MATHEUS DE SOUZA GASPAR

Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna

> São Paulo 2019

### MATHEUS DE SOUZA GASPAR

# Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna

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

São Paulo 2019

### MATHEUS DE SOUZA GASPAR

## Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna

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

Área de Concentração: Engenharia de Transportes

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Kamilla Vasconcelos

Este exemplar foi revisado e corrigio	lo em relação à versão original, sob om a anuência de seu orientador
São Paulo, de	de
Assinatura do autor:	
Assinatura do orientador:	

Catalogação-na-publicação

Gaspar, Matheus de Souza Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna / M. S. Gaspar -- versão corr. -- São Paulo, 2019. 129 p.

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

1.Pavimentação asfáltica (Reciclagem) 2.Sustentabilidade 3.Materiais recicláveis 4.Rodovias I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

#### AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, sou grato a Deus por ter me guiado e me iluminado nessa caminhada, sempre me dando forças para seguir em frente. Obrigado, Senhor, por estar sempre cuidando daqueles que amo e por ter colocado em meu caminho as pessoas tão especiais que fizeram parte importante desse período da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Nelson e Silvia, que por toda minha vida me deram carinho e apoio, nunca mediram esforços para que eu alcançasse meus sonhos e objetivos, e sempre foram exemplos de caráter e bons valores. Ao meu irmão Felipe pela amizade, companheirismo e pela convivência em todos esses anos vivendo em São Paulo. Também ao nosso grande amigo Xandão, que há muito tempo já faz parte da família.

Agradeço enormemente à minha orientadora, Professora Kamilla Vasconcelos, não apenas pela contribuição imprescindível para o andamento deste trabalho, mas por ter me recebido como aluno de iniciação científica 7 anos atrás e, desde então, ter me passado todo tipo de conhecimento tanto para a vida profissional como pessoal. Obrigado por ter me mostrado os caminhos do mundo acadêmico e por ter me ensinado a me virar e tirar o melhor de mim mesmo, sendo sempre uma pessoa muito querida e carinhosa, além de uma profissional admirável.

Sou grato também à Professora Liedi Bernucci, pelos conselhos valiosos, por possibilitar o ambiente de trabalho sem igual que é o LTP-USP, e por sempre fazer de tudo para que os alunos se desenvolvam e sintam seu trabalho valorizado. Agradeço também à Professora Rosângela e a toda a equipe do laboratório, Dio, Edson, Erasmo, Robson, Higor e Vanderlei, por todo o apoio no dia a dia dos alunos e por fazerem do LTP um lugar alegre e bem-humorado.

Meus mais sinceros agradecimentos ao Fernando Augusto Júnior e a toda a equipe da Imperpav, em especial ao Miguel, Marquinho e Camarão, pela execução dos ensaios de extração e recuperação. Também ao Luis Miguel Klinsky e à equipe do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra pelo auxílio na preparação das misturas de laboratório. À Karina Suzuki, pelos materiais coletados nos trechos experimentais da Rod. dos Bandeirantes, ao Guilherme do CDT/Arteris, pelo auxílio na coleta de material na Rod. Fernão Dias, e à Manu e André, por todas as informações e dados referentes às misturas mornas produzidas em usina. Ao Davide, Gustavo e Ana Jiménez da University of Nottingham pela orientação na metodologia de avaliação da ativação do ligante e pelos dados referentes à mistura com 60% RAP. Agradeço também à Professora Sandra Soares da UFC pela execução dos ensaios de FTIR e por nos guiar na interpretação dos resultados com tanta boa vontade, e ao aluno de iniciação Gabriel pela preparação dos materiais e pela ajuda em meio à correria para finalizar o trabalho. Também a Zila e Leidy que me ajudaram nos ensaios de Rice, e ao coordenador luri por todas as dicas, conselhos e discussões na nossa sala. Agradeço ao CNPq pela bolsa, e aos membros da banca Leni e Luciano pelas contribuições e pela disponibilidade para avaliar o trabalho.

Meu muito obrigado a todos os colegas que passaram pelo LTP durante essa jornada, especialmente àqueles cuja amizade espero levar comigo para o resto da vida: Marcinha, Claudio, Kazuo, Iuri, Manu (Eric e Alice), Lucas, Zila, Paulo, Ingrid, Deise, Lúcio, João Paulo, Laura, Fernanda Carvalho, Guilherme, José João, João Paulo Meneses, Fernanda Gadler, Leidy, Marina e Caio, além dos ICs Gabriel, André, Larissa, Camila, Guilherme, Rafa, Domenico e Jennifer. Também aos recémchegados Gustavo, Raíssa e Júlia, a quem desejo muito sucesso.

À Talita, por ter sido muito mais que uma amiga no último ano, por ter sido a melhor companhia possível, por estar do meu lado nas horas que precisei, por dividir tudo comigo sempre, e por quem quero sempre estar lá para poder retribuir. Muito obrigado, chapa.

Sou grato a todos os amigos pelos bons momentos que vivi nessa época e que fazem tudo valer a pena. Ao pessoal do Flat 14, Gui, Pablito, Safadão, Rapha, Mattheus, Ivan e Mary. Aos amigos de Edimburgo, Dedé, Vini, Bruno, Rodrigo (o Gelado) e Fra. Aos amigos de BH, Negão, Amanda, Angel, Mari, Pedro Ivo e Marina, além dos sempre receptivos Marcelo, Fatinha, Ira e Paulo. Aos amigos da Poli, Amauri, Felipe, Tiago, Vinícius, Diego, Jean, Bruno, Vitor, Takeshi, Paula e Amanda, e aos amigos de São João, Nassur, Marcelo, Macaco e Baraúna.

Por fim, um agradecimento em especial ao meu grande amigo Guilherme Ruggeri, um cavalheiro magnânimo e jovial de personalidade resplandecente.

"Se quisermos que tudo continue como está, é preciso que tudo mude."

Giuseppe Tomasi di Lampedusa

#### RESUMO

A utilização de misturas asfálticas recicladas com alto teor de material fresado (RAP) tem se tornado atrativa nos últimos anos por ser uma opção sustentável e que permite reduções de custo nas obras de pavimentação. No entanto, a produção dessas misturas sem prejuízo ao seu desempenho em campo ainda é um desafio. Diferentemente do que ocorre na reciclagem a frio, nas reciclagens a quente e morna o ligante envelhecido presente no RAP é mobilizado, ou ativado, mas é difícil mensurar em que grau isso ocorre. Dessa forma, a dosagem é feita de forma imprecisa, podendo comprometer o desempenho da mistura reciclada final. O presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicabilidade de procedimentos laboratoriais para a avaliação da ativação do ligante presente no material fresado e da interação entre os ligantes (velho do RAP e novo adicionado), em misturas asfálticas recicladas através dos processos a quente e morno. O método de análise da ativação do ligante foi aplicado em diferentes tipos de material fresado, e um procedimento de extração por etapas foi desenvolvido para analisar o grau de interação entre ligantes na reciclagem. Neste processo, a extração do ligante asfáltico presente na mistura é realizada em etapas, de forma a separá-lo em camadas, e os ligantes obtidos em cada etapa são recuperados, sendo avaliada a homogeneidade entre eles por meio de ensaios reológicos. Os resultados mostraram que é possível obter informações relevantes acerca dos mecanismos de ativação e de interação entre ligantes por meio dos métodos analisados, principalmente em relação à presença de polímero no RAP e na identificação do grau de interação entre ligantes.

Palavras-chave: Pavimentação asfáltica (Reciclagem), Sustentabilidade, Materiais recicláveis, Rodovias, Material fresado (RAP).

### ABSTRACT

The production of recycled asphalt mixtures with high contents of reclaimed asphalt pavement (RAP) has become attractive in the past few years, as it is a sustainable solution which allows considerable cost reductions. However, the production of these mixtures without losing performance in the field is still a challenge. Different from what happens on cold recycling, on hot and warm recycling processes the aged asphalt binder present in the RAP is activated, and it is difficult to determine the degree to which this happens. As a result, the mix design is often not done properly, what might compromise mixture performance. The present study aims to analyze the applicability of laboratory procedures to evaluate the RAP binder activation and the blending between fresh and RAP binders, in hot and warm recycled asphalt mixtures. The method for evaluating RAP binder activation was applied to different types of RAP, and a staged extraction method was developed to assess the degree of binder blending in recycled mixtures. In this process, binder extraction is conducted in three steps, dividing the binder in three layers. The binder layers obtained are recovered, and the homogeneity between them is determined through rheological testing. The results obtained showed it is possible to obtain relevant information by applying the studied methods, especially regarding the presence of polymer in the RAP and the degree of blending in recycled mixtures.

Keywords: Asphalt pavements (Recycling), Sustainability, Recycled materials, Highways, Reclaimed asphalt (RAP).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Organização do conteúdo da dissertação23
Figura 2 - Composição do custo de produção de misturas asfálticas recicladas de acordo com o teor de RAP adicionado28
Figura 3 - Exemplo de utilização de <i>blending chart</i> para seleção do ligante asfáltico virgem
Figura 4 - Cenários possíveis para interação entre ligantes na reciclagem
Figura 5 - (a) Fresadora utilizada na obtenção do RAP B e (b) pilha da qual foram coletadas as amostras do material40
Figura 6 - Resultados da análise granulométrica antes e depois da queima do ligante asfáltico: (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F41
Figura 7 - Possíveis composições dos grumos de agregado dentro do RAP43
Figura 8 - Ilustração do cálculo dos parâmetros (a) <i>Wf</i> , <i>pico</i> e (b) <i>Wf</i> , <i>total</i> 46
Figura 9 - Volume de vazios das amostras de (a) RAP B, (b) RAP C e (c) RAP E48
Figura 10 - Resultados de <i>RT</i> obtidos para os materiais (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F51
Figura 11 - Resultados de <i>Wf</i> , <i>pico</i> obtidos para os materiais (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F
Figura 12 - Resultados de <i>Wf, total</i> obtidos para os materiais (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F
Figura 13 - Resultados de <i>DOA</i> % obtidos para os materiais (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F
Figura 14 - Resultados dos ensaios de MSCR a 70°C: (a) <i>Jnr</i> e (b) <i>R</i> %60
Figura 15 - Espectros obtidos nos ensaios de FTIR-ATR62

Figura 16 - Espectros característicos dos polímeros polisestireno, polibutadieno e SBS63
Figura 17 - Detalhe dos espectros nas bandas (a) 698 cm <sup>-1</sup> e (b) 966 cm <sup>-1</sup> 63
Figura 18 - Detalhe dos espectros nas bandas (a) 1732 cm <sup>-1</sup> e (b) 1640 cm <sup>-1</sup> 65
Figura 19 - Ilustração do procedimento de extração por etapas67
Figura 20 - Curva granulométrica de projeto das misturas WMA 0% RAP e WMA 25% RAP71
Figura 21 - Aparelho de extração por refluxo utilizado nos experimentos73
Figura 22 - Quantidade de ligante obtido em cada etapa para (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP75
Figura 23 - Curvas mestras de <i>G</i> *, na temperatura de referência de 15°C, dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP82
Figura 24 - Curvas mestras de $\delta$ , na temperatura de referência de 15°C, dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP
Figura 25 - Valor relativo de <i>G</i> * dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP85
Figura 26 - Valor relativo de $\delta$ dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a)

Figura 28 - Resultados do parâmetro Glover-Rowe para ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP.90

Figura 29 - Valor relativo do parâmetro Glover-Rowe para ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP.91

Figura 30 - Resultados de *Jnr* para os ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP .......93

Figura 31 - Valor relativo de *Jnr* para os ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP ......94

Figura 32 - Resultados de *R*% dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP ......95

Figura 34 - Curvas de fadiga dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP ......97

Figura 35 - Curva granulométrica de projeto das misturas de laboratório ......103

Figura 36 - Proporção de ligante obtida em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2104

Figura 37 - Curvas mestras de G \*, na temperatura de referência de 15°C, dos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A -Figura 38 - Curvas mestras de  $\delta$ , na temperatura de referência de 15°C, dos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2.....107 Figura 39 - Valor relativo de G \* nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B -Figura 40 - Valor relativo de  $\delta$  nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B -Figura 41 - Diagramas de Espaço *Black* dos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2 ......110 Figura 42 - Resultados do parâmetro Glover-Rowe nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2.....111 Figura 43 - Valor relativo do parâmetro Glover-Rowe nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2.....112 Figura 44 - Resultados de *Jnr* nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B -Figura 45 - Valor relativo de *Inr* nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B -

Figura 46 - Resultados de $R$ % nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A
- amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B -
amostra 2116
Figura 47 - Curvas características de dano dos ligantes obtidos em cada etapa para
(a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d)
Mistura B - amostra 2117
Figura 48 - Curvas de fadiga dos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A -
amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B -
amostra 2118

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais fresados analisados	9
Tabela 2 - Resultados da caracterização dos RAPs analisados4	1
Tabela 3 - Características do ligante asfáltico virgem das misturas WMA 0% RAP e   WMA 25% RAP   70	D
Tabela 4 - Tempos de duração de cada etapa do processo74	4
Tabela 5 - Características do ligante asfáltico virgem utilizado nas misturas de   laboratório   102	2
Tabela 6 - Tempos de extração fixados para cada etapa do processo	4

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO				16	
	1.1	OBJE	TIVOS	20	
	1.2	ESTR	UTURA DO TRABALHO	21	
2	REVI	SÃO BI	BLIOGRÁFICA	24	
	2.1	EVOL MORN	UÇÃO DOS PROCESSOS DE RECICLAGEM A QUENTE I IA	<u>≡</u> 24	
	2.2	OBSTÁCULOS PARA O AUMENTO DO TEOR DE RAP			
	2.3 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM RAP			30	
	2.4	4 INTERAÇÃO ENTRE LIGANTES ASFÁLTICOS NA RECICLA			
	2.5	2.5 PROCEDIMENTOS DE EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE LIGA ASFÁLTICO			
3	ATIVAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO PRESENTE NO RAP				
	3.1	CARA	CTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS		
	3.2 METODOLOGIA			43	
3.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DO			SENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47	
		3.3.1	Volume de vazios	47	
		3.3.2	Resistência à tração por compressão diametral	50	
		3.3.3	Cálculo do grau de ativação de ligante (DOA%)	55	
	3.4	INVES	STIGAÇÃO DA PRESENÇA DE POLÍMERO NOS RAPS	58	
		3.4.1	MSCR	58	
		3.4.2	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fou	rier62	
	3.5	CONC	LUSÕES	65	
4	AVAL	IAÇÃC	DO GRAU DE INTERAÇÃO ENTRE LIGANTES ATRAVÉ	S DO	
PR	OCED	IMENT	O DE EXTRAÇÃO POR ETAPAS	67	
	4.1	<ul><li>4.1 INTRODUÇÃO</li><li>4.2 MATERIAIS</li></ul>			
	4.2				

		4.2.1	Misturas asfálticas mornas WMA 0% RAP e WMA 25%	» RAP69	
		4.2.2 Mistura asfáltica PMA 60% RAP			
	4.3	.3 METODOLOGIA			
		4.3.1	Procedimento de extração por etapas	72	
		4.3.2	Ensaios reológicos	76	
		4.3	3.2.1. Curvas mestras de $ G^*  \in \delta$	77	
		4.3	3.2.2. Diagramas de Espaço Black	78	
		4.3	3.2.3. Parâmetro Glover-Rowe (GR)	79	
		4.3	3.2.4. Ensaio MSCR	79	
		4.3	3.2.5. Ensaio LAS	80	
	4.4	APRE	SENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	81	
		4.4.1	Curvas mestras de $ G^* $ e $\delta$	81	
		4.4.2	Diagramas de Espaço <i>Black</i>	87	
		4.4.3	Parâmetro Glover-Rowe (GR)	89	
		4.4.4	Ensaio MSCR	92	
		4.4.5	Ensaio LAS	95	
	4.5	CONC	LUSÕES	98	
5	EFEI	TO DA T	TEMPERATURA DE CONDICIONAMENTO DO RAP S	OBRE O	
GR/	AU DE		RAÇÃO ENTRE LIGANTES	100	
	5.1	INTRC	DDUÇÃO	100	
	5.2	MATE	102		
	5.3	ΜΕΤΟ	103		
		5.3.1	Preparação das misturas asfálticas	103	
		5.3.2	Procedimento de extração por etapas	104	
		5.3.3	Ensaios reológicos	105	
	5.4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS105			
		5.4.1	Módulo de cisalhamento dinâmico (G*) e ângulo de fas	e (δ)105	

7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS122			22	
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS		QÕES FINAIS1	20		
	5.5	CONC	CLUSÕES		
		5.4.5	Ensaio LAS1	16	
		5.4.4	Ensaio MSCR1	13	
		5.4.3	Parâmetro <i>Glover-Rowe</i> (GR)1	11	
		5.4.2	Diagramas de Espaço Black1	09	

### 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o ramo da pavimentação rodoviária tem vivenciado uma maior busca por processos e materiais alternativos capazes de reduzir simultaneamente os custos de produção e os prejuízos ao meio ambiente associados à construção e manutenção de pavimentos asfálticos. Como resultado, já são práticas comuns a reciclagem de materiais asfálticos, a reutilização de diversos tipos de resíduos, a produção de misturas asfálticas mornas (com temperatura de usinagem reduzida), e o uso de ligantes, aditivos e modificadores oriundos de fontes renováveis. Estas são apenas algumas das soluções desenvolvidas que têm se firmado como opções viáveis para reduzir o consumo de recursos naturais, a dependência em relação ao petróleo, a deposição de resíduos sólidos, o consumo energético e a emissão de poluentes, sempre visando a produção de pavimentos com desempenho equiparável, ou até melhor que os pavimentos asfálticos convencionais.

Todos estes benefícios ao meio ambiente, unidos à possibilidade de redução de custos, fazem com que a adoção de práticas sustentáveis continue crescendo, assim como a busca por inovações nessa área. Nos Estados Unidos, o material asfáltico fresado proveniente de pavimentos deteriorados, também chamado de RAP (do inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement*) é o material mais reciclado do país, com mais de 99% do que é gerado sendo reaproveitado em novos pavimentos ao invés de ser depositado em aterros. Segundo dados da *National Asphalt Pavement Association* (NAPA), isso possibilitou uma economia de aproximadamente 3,8 milhões de toneladas de ligante asfáltico e 72 milhões de toneladas de agregados virgens no país durante o ano de 2017, poupando aos cofres públicos o total de US\$ 2,2 bilhões (WILLIAMS; COPELAND; ROSS, 2018).

No Brasil, apesar de existirem experiências bem-sucedidas, não existem dados precisos sobre a produção e o reaproveitamento de material fresado, já que a reciclagem asfáltica ainda não é considerada uma prática rotineira. No entanto, é uma atividade que tem grande potencial para permitir um melhor aproveitamento dos recursos financeiros destinados à expansão e à manutenção da infraestrutura rodoviária. Em nosso país, onde o transporte rodoviário é predominante, a qualidade das estradas afeta de forma significativa o preço final dos produtos comercializados, assim como a competitividade no mercado internacional, sendo fundamental para o

desenvolvimento econômico. Segundo dados da CNT, há um aumento médio de 25,8% no custo operacional do transporte nas rodovias brasileiras devido apenas à má qualidade do pavimento (CNT, 2015). Além disso, a qualidade da infraestrutura está diretamente relacionada à ocorrência de acidentes, que representam altos custos para a sociedade e resultam muitas vezes em vítimas fatais. Dados do ano de 2017 mostram que apenas 12,4% da malha rodoviária brasileira se encontra pavimentada, sendo que desta parcela, 50% teve seu pavimento classificado como regular, ruim ou péssimo (CNT, 2018). Torna-se evidente a necessidade de desenvolvimento da infraestrutura rodoviária no Brasil, e a reciclagem de materiais asfálticos pode ser uma aliada importante neste processo ao permitir a redução de custos, desde que se consiga garantir o desempenho adequado dos materiais reciclados.

O reaproveitamento do RAP pode se dar de diversas formas, sendo comum sua utilização em bases e sub-bases de material granular ou estabilizado, porém é quando inserido na camada de revestimento que ele tem o potencial para substituir os materiais de maior custo, principalmente o ligante asfáltico, que além de ser o material mais caro, está mais sujeito a flutuações de preço (COPELAND, 2011; ZAUMANIS; MALLICK; FRANK, 2014). Para que isso aconteça, no entanto, é necessário que o ligante asfáltico oxidado presente no RAP seja remobilizado, ou ativado, de forma que possa interagir com os materiais virgens durante o processo de reciclagem. É nos processos de reciclagem a quente e morna que isso acontece, através do aquecimento do material fresado e da aplicação de agentes rejuvenescedores, enquanto nos processos de reciclagem a frio o ligante permanece enrijecido e atua como se fizesse parte dos agregados (ZAUMANIS; MALLICK, 2015).

Dados todos os benefícios econômicos e ambientais da utilização de RAP em revestimentos asfálticos, é natural que se deseje incluir quantidades cada vez maiores deste material nas misturas asfálticas recicladas, de forma a maximizar suas vantagens. Contudo, a produção de misturas asfálticas recicladas com teores elevados de RAP ainda é vista como um desafio devido às dificuldades enfrentadas para garantir bom desempenho em campo, sendo considerados teores elevados aqueles de 25% ou mais em relação à massa total de mistura asfáltica (COPELAND, 2011). Essa insegurança em relação ao desempenho levou os órgãos rodoviários de diversos países a limitar a proporção de RAP aplicado em revestimentos asfálticos a valores que variam entre 10% e 20% para vias de tráfego médio e pesado (AL-QADI;

ELSEIFI; CARPENTER, 2007). De fato, a limitação se faz necessária porque a falta de cautela no processo de fresagem, no tratamento e armazenamento do RAP e na dosagem da mistura reciclada, assim como o processamento inadequado do material fresado na usina, são fatores que podem facilmente resultar na deterioração precoce da camada de revestimento. Por outro lado, se a devida atenção for dada a todos os fatores relevantes, uma mistura asfáltica com alto teor de RAP pode apresentar desempenho equiparável, ou até melhor que as misturas convencionais (ZAUMANIS; MALLICK, 2015).

Um dos principais motivos para a dificuldade em se aumentar o teor de RAP nas misturas asfálticas recicladas é a falta de conhecimento acerca dos mecanismos envolvidos na interação entre o ligante asfáltico presente no RAP e o ligante asfáltico novo (LO PRESTI et al., 2016). É desejável que todo o ligante presente no RAP seja ativado e se misture completamente com o ligante virgem, possibilitando máxima economia. Durante a dosagem de misturas asfálticas contendo material reciclado assume-se que isso ocorre. Todavia, sabe-se hoje que, na prática, é comum que parte do ligante envelhecido se mantenha inativo, ou que os dois ligantes não formem um filme asfáltico homogêneo recobrindo os agregados, principalmente para teores mais altos de RAP, o que pode afetar o comportamento da mistura de forma negativa, principalmente em relação à durabilidade (SOLEYMANI et al., 2000; HUANG et al., 2005; BOWERS et al., 2014; SREERAM et al., 2018). Tendo em vista que a ativação do ligante no RAP e a interação entre os dois ligantes são influenciadas tanto pelas propriedades dos materiais envolvidos quanto pelas condições em que a usinagem é realizada, o desafio atual está em quantificar o grau com que estes fenômenos acontecem. A partir deste conhecimento, é possível avaliar a necessidade de medidas que favoreçam a mobilização do ligante envelhecido e a interação entre os ligantes, ou que compensem possíveis prejuízos ao desempenho da mistura asfáltica causados por uma baixa eficiência nesses processos.

Na literatura internacional, costuma-se adotar o termo *degree of blending*, ou *blending efficiency*, para se referir ao mecanismo de reaproveitamento do ligante envelhecido presente no RAP, incluindo: (i) a transição para uma fase menos viscosa, (ii) a sua mescla com o ligante asfáltico novo, e (iii) o ligante asfáltico final obtido. Porém, é interessante que se separe este processo em duas etapas. A primeira delas consiste na chamada ativação do ligante oxidado, processo pelo qual parte desse

ligante se torna disponível para interagir com os materiais novos, por meio do aquecimento e a consequente redução da viscosidade, enquanto outra parte permanece enrijecida, ou inativa, junta dos agregados do RAP. Já a segunda etapa envolve a interação entre o ligante asfáltico novo e o ligante do RAP que foi ativado e que se tornou disponível ao fim da etapa anterior. Embora exista uma relação complexa entre o que acontece em ambas, essa separação é interessante já que a primeira etapa está muito mais associada às propriedades intrínsecas do RAP, enquanto a segunda é mais dependente de fatores externos. Assim, é interessante analisar separadamente a influência das propriedades do material fresado e a influência do processo de usinagem. Essa divisão é a mesma que tem sido adotada em trabalhos mais recentes, como em Kaseer, Arámbula-Mercado e Martin (2019), e nas discussões do comitê TC 264-RAP do International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM), grupo de pesquisa internacional que conta com uma força-tarefa dedicada especificamente a este assunto, nas quais têm sido utilizados os termos degree of binder activity (DoA) e degree of blending (DoB) para se referir ao grau de ativação do ligante (presente no RAP) e ao grau de interação entre os ligantes, respectivamente (LO PRESTI et al., 2019). A mesma nomenclatura será mantida ao longo do presente trabalho.

Ainda não existe um consenso sobre qual método é o mais adequado para avaliar e quantificar estes dois mecanismos presentes nas misturas asfálticas recicladas pelos processos a quente e morno. Dentre diversos métodos propostos na literatura para analisar a interação entre ligantes, ou DoB, uma opção que tem sido adotada por diferentes grupos de pesquisa é a técnica de extração por etapas, processo que envolve a extração de camadas sucessivas de ligante de uma amostra de mistura asfáltica com RAP, por meio do uso de solvente, seguida pela recuperação do ligante asfáltico de cada uma destas camadas (ZHAO; HUANG; SHU, 2015). Ao se avaliar o comportamento e as propriedades dos ligantes obtidos em cada uma das camadas, obtém-se um indicativo da homogeneidade do filme asfáltico que recobre os agregados, resultado do grau de interação entre os ligantes. Apesar de existirem casos de sucesso da aplicação desta técnica, os equipamentos e procedimentos utilizados são muito variáveis, o que dificulta sua reprodução, e ainda não se sabe qual parâmetro é o mais adequado para indicar a homogeneidade entre as camadas de ligante e quantificar o DoB. Em relação à ativação do ligante (DoA), que é característica de cada RAP, ainda não existe um método de avaliação que tenha sido estudado com mais profundidade, já que este é um conceito mais recente. Uma metodologia que demonstra potencial é a desenvolvida por Pires (2018), que consiste na compactação de corpos de prova Marshall, contendo somente o RAP a ser analisado condicionado em diferentes temperaturas. As amostras são então submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de forma que o ganho de resistência ocasionado pelo aumento da temperatura seja um indicativo da facilidade ou dificuldade com que o ligante asfáltico presente no material é ativado, resultando em um parâmetro para quantificar a DoA.

### 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicabilidade de procedimentos laboratoriais para a avaliação da ativação do ligante presente no material fresado e da interação entre ligantes, em misturas asfálticas recicladas através dos processos a quente e morno. Para alcançá-lo, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Adaptar o método de análise da ativação do ligante (DoA) proposto por Pires (2018) a diferentes tipos de material fresado, de forma a compreender as potencialidades do método e aprofundar a interpretação dos seus resultados;
- Desenvolver um procedimento laboratorial de extração por etapas para análise do grau de interação entre ligantes (DoB), utilizando equipamentos padronizados e que sejam frequentemente utilizados em laboratórios de pavimentação, facilitando assim a sua reprodução em outros estudos;
- Aplicar a metodologia de extração por etapas na avaliação de diferentes misturas asfálticas recicladas produzidas em usina, e empregar diferentes técnicas na caracterização dos ligantes asfálticos obtidos em cada etapa do processo, buscando identificar o ensaio, ou parâmetro, mais adequado para a análise da heterogeneidade entre eles e para a quantificação do DoB.

#### 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está organizado em 6 capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 1, o tema do trabalho é introduzido e contextualizado, de forma a possibilitar a compreensão do problema estudado e da sua relevância. São também apresentados os objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica na qual são abordados os principais conceitos relacionados ao tema em estudo, incluindo um histórico dos processos de reciclagem a quente e morno, uma análise das principais dificuldades enfrentadas para o aumento do teor de RAP nas misturas asfálticas, e uma síntese de como os métodos de dosagem utilizados atualmente em diferentes países contemplam a influência do ligante asfáltico presente no RAP. Além disso, é apresentada uma revisão sobre as técnicas de extração e recuperação de ligante asfáltico, processos que terão papel importante ao longo do trabalho.

O Capítulo 3 trata do estudo referente à ativação do ligante asfáltico presente no material fresado. Nele a metodologia utilizada é apresentada, os materiais fresados estudados são caracterizados, e os resultados são analisados e discutidos.

O Capítulo 4 compreende o desenvolvimento do procedimento de extração em etapas a ser utilizado e a sua aplicação a diferentes misturas asfálticas com RAP produzidas em usina. São apresentados os equipamentos e o procedimento utilizados, de forma detalhada, e os materiais são caracterizados, incluindo os ligantes asfálticos e os RAPs utilizados na produção das misturas. Os ligantes obtidos ao final do processo de extração por etapas são analisados por meio de ensaios reológicos, e os resultados são discutidos com foco na avaliação da interação entre ligantes nos processos de reciclagem a quente e morna.

No Capítulo 5, a metodologia desenvolvida e aplicada no capítulo anterior é utilizada na avaliação de duas misturas asfálticas com 50% de RAP produzidas em laboratório. Em uma delas, o RAP é adicionado à temperatura ambiente e os agregados virgens são superaquecidos, enquanto na outra todos os materiais são aquecidos na temperatura de usinagem. Busca-se então avaliar o efeito deste processo de usinagem na interação entre os ligantes, além da sensibilidade do

método ao processo de aquecimento do RAP, e consequentemente da ativação do ligante. Além da caracterização dos materiais utilizados, o processo de usinagem em laboratório é apresentado, e os ligantes asfálticos obtidos no processo de extração por etapas são analisados por meio de ensaios reológicos, cujos resultados são apresentados e discutidos.

Por fim, o Capítulo 6 contém as conclusões obtidas a partir de uma visão global dos resultados apresentados nos capítulos anteriores, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

A forma como esta pesquisa foi estruturada está ilustrada no fluxograma da Figura 1, que mostra também quais materiais foram analisados em cada capítulo do trabalho.



Figura 1 - Organização do conteúdo da dissertação

Fonte: Autor

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE RECICLAGEM A QUENTE E MORNA

Quando um pavimento asfáltico atinge o fim da sua vida de serviço e se encontra deteriorado, é fundamental que a sua capacidade estrutural e as suas condições superficiais sejam restauradas. Nos processos de restauração, reabilitação e reconstrução de pavimentos, é comum que as camadas asfálticas deterioradas, ou parte delas, sejam removidas antes da construção de uma nova camada, principalmente quando a espessura total do pavimento não pode ser alterada, ou quando se deseja atenuar a ocorrência de reflexão de trincas (BONFIM, 2010). O material asfáltico que é removido por meio de fresagem ou de escarificação, chamado de RAP, contém agregados e ligante asfáltico de alta qualidade que podem ser reutilizados, apesar de se encontrarem envelhecidos e fragmentados (AL-QADI; ELSEIFI; CARPENTER, 2007; COPELAND, 2011). A reciclagem asfáltica nada mais é que o reaproveitamento deste material, de forma que ele substitua pelo menos parte dos materiais virgens usados na produção de novas camadas de pavimento.

O reaproveitamento do material fresado pode se dar de diferentes formas, a depender das características do material a ser reciclado e do produto final desejado. Além de poder ser um substituto para materiais granulares de menor custo, o RAP pode ser incorporado a misturas asfálticas usinadas a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), a misturas asfálticas mornas (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*), ou ainda ser reaproveitado através de processos de reciclagem a frio, com a adição de ligante hidráulico, de emulsão asfáltica, ou de espuma de asfalto. A grande vantagem dos processos de reciclagem a quente e morna é a possibilidade de que o ligante asfáltico envelhecido presente no RAP seja ativado, graças ao aumento da temperatura e à adição de agentes rejuvenescedores, e assim substituir boa parte do ligante asfáltico virgem que seria adicionado à mistura, este que costuma ser o material de maior custo no pavimento (BROSSEAUD, 2011; ZAUMANIS; MALLICK, 2015).

Apesar de ser um tema bastante atual, a reciclagem asfáltica não é um conceito recente. As primeiras experiências documentadas com o uso de RAP na produção de pavimentos asfálticos nos Estados Unidos aconteceram no início no século XX, quando se utilizava asfalto natural importado da ilha de Trinidad, no Caribe, material

conhecido como *Trinidad Lake Asphalt* (NEWCOMB; BROWN; EPPS, 2007). Os altos custos de importação naquele momento fizeram com que as construtoras buscassem alternativas mais viáveis, e uma delas foi reaquecer misturas asfálticas removidas de pavimentos deteriorados e incorporá-las na usinagem de novas misturas (BROCK; RICHMOND, 2007).

Um exemplo do potencial econômico da reciclagem asfáltica foi a experiência vivida em Singapura no início da década de 1930. Naquela ocasião, a reciclagem foi a solução encontrada para tornar economicamente viável a manutenção de grande parte da infraestrutura viária da cidade, que havia se degradado de forma precoce, conforme relata Taylor (1978). Alguns anos antes, em 1923, o sistema de transporte público da cidade era composto basicamente por bondes sobre trilhos. Estes, no entanto, se encontravam em mau estado de conservação, e o governo decidiu substituí-los por trólebus, veículos elétricos com pneus de borracha que não exigem a instalação de trilhos para operar. Assim, a rede de trilhos existente foi removida e a prefeitura aproveitou a oportunidade para reconstruir os pavimentos da rede viária, empregando materiais asfálticos como revestimento. Os primeiros resultados foram satisfatórios, porém a partir de 1927 alguns dos materiais que vinham sendo utilizados foram substituídos, principalmente os materiais asfálticos, que passaram a ser importados de outros locais devido à alta nos custos. Como resultado, os novos pavimentos começaram a apresentar problemas de trincamento e de deformação permanente, a depender dos materiais utilizados.

Em muito pouco tempo grande parte da infraestrutura já se encontrava degradada, já que mesmo os pavimentos construídos antes da substituição dos materiais estavam chegando ao final da sua vida útil. Em 1930, Taylor passou um ano na cidade de Londres estudando os métodos de dosagem e os ensaios de laboratório utilizados na época e averiguando os motivos para os recentes insucessos, retornando a Singapura em 1931 decidido a criar uma especificação para garantir que os futuros revestimentos asfálticos apresentassem desempenho adequado. Porém, mesmo com o conhecimento técnico, ainda havia um empecilho financeiro. Como todas as obras de pavimentação na cidade haviam sido conduzidas pela própria prefeitura, não existia uma empreiteira que pudesse ser responsabilizada pelos problemas apresentados, e muito do dinheiro público já havia sido desperdiçado. O desafio naquele momento era encontrar uma forma econômica de restaurar os

pavimentos da cidade, e surgiu a ideia de mesclar os materiais asfálticos que haviam ficado muito deformáveis com aqueles que estavam excessivamente rígidos, produzindo assim um material com desempenho aceitável, o que se mostrou viável com a adição de uma parcela de materiais virgens. Após algumas dificuldades iniciais serem superadas, foi possível reaproveitar os materiais deteriorados com sucesso, e os revestimentos reciclados só atingiram o fim de sua vida de serviço após um período de 25 a 30 anos.

Apesar de experiências bem-sucedidas como essa na primeira metade do século XX, o aprimoramento dos processos de exploração e de refino do petróleo e a descoberta de novos poços de exploração possibilitaram a obtenção de ligantes asfálticos com custo reduzido, o que tornou a reciclagem cada vez menos atrativa (BROCK; RICHMOND, 2007). Somente após a crise do petróleo na década de 1970 e o consequente aumento dos custos do ligante asfáltico foi que a reciclagem asfáltica passou a ser estudada mais a fundo e se difundiu, principalmente nos Estados Unidos, onde foi impulsionada também pela escassez de agregados virgens em algumas regiões e pela imposição de restrições para o descarte de resíduos (NEWCOMB; EPPS, 1980; HOWARD; COOLEY; DOYLE, 2009). A partir daquele momento, as experiências com o uso de RAP começaram a ser melhor documentadas, e algumas das dificuldades encontradas para o uso de teores elevados do material em misturas a quente se tornaram mais evidentes, em especial a dificuldade de se garantir o desempenho adequado, segundo contam Howard, Cooley e Doyle (2009). De acordo com Newcomb, Brown e Epps (2007), outros problemas encontrados foram a inflamabilidade dos agentes rejuvenescedores usados na época e a emissão excessiva de poluentes, e tudo isso desencorajou o avanço das pesquisas na década de 1980. De acordo com os autores citados, muitos dos problemas encontrados desapareciam com o uso de teores baixos de RAP, principalmente com a evolução dos equipamentos de fresagem, que tornaram possível a extração do material com melhor controle do tamanho das partículas, exigindo menos cuidado no tratamento do material nas usinas. Isso tudo, somado à experiência adquirida ao longo dos anos, fez com que se tornasse rotineira no país a adição de 10% a 25% de RAP na produção de misturas asfálticas usinadas a quente, sem que o conhecimento acerca do uso de teores mais altos se desenvolvesse (NEWCOMB; BROWN; EPPS, 2007).

Uma das primeiras experiências brasileiras relacionadas à reciclagem asfáltica aconteceu em 1986, quando foi aplicada na Rodovia Anhanguera uma mistura asfáltica contendo 50% de RAP, produzida em usina do tipo *drum-mixer*. O desempenho da mistura aplicada foi altamente satisfatório, e 14 anos após a obra o pavimento ainda se encontrava em excelentes condições, conforme relata Castro Neto (2000).

O interesse no aumento da quantidade de RAP nos revestimentos asfálticos ressurgiu apenas a partir do ano de 2006, graças às altas sucessivas nos preços dos ligantes asfálticos e à crise econômica que afetou o mundo todo em 2008. Desta vez, a busca pela redução de custos veio acompanhada também de um forte apelo ambiental, o que intensificou a busca pelo desenvolvimento e pelo aprimoramento dos processos de reciclagem (NEWCOMB; BROWN; EPPS, 2007). Isso porque a utilização de RAP reduz a emissão de poluentes e o consumo de combustível associados à exploração dos materiais virgens e seu transporte até as usinas, reduz o consumo de matéria prima não renovável e reduz a deposição de resíduos em aterros. Tais benefícios ambientais têm sido cada vez mais valorizados pela sociedade, à medida em que se busca uma relação cada vez mais sustentável entre o homem e o meio ambiente (AL-QADI; ELSEIFI; CARPENTER, 2007; WEST; WILLIS; MARASTEANU, 2013).

Hoje em dia, a produção de misturas asfálticas com alto teor de RAP sem prejuízo ao desempenho já é vista como algo factível, e existem experiências com misturas asfálticas contendo até 100% de RAP. Mesmo havendo dificuldades a serem superadas para a produção destes materiais, que serão descritas mais adiante, um cálculo realizado por Zaumanis, Mallick e Frank (2014) mostra que os custos associados aos materiais só tendem a diminuir com o aumento do teor de RAP, chegando a uma economia máxima de 50% a 70% em relação ao custo de uma mistura convencional sem material fresado, conforme apresentado na Figura 2. Foram utilizados neste cálculo dados do ano de 2014, e os autores ressaltam que a composição de custos pode variar dependendo da tecnologia utilizada e de fatores geográficos. Pode-se perceber que, apesar de serem necessárias despesas adicionais com ensaios de laboratório, com o tratamento do RAP, com agentes rejuvenescedores e com o controle das emissões (já que o aquecimento do RAP pode

resultar na emissão de poluentes), a economia obtida ainda é significativamente maior, como também afirmam Newcomb, Brown e Epps (2007).





Fonte: Adaptado de Zaumanis, Mallick e Frank (2014)

### 2.2 OBSTÁCULOS PARA O AUMENTO DO TEOR DE RAP

Mesmo após um desenvolvimento considerável dos processos de reciclagem na última década, o uso de teores elevados de RAP nos revestimentos asfálticos continua sendo visto como um desafio. Nos Estados Unidos, onde existem dados bastante detalhados sobre a utilização de RAP, as misturas recicladas recebem em média 20% de RAP, segundo Williams, Copeland e Ross (2018).

Os principais obstáculos citados pelas empreiteiras para o aumento deste número são os limites estabelecidos pelas legislações locais, a disponibilidade de RAP, a capacidade das usinas e o desempenho da mistura asfáltica final, além da falta de vantagens econômicas, segundo West, Willis e Marasteanu (2013). Os autores chamam atenção para a falta de orientação, por parte dos órgãos governamentais, para o processamento e o gerenciamento adequados do RAP e para a dosagem das misturas recicladas, além da falta de informações sobre o desempenho de misturas recicladas com teores mais altos de RAP. O aumento do teor de RAP também se torna mais difícil quando as características granulométricas e as propriedades do ligante asfáltico contido nele são significativamente diferentes da mistura final desejada (NEWCOMB; BROWN; EPPS, 2007).

A insegurança em relação ao desempenho das misturas asfálticas talvez seja o maior empecilho para o aumento do teor de RAP, e é o principal motivo pelo qual muitos dos órgãos rodoviários ao redor do mundo ainda não permitem esse aumento. A proporção de RAP aplicada no projeto de revestimentos asfálticos é normalmente limitada a valores que vão, em geral, de 10% a 20% para vias de tráfego médio e pesado. Em vias de tráfego leve, este limite costuma ser maior (AL-QADI; ELSEIFI; CARPENTER, 2007; COPELAND, 2011). Na Europa, o teor máximo de RAP permitido pelas autoridades dificilmente chega a 40% (IPAVEC; MARSAC; MOLLENHAUER, 2012). Tal dificuldade para garantir um bom desempenho se dá principalmente pela alta variabilidade nas propriedades dos materiais fresados e pela falta de conhecimento acerca dos mecanismos envolvidos na sua mistura junto aos materiais virgens (LO PRESTI et al., 2016). Além disso, ainda não existem métodos de dosagem consolidados para a produção destas misturas (ZAUMANIS; MALLICK, 2015).

Outro fator limitante para o uso de altos teores de RAP está nas usinas. Na produção de misturas recicladas, o material fresado normalmente é aquecido por meio do contato com os agregados virgens, que são previamente superaquecidos para que se alcance a temperatura desejada de usinagem depois de atingir o equilíbrio térmