico na diminuição do $|G^*|$ dos ligantes (Figura 27), trazendo o seu comportamento para mais próximo do ligante altamente modificado. As curvas dos teores de 5% e 7,5% de agente rejuvenescedor ficaram muito próximas entre si e a curva com 10% do agente se

apresentou menos rígida que a do HiMA RTFOT. Considerando-se que o objetivo da adição do AR é trazer a mistura mais próxima do HiMA RTFOT, quando analisada a rigidez do ligante, então o teor a ser considerado deve ser entre 5% e 7,5%, resultado compatível com o encontrado por Porot (2016) e Turner, Taylor e Tran (2015) para uso do mesmo AR.

Ressalta-se ainda que, mesmo com a adição o AR, nenhuma das curvas conseguiu reestabelecer o incremento em frequências mais baixas que ocorre no HiMA RTFOT (mudança de inclinação da curva). Outro ponto importante é o fato que, mesmo que o agente rejuvenescedor recupere todo o ligante proveniente do RAP, a mistura final ainda seria a combinação e um ligante altamente modificado com um ligante convencional, o que por si só já pode comprometer o desempenho da combinação de ligantes comparativamente ao HiMA.

Figura 28 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor na curva mestra do ângulo de fase do HiMA+60% RAP

Fonte: Autor.

Da Figura 28 é possível verificar que, apesar de reduzir a rigidez das misturas de ligante, o efeito do AR no ângulo de fase é praticamente nulo, uma vez que as curvas de todos os teores se sobrepuseram sobre a curva do HiMA+60% RAP. Como já verificado anteriormente, o comportamento do ângulo de fase está sendo regido e

influenciado diretamente pelo comportamento do polímero presente no ligante altamente modificado, o qual forma uma rede contínua elástica dissolvida na mistura. Portanto, o efeito praticamente nulo do agente rejuvenescedor no ângulo de fase pode ser justificado pela não alteração na quantidade de polímero entre os cenários com 5%, 7,5% e 10% de AR. Esta condição pode ser verificada novamente no diagrama *black space*, apresentado na Figura 29, visto que as curvas de todos os teores de AR praticamente se sobrepuseram sobre a curva do HiMA+60% RAP.

Figura 29 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor no diagrama *black space* do HiMA+60% RAP

Fonte: Autor.

Portanto, analisando-se a curva mestra do ângulo de fase, Figura 28, o diagrama *black space*, Figura 29, pode-se concluir que, apesar de ter diminuído a rigidez dos ligantes asfálticos, quando comparado com o ligante envelhecido sem o tratamento, a adição do AR não trouxe mudança na relação elástica/viscosa da combinação de ligantes a qual é regida predominantemente pela quantidade de polímero presente na mistura proveniente do ligante altamente modificado (HiMA).

Analisando-se os parâmetros originais do *Performance Grade* (PG) de fadiga e deformação permanente, $|G^*|\sin\delta$ e $|G^*|/\sin\delta$, respectivamente, a 10 rad/s e 52°C,

após RTOT, apresentados na Tabela 5 e na Figura 30, é possível notar a influência do agente rejuvenecedor sobre a mistura de 60% de RAP.

Tabela 5 - Valores de $|G^*|_{\text{sen}\delta}$ e $|G^*|/\text{sen}\delta$ após RTOT

Amostra	$ G^* _{\text{sen}\delta}$ [kPa]	$ G^* /\text{sen}\delta$ [kPa]
RAP	394,5	479,1
HiMA RTOT+60% RAP	112,3	135,5
HiMA RTOT+60% RAP+5,0% AR	32,2	37,8
HiMA RTOT+60% RAP+7,5% AR	32,3	37,4
HiMA RTOT+60% RAP+10% AR	11,7	13,5
HiMA RTOT	22,1	28,4

Fonte: Autor.

Figura 30 - Valores de $|G^*|_{\text{sen}\delta}$ e $|G^*|/\text{sen}\delta$, após RTOT, em função do teor de AR

Fonte: Autor.

Verifica-se da Figura 30 que, conforme esperado, o valor de $|G^*| \sin \delta$, diminui com o aumento do teor do agente rejuvenescedor. Por outro lado, é possível verificar que semelhantemente ao indicador do desempenho à fadiga, o valor de $|G^*|/\sin \delta$, indicador do desempenho à deformação permanente também diminuiu. Isto demonstra a importância de se determinar um teor de agente rejuvenescedor balanceado de forma a diminuir a rigidez e aumentar a vida de fadiga da mistura, sem causar um aumento na deformação permanente.

Considerando-se os valores de $|G^*| \sin \delta$ e $|G^*|/\sin \delta$ para a amostra de HiMA puro, apresentados na Tabela 5, nas regressões obtidas na Figura 30 foram determinados os teores de AR de 8,2% e 7,9%.

4.2.2. Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Os valores de J_{nr} e R para as tensões de 100 Pa e 3.200 Pa são apresentados para os ligantes - com agente rejuvenescedor - na Figura 31 e Figura 32, respectivamente, para a temperatura de 76°C. Observa-se que devido a um problema ocorrido na obtenção dos dados do teor de 10% de AR, os resultados não foram apresentados, porém com os demais ensaios já é possível notar a tendência de comportamento das misturas.

A Figura 31 demonstra que o agente rejuvenescedor tem uma influência importante no J_{nr} da combinação de ligantes, uma vez que este aumentou cerca de 3,5 a 4 vezes em relação ao valor do HiMA+60% RAP, tanto no carregamento de 0,1 kPa como no de 3,2 kPa. Similarmente, a Figura 32 demonstra que o AR reduz o percentual de recuperação do ligante, mais evidentemente no maior carregamento.

A adição do agente rejuvenescedor na combinação dos ligantes asfálticos - provavelmente por diminuir a sua rigidez, sem provocar alterações na relação elástica/viscosa do material, conforme verificado anteriormente - prejudicou o seu desempenho em relação a deformação permanente para os materiais analisados. Este comportamento já tinha sido verificado através da análise do $|G^*|/\sin \delta$, apresentados na Tabela 5. Outros estudos também verificaram uma diminuição da rigidez dos ligantes e aumento da deformação permanente determinada por meio do MSCR (MOGAWER et al., 2013; LIN et al., 2013).

Figura 31 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenecedor no J_{nr} do HiMA+60% RAP

Fonte: Autor.

Figura 32 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenecedor no R do HiMA+60% RAP

Fonte: Autor.

A Figura 33 demonstra o comportamento dos valores de J_{nr} e R para a tensão de 3.200 Pa em função da variação do teor de agente rejuvenecedor.

Figura 33 - Valores de Jnr 3.200 e R 3.200 em função do teor de AR

Fonte: Autor.

A partir da Figura 33, verifica-se que o aumento do teor de AR aumenta o valor do Jnr e diminuir o valor do R, prejudicando o desempenho do ligante. A análise desta relação é muito importante, uma vez que é possível prever qual será o comportamento a deformação permanente do ligante uma vez selecionado o teor de agente rejuvenescedor através dos demais parâmetros.

4.2.3. Linear Amplitude Sweep (LAS)

As curvas de tensão de cisalhamento em função da varredura de amplitude para uma das amostras de cada combinação de ligantes com agente rejuvenescedor analisada são apresentadas na Figura 34, juntamente com as curvas de referência do HiMA RTFOT, RAP e HiMA+60% RAP.

A partir da Figura 34 verifica-se que a adição de agente rejuvenescedor na combinação de RAP e HiMA diminuiu as tensões pico alcançadas. A composição com 5%, 7,5% e 10% atingiram tensões máximas de 0,77 MPa, 0,54 MPa e 0,57 MPa, em deformações de 8,7%, 11,6% e 10,3%, respectivamente. É possível notar ainda que a amostra com 7,5% de agente rejuvenescedor apresentou o comportamento mais semelhante à amostra de HiMA RTFOT.

Figura 34 - Influência de variados teores de agente rejuvenecedor na evolução tensão do HiMA+60% RAP

Fonte: Autor.

Outro ponto interessante que o comportamento após a ruptura de todas as amostras com agente rejuvenecedor foi muito parecido e semelhante à amostra de HiMA+60%RAP. Este fenômeno possivelmente pode ser justificado pela quantidade de polímero presente nas amostras. Apesar de ser capaz de diminuir a tensão de pico dos ligantes, o agente rejuvenecedor não adiciona mais polímero às amostras, que por sua vez é o componente responsável pela suavização da queda da tensão após a ruptura.

As curvas de integridade (C) versus intensidade do dano (D), até o ponto de ruptura, e as curvas de N de fadiga versus deformação aplicada para os ligantes – com agente rejuvenecedor – são apresentadas na Figura 35 e na Figura 36, respectivamente, para temperatura de 20°C.

Figura 35 - Influência de variados teores de agente rejuvenecedor na evolução do dano do HiMA+60% RAP

Fonte: Autor.

Figura 36 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenecedor na vida de fadiga (Nf) do HiMA+60% RAP

Fonte: Autor.

A partir da Figura 35 é possível verificar que a integridade de todos os ligantes decresce com o aumento da intensidade do dano. O decréscimo da integridade é mais acentuado no ligante extraído do RAP quando comparado com os demais ligantes. A adição de uma parte do ligante modificado no RAP, mesmo sem o AR, já resultou em uma diminuição de integridade menos acentuada. A adição de teores de AR na combinação de ligantes resultou na aproximação gradual da curva do ligante modificado puro. Os teores de 7,5% e 10% apresentaram curvas parecidas e muito próximas da curva do HiMA RTFOT, evidenciando o efeito benéfico do agente rejuvenescedor com relação a fadiga.

Conforme já verificado na Figura 24, a partir da Figura 36, quando analisada a mistura de HiMA com 60% de RAP, é possível verificar que a inclusão do ligante proveniente do RAP provocou o decréscimo do Nf do HiMA, deslocando a curva em direção à do RAP puro. A mistura com 5% de AR resultou em valores intermediários à curva de HiMA e HiMA+60% RAP, já demonstrando um benefício no desempenho. As misturas com 7,5% e 10% de AR, por sua vez, além de resultarem em um Nf superior à de 5% de AR, apresentaram Nf próximos entre si e próximos da curva de HiMA RTFOT.

Observa-se ainda que as inclinações das curvas vão diminuindo gradualmente conforme aumenta-se a quantidade de AR na mistura. Em níveis muito baixos de deformação, as características apresentadas pelo ligante tendem a um comportamento mais próximo entre os cenários analisados. Por outro lado, quando analisadas as curvas em deformações mais elevadas, é possível verificar mais claramente o benefício da modificação do ligante e do tratamento com o agente rejuvenescedor.

Por fim, da mesma forma que os demais parâmetros, determinou-se ainda o fator de fadiga de ligantes (FFL) para as amostras analisadas. A Tabela 6 apresenta um resumo dos valores de $N_{f1,25\%}$, $N_{f2,5\%}$ e FFL determinados para cada amostra considerada.

A partir da Tabela 6 é possível notar um aumento do FFL à medida que o teor de AR na mistura aumenta, aproximando-se gradualmente do HiMA. Observa-se que os teores de 7,5% e 10% resultaram em valores de FFL praticamente iguais entre si e à amostra de HiMA.

Tabela 6 - Influência da adição de AR nos fatores de fadiga dos ligantes (FFL)

Amostra	$N_{f1,25\%}$	$N_{f2,5\%}$	FFL
RAP	3,3E+05	1,0E+04	1,433
HiMA RTFOT+60% RAP	5,7E+05	3,0E+04	1,538
HiMA RTFOT+60% RAP+5,0% AR	3,2E+05	2,6E+04	1,585
HiMA RTFOT+60% RAP+7,5% AR	7,2E+05	7,5E+04	1,612
HiMA RTFOT+60% RAP+10% AR	7,2E+05	7,3E+04	1,611
HiMA	6,3E+05	7,7E+04	1,608

Fonte: Autor.

Na Figura 37 é possível verificar o comportamento da tensão máxima e do FFL com a variação do teor de agente rejuvenescedor sobre a mistura de 60% de RAP. Foram selecionados estes dois parâmetros pois a tensão máxima foi o critério de ruptura considerado no presente estudo e o FFL é considerado um parâmetro de caracterização da fadiga interessante pois leva em consideração não só o N_f mas também a inclinação da curva de fadiga

Figura 37 - Valores de FFL e pico da tensão em função do teor de AR

Fonte: Autor.

Considerando-se que os valores para a tensão de pico e o fator de fadiga do ligante (FFL) para a amostra de HiMA puro, apresentados na Figura 34 e na Tabela 6, são

de 0,61 MPa e 1,6, respectivamente, a partir das regressões obtidas na Figura 37 podem ser determinados os teores ótimos de 8,0% e 8,4%, respectivamente.

4.2.4. Bending Beam Rheometer (BBR)

Os valores de S (*Stiffness*) e m -value (m) médio para as duas amostras ao longo do tempo para a temperatura de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ são apresentados para cada combinação de ligantes com agente rejuvenescedor analisada na Figura 38 e Figura 39, respectivamente, juntamente com as curvas de referência do HiMA e HiMA+60% RAP.

Figura 38 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenescedor na evolução do Creep Stiffness (S) em função do tempo

Fonte: Autor.

A partir da Figura 38 é possível verificar, conforme esperado, uma queda da rigidez ao longo do tempo para todas as amostras. É possível notar também que a adição do agente rejuvenescedor diminuiu a rigidez da mistura, tornando o seu comportamento menos suscetível aos trincamentos em baixas temperaturas. Para o primeiro teor de AR testado (5%), os valores de rigidez já se apresentaram inferiores à curva de referência do ligante altamente modificado, levando a concluir que o teor ótimo para reproduzir a mesma rigidez do HiMA deve ser inferior a 5%.

Figura 39 - Influência de diferentes teores de agente rejuvenecedor na evolução do m-value em função do tempo

Fonte: Autor.

A partir da Figura 39, nota-se um aumento no valor de m a medida que o teor de AR aumenta na mistura, ou seja, a combinação com 5% de AR possui um valor de m ao longo do tempo inferior à de 10% de AR. Quanto menor o valor de m , menor a taxa de decréscimo da rigidez em baixas temperaturas, favorecendo o trincamento. A curva de referência do ligante altamente modificado ficou entre as curvas do cenário com 5% de AR e a com 7,5% de AR.

Observando os limites previstos na classificação Superpave (AASHTO M-320, 2015) a temperatura baixa do PG pode ser determinada quando o $S(60)$ for ≤ 300 MPa e o $m(60)$ for $\geq 0,3$. A Tabela 7 apresenta dos valores de $S(60)$ e $m(60)$ médio das amostras ensaiadas para as combinações de ligantes analisadas.

Tabela 7 - Influência de variados teores de agente rejuvenescedor nos valores de S(60) e m(60)

Amostra	S(60) [MPa]	m(60)
(HiMA RTFOT+60% RAP) PAV	311,04	0,2801
(HiMA RTFOT+60% RAP+5% AR) PAV	189,57	0,3181
(HiMA RTFOT +60% RAP+7,5% AR) PAV	159,51	0,3414
(HiMA RTFOT +60% RAP+10% AR) PAV	123,32	0,3584
(HiMA RTFOT) PAV	244,42	0,3285

Fonte: Autor.

A partir da Tabela 7 verifica-se que, considerando os limites previstos na classificação Superpave, todas as amostras com agente rejuvenescedor foram capazes de trazer os valores da combinação de HiMA+60% RAP para valores satisfatórios, bem abaixo dos limites de $S(60) \leq 300$ MPa e $m(60) \geq 0,3$.

Na Figura 40 é possível verificar graficamente o comportamento do valor de S(60) e m(60) com a variação do teor de agente rejuvenescedor sobre a mistura de 60% de RAP. Considerando-se os valores de 244,42 MPa e 0,3285 para o S(60) e m(60) da amostra de HiMA puro, respectivamente, apresentados na Tabela 7, é possível determinar os teores de AR para que o comportamento do ligante de referência seja obtido. Considerando as regressões obtidas na Figura 40 foram determinados os teores de 3,0% e 6,1%.

Figura 40 - Valores de S(60) e m(60) em função do teor de AR

Fonte: Autor.

4.2.5. Análise da dosagem do AR

A abordagem do presente estudo consiste na avaliação das propriedades dos ligantes, destinados a misturas asfálticas do tipo SRAM utilizando um ligante asfáltico altamente modificado e um agente rejuvenescedor (AR). Pelo fato de as camadas de SRAM serem aplicadas com pequena espessura, há a necessidade de uma grande capacidade resiliente. Como a camada estará sujeita a importantes variações repetitivas de deformação é necessária uma grande resistência a fadiga.

Conforme mencionado anteriormente, diversas metodologias têm sido propostas para a dosagem do agente rejuvenescedor. As metodologias mais tradicionais se baseiam na determinação dos teores capazes de reproduzir parâmetros empíricos como penetração e ponto de amolecimento. Atualmente metodologias têm sido propostas com parâmetros mais complexos, em grande parte com base nos parâmetros da especificação SUPERPAVE.

Desta forma, autores recentemente vem buscado a determinação do teor ótimo de agente rejuvenescedor com base na recomposição das temperaturas altas, intermediários e baixas do PG, além de parâmetros derivados da metodologia como

G-R e ΔT_c (ZAUMANIS, MALLICK e FRANK, 2014; MERCADO et al., 2018). Mercado et al. (2018) verificou que a dosagem do agente rejuvenescedor pela temperatura baixa do PG resultou em teores mais baixos e a dosagem pela temperatura alta, por sua vez apresentou valores intermediários, além de apresentar melhor restauração das propriedades dos ligantes, mesmo após envelhecimento.

Apesar de propiciarem uma excelente avaliação quanto as propriedades e comportamento dos ligantes com agente rejuvenescedor, a dosagem pelo grau PG não leva em consideração parâmetros provenientes de ensaios de fadiga recentemente desenvolvidos como o LAS. O parâmetro de fadiga considerado na metodologia SUPERPAVE, $|G^*|\sin\delta$, não avalia o desempenho do ligante em deformações elevadas, fora do regime viscoelástico linear.

Desta forma foi proposta uma nova abordagem na metodologia de dosagem, considerando parâmetros provenientes dos ensaios de caracterização viscoelástica linear ($|G^*|\sin\delta$ e $|G^*|/\sin\delta$), fadiga LAS (tensão máxima de cisalhamento e FFL) e trincamento a baixas temperaturas (S(60) e m(60)). Através da elaboração de *bleeding charts* foi possível determinar qual seria o teor ótimo de agente rejuvenescedor utilizado para a recuperação das propriedades do ligante altamente modificado. A Figura 41 resume os resultados encontrados.

A partir da Figura 41 fica claro que um teor próximo de 8,0% atende a maioria dos parâmetros analisados, tanto de rigidez como fadiga. Os teores determinados para o comportamento e temperaturas mais baixas resultaram em valores menores que os demais. De toda forma, um teor de agente rejuvenescedor mais alto que o ótimo para estas propriedades não seria um problema, uma vez que diminuiria o valor da rigidez a baixas temperaturas e aumentaria o valor de m, diminuindo mais ainda a temperatura baixa do PG.

Figura 41 - Variação dos teores de AR encontrados

Fonte: Autor.

Quanto ao comportamento à deformação permanente, vale observar que os materiais avaliados no presente estudo são destinados a camadas de SRAM, tipicamente conhecidas e caracterizadas por possuírem espessuras pequenas e serem aplicadas antes de camadas asfálticas de maiores espessuras. Ou seja, em relação ao pacote de misturas asfálticas a serem executadas, a camada antirreflexão de trincas é a que tem a menor contribuição em relação à deformação permanente. Ainda, a composição e granulometria dos agregados utilizados nas misturas tem grande responsabilidade nesta relação, fatores não considerados no presente estudo. De toda forma, considerando o teor de 8,0%, valor que atende aos demais parâmetros analisados, nas regressões da Figura 33 obtemos valores de $3,7 \text{ kPa}^{-1}$ e 2,2% para o J_{nr} e R, respectivamente. Com estes valores o valor da temperatura alta do PG poderia continuar sendo 76°C , entretanto o nível de tráfego seria alterado de E (*Extremely High Designation*) para S (*Standard Designation*).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme o objetivo proposto para este trabalho, foi feita a análise, a nível de ligantes, da utilização de material fresado (RAP) em misturas asfálticas do tipo SRAM utilizando um ligante asfáltico altamente modificado, HiMA, e um agente rejuvenescedor (AR). O objetivo principal do estudo foi a verificação da viabilidade da aplicação de um agente rejuvenescedor em um asfalto altamente modificado para recuperação das propriedades dos ligantes devido à incorporação da porção fina do RAP, mais rica em ligante asfáltico, gerando assim ganhos em termos de materiais, serviços, além do ganho ambiental.

Dada a escassez de agregados disponíveis para usinagem de amostras foram propostos métodos de combinação dos ligantes asfálticos de forma a compor os cenários desejados. Foram realizados ensaios de caracterização das propriedades viscoelásticas lineares, deformação permanente, fadiga e comportamento a baixas temperaturas para os diversos cenários estudados.

Verificou-se que a adição do ligante envelhecido, proveniente do material fresado (RAP) no ligante altamente modificado provoca um aumento de sua rigidez, aumento de sua compliância não recuperável (J_{nr}), diminuição de sua vida de fadiga e aumento de sua rigidez a baixas temperaturas, aumentando sua susceptibilidade aos trincamentos térmicos. Essencialmente, à medida que o teor de ligante do RAP é adicionado na mistura, mais próxima as suas características ficam do ligante envelhecido puro (a exceção do ensaio de deformação permanente).

A adição do agente rejuvenescedor foi capaz de recuperar em parte as propriedades perdidas pela incorporação do ligante envelhecido. A adição de AR aumentou a vida de fadiga das misturas para um patamar próximo ao ligante altamente modificado, demonstrando o grande benefício da incorporação do mesmo na mistura. Apesar de ter diminuído a rigidez da amostra, verificou-se que o agente rejuvenescedor não teve a habilidade de recuperar as propriedades elásticas/viscosas do ligante altamente modificado, fato que ficou evidente analisando-se a curva mestra do ângulo de fase e o diagrama *black space* das misturas. Observou-se nas análises que esta relação é regida predominantemente pela quantidade de polímero presente na mistura proveniente do ligante altamente modificado (HiMA), que forma uma rede contínua elástica dissolvida na mistura.

Para o caso da deformação permanente, provavelmente devido à diminuição da rigidez verificada nas curvas mestras do $|G^*|$, o agente rejuvenescedor não gerou benefícios, prejudicando o desempenho dos ligantes e aumentando o Jnr e diminuindo o percentual de recuperação dos ligantes, quando comparado com a mistura de referência sem o AR. Isto demonstra a importância de se determinar um teor de agente rejuvenescedor balanceado de forma a diminuir a rigidez e aumentar a vida de fadiga da mistura, sem causar um aumento na deformação permanente. De toda forma, vale enfatizar que os materiais avaliados são destinados a camadas de SRAM que em relação ao total de misturas asfálticas a serem aplicadas (camada intermediária e capa) é a que tem a menor contribuição em relação à deformação permanente. Ainda, a composição e a granulometria dos agregados utilizados nas misturas têm responsabilidade fundamental nesta relação.

É possível concluir que a aplicação de um agente rejuvenescedor em um ligante asfáltico altamente modificado devido à combinação de um ligante envelhecido é uma alternativa promissora, dado que o agente rejuvenescedor avaliado apresentou capacidade de resgatar as características de rigidez, fadiga e trincamento a baixas temperaturas dos ligantes para patamares muito próximos a do ligante modificado original. Entretanto esta aplicação deve ser realizada com cautela, uma vez que, apesar de o ligante da camada de SRAM não ser o principal responsável pelo combate ao afundamento de trilha de roda, a incorporação de RAP e AR em sua composição podem vir a causar prejuízos em seu desempenho à deformação permanente.

Por fim, Investigações adicionais sobre o processo de utilização da porção fina do RAP em misturas do tipo SRAM são ainda necessárias. Algumas sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Avaliação de diferentes agentes rejuvenescedores alternativos para melhor entender a influência deste nas propriedades dos ligantes asfálticos altamente modificados;
- Realização de ensaios em misturas completas, incluindo ensaios mecânicos, para avaliar a influência dos agregados nas relações observadas nesse estudo a nível de ligantes;
- Realização de *Overlay Test* com a camada SRAM modificada entre camada trincada e CBUQ.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO M 320. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2015.

AASHTO M 332. Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2014.

AASHTO R29. Standard Practice for Gradind or Verifying the Performance Grade (PG) of an Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2014.

AASHTO TP 101. Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2014.

ABDO A.M.A. Utilizing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material in New Pavements – A Review. International Journal of Thermal & Environmental Engineering. Vol 12 P 61-66, 2016.

AIREY G.D. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. Fuel. Vol 82 P 1709-1719, 2003.

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

ANTE J.R.O. Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2012.

ASTM D2172. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D2872. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM D6521. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D6648. Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM D7175. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM D7405. Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.

BALBO J. T. Pavimentação Asfáltica - materiais projeto e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BELL C.A., WIEDER A.J., FELLIN M.J. Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures: Field Validation. Strategic Highway Research Program (SHRP). Oregon State University. Corvallis, OR 97331. SHRP-A-390, 1994.

BERNUCCI L. L. B., MOTTA L. M. G, CERATTI J. A. P., SOARES J. B. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. ABEDA, Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

BESSA I. S. Laboratory and field study of fatigue cracking prediction in asphalt pavements. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

BOOSHEHRIAN A., MOGAWER W. S., BONAQUIST R. How to construct an asphalt binder master curve and assess the degree of blending between RAP and virgin binders. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol 25 P 1813–1821, 2013.

BROCK J.D., RICHMOND J.L. Milling and Recycling. Technical Paper T-127, 2007.

CAMARGO F.F. Field and laboratory evaluation of a field-blended rubber asphalt. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

CHEN J.S., HUANG L.S. Developing an aging model to evaluate engineering properties of asphalt paving binders. *Materials and Structures*. Vol 33 P 559-565, 2000.

CHIU C.T., HSU T.H., YANG W.F. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling* 52. P 545 – 556, 2008.

CORREIA N. S. Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão de trincas. *Dissertação de Mestrado*, Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, 2010.

ELSEIFI M. A., MOHAMMAD L. N., YING H., COOPER III S. Modeling and evaluation of the crack resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Materials and Pavement Design*. Vol. 13 P 124-139, 2012.

GASPAR M. S., VASCONCELLOS K. L., SILVA A. H. M., BERNUCCI L. L. B. Highly modified asphalt binder for asphalt crack relief mix. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 2630 P 110-117, 2017a.

GASPAR M.S., VASCONCELLOS K.L., LOPES M.M., PRESTI D.L., BERNUCCI L.L.B., JÚNIOR F.A. Procedimento de extração em etapas para avaliação da interação entre ligantes na reciclagem a quente e morna. *Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*. Colômbia, Medellín, 2017.

GENNESSEAU M. M. L. Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. *Tese de doutorado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

GOMES V., NOLFO M. D., VLACHOS P., BOCCI M. Two case studies with high levels of RA enabled by a rejuvenating agent. *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. República Checa, Praga, 2016.

GRILLI A., GNISCI M.I., BOCCI M. Effect og ageing process on bitumen and rejuvenated bitumen. *Construction and Building Materials* 136. P 474 – 481, 2017.

HINTZ C., BAHIA H. Simplification of linear amplitude sweep test and specification parameter. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 2370 P 10-16, 2013.

HINTZ C., VELASQUEZ R., JOHNSON C., BAHIA H. Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 2207 P 99-106, 2011.

HUANG B., LI G., VUKOSAVLJEVIC D., SHU X., EGAN B.K. Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 1929 P 37-45, 2005.

HUNTER R.N., SELF A., READ J. "The Shell Bitumen Handbook". 6ª Edição, 2015.

KRÓL J., RADZISZEWSKI P., KOWALSKI K.J. Influence of microstructural behavior on multiple stress creep recovery (MSCR) in modified bitumen. *Procedia Engineering*. Vol 111 P 478-484, 2015.

LEANDRO R. P. Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

LEANDRO R.P., VASCONCELOS K.L., BERNUCCI L.L.B. Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials* 156. P 424 – 434, 2017.

LIN J., GUO P., XIE J., WU S., CHEN M. Effect of rejuvenator sealer materials on the properties of aged asphalt binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol 25 P 829-835, 2013.

LO PRESTI D., VASCONCELOS K.L., ORESKIVIC M., PIRES G.M., BRESSI S. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. *Road Materials and Pavement Design*. 2019.

LYTTON R.L. Use of geotextiles for reinforced and strain relief in asphalt concrete. *Geotextiles and Geomembranes* 8. P 217-237, 1989.

MARTINS A. T. Contribuição para validação do ensaio de resistência a fadiga para ligantes asfálticos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MACEDO T.F., OSMARI O.H., LEITE L.F.M., SIMÃO R.A., ARAGÃO F.T.S. Procedimento experimental para obtenção de propriedades viscoelásticas do ligante com o uso do AFM. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado, Rio Grande do Sul, 2018.

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

MOGAWER W.S., BOOSHEHRIAN A., VAHIDI S., AUSTERMAN A.J. Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. Vol 14, No S2, P 193-213, 2013.

MOGHADDAN T.B., BAAJ H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials* 114. P 805 – 816, 2016.

MORILHA A.J. Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MOULLIET V., FARCAS F., SAUGER J., CHAILLEUX E. Study of UV rays effects on the evolution of bituminous mix behaviour. E&E Congress, Prague, Czech Republic, 2016.

MUKHTAR, M. T., DEMPSEY B. J. Interlayer Stress Absorbing Composite (ISAC) for Mitigating Reflection Cracking in Asphalt Concrete Overlays. Final Report. Illinois Cooperative Highway and Transportation Series No. 260. Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana. No UILU-ENG-96-2006, 1996.

NIELSEN O. A., SILVA B. A. Estudo do Impacto da Sobre Carga do Tráfego Rodoviário na Vida Útil do Pavimento. 42ª Reunião Anual de Pavimentação ExpoPavimentação (RAPv) e o 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (Enacor), Gramado, Rio Grande do Sul, 2013.

OGUNDIPE O. M. Mechanical behavior of stress absorbing membrane interlayers. PhD thesis, University of Nottingham, 2012.

OGUNDIPE O.M., THOM N.H., COLLOP A.C. Evaluation of performance of stress-absorbing membrane interlayer (SAMI) using accelerated pavement testing. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol 14, No 6, P 569 – 578, 2013a.

OGUNDIPE O.M., THOM N.H., COLLOP A.C. Investigation of crack resistance potential of stress absorbing membrane interlayers (SAMI) under traffic loading. *Construction and Building Materials* 38. P 658 – 666, 2013b.

OLIVEIRA J.R.M., SILVA H.M.R.D., ABREU L.P.F., PEREIRA P.A.A. Effect of different production conditions on the quality of hot recycled asphalt mixtures. *Social and Behavioral Sciences*. Vol 53 P 266-275, 2012.

ONGEL A., HUGENER M. Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen *Construction and Building Materials* 94. P 467 – 474, 2015.

OSMARI P. H. Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

OSMARI P.H., ARAGÃO F.T.S., LEITE L.F.M., SIMÃO R.A., MOTTA L.M.G., KIM Y. Chemical, microstructural, and rheological characterizations of binders to evaluate aging and rejuvenation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 2632 P 14-24, 2017.

OSMARI P.H., LEITE L.F.M., ARAGÃO F.T.S., CRAVO M.C.C., DANTAS L.N., MACEDO T.F. Cracking resistance evaluation of asphalt binders subjected to different laboratory and field aging conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 2019.

OSMARI P. H., ARAGÃO F. T. S. Avaliação do resíduo de óleo vegetal como agente rejuvenescedor de ligantes a partir de análises reológicas e de morfologia de superfície. *Transportes*. V 24 P 48 - 54, 2016.

OZER H., AL-QADI I. L., SINGHVI P., Khan T., Perez J. R., El-Khatib A. Fracture Characterization of Asphalt Mixtures with High Recycled Content Using Illinois Semicircular Bending Test Method and Flexibility Index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 2575 P 130-137, 2016.

PINTO S., PREUSSLER E. *Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Editora Copiarte, ISBN: 85-902537-1-6. Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

POROT L., GRADY W. Effectiveness of a bio-based additive to restore properties of aged asphalt binder. ISAP Symposium. Jackson Hole, Wyoming US, 2016.

POROT L., BROERE D., WISTUBA M., GRÖNNIGER J. Asphalt and binder evaluation of asphalt mix with 70% reclaimed asphalt. Road Materials and Pavement Design. Vol 18, No S2, P 66-75, 2017.

POROT L. Laboratory evaluation of half-warm recycling with bio-based additive. 6^o Eurasphalt & Eurobitume Congress. Praga, República Checa, 2016.

RAUL C. M., VASCONCELLOS K. L., TAKAHASHI M. M., BERNUCCI L. L. B. Avaliação de um aditivo rejuvenescedor em uma combinação de ligante envelhecido e ligante altamente modificado. Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Medellin, 2017.

REIS R. M., MARTINS R. L., MALTA Y. G. C., RAFFLER A., SENDESKI A., NEGRELLI E. Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. 22^o Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, 2016.

RICCARDI C., CARRIÓN A.J.B., PRESTI D.L., FALCHETTO A.C., LOSA M., WISTUBA M. A new procedure to determine the rheological properties of RAP binder and corresponding bituminous blends. Construction and Building Materials. Vol 154 P 361-371, 2017.

RICCARDI C., FALCHETTO A.C., LOSA M., WISTUBA M.P. Rheological modeling of asphalt binder and asphalt mortar containing recycled asphalt material. Materials and Structures. Vol. 49 P 4167-4183, 2016.

SANT'ANA C. A. Especificação de compostos de enxofre, níquel e vanádio em cimento asfáltico de petróleo (CAP) e sua relação com os processos de envelhecimento. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

SEGUNDO I.G.R., BRANCO V.T.F.C., VASCONCELLOS K.L., HOLANDA A.S. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. Transportes. Vol 24, No 4, P 85-94, 2016.

SHEN J., AMIRKHANIAN S., MILLER J. A. "Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement". Journal of Materials in Civil Engineering. V 19 P 376 - 384, 2008.

SHIRODKAR P., MEHTA Y., NOLAN A., DUBOIS E., REGER D., MCCARTHY L. Development of blending chart for different degrees of blending of RAP binder and virgin binder. *Resources, Conservation and Recycling* 73. P 156 – 161, 2013.

SILVA L.S. Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

SILVA J. P. S. Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, 2011.

SILVA H.M.R.D., OLIVEIRA J.R.M., JESUS C.M.G. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for roadpaving resources, *Conservation and Recycling* 60. P 38 – 48, 2012.

SONDAG M.S., CHADBOURN B.A., DRESCHER A. Investigation of recycled asphalt pavement (RAP) mixtures. Final Report. Minnesota Department of Transportation. Department of Civil Engineering University of Minnesota. No MN/RC-2002-15, 2002.

SYBISKI D., VANELSTRAETE A., PARTL M.N. Recommendation of RILEM TC 182-PEB on bending beam and rheometer measurements of bituminous binders. *Materials and Structures* Vol 37. P 539 – 546, 2004.

TONIAL I.A. Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

TREVINO M., DOSSEY T., MCCULLOUGH B. F., YILDIRIM Y. Applicability of asphalt concrete overlays on continuously reinforced concrete pavements. Report. Center for Transportation Research. The University of Texas at Austin. No FHWA/TX-05/0-4398-1, 2004.

TURNER P., TAYLOR A., TRAN N. Laboratory evaluation of SYLVAROADTM RP 1000 rejuvenator. Final Report. National Center for Asphalt Technology. Auburn University. No NCAT 15-03, 2015.

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

VARGAS G. A. B. Caracterização numérico-experimental de propriedades de fratura de misturas asfálticas de agregados finos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

VASCONCELLOS K.L., BERNUCCI L.L.B., TAKAHASHI M.M., BRANCO V.T.F.C. Rheological characterization of asphalt binders used in strain relief asphalt mixtures (SRAM). DYNA. Vol 84 (200) P 90-96, 2017.

VEERARAGAVAN R.K., MALLICK R.B., TAO M., ZAUMANIS M., FRANK R., BRADBURY R.L. Laboratory comparison of rejuvenated 50% reclaimed asphalt pavement hot-mix asphalt with conventional 20% RAP mix. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Vol. 2633 P 69-79, 2017.

YOUTCHEF J. The universal simple aging test. FHWA Publication No.: FHWA-HRT-15-054, 2016.

ZAUMANIS M., MALLICK R. B., FRANK R. "Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications". Construction and Building Materials. V 69. P 159 - 166, 2014.

ZAUMANIS M., MALLICK R.B., FRANK R. 100% Recycled hot mix asphalt: A review and analysis. Resources, Conservation and Recycling 92. P 230 – 245, 2014.

ZEARLEY L.J. Penetration characteristics of asphalt in a recycled mixture. Report. Iowa Department of Transportation. Highway Division Office of Materials, MLR 79 3, 1979.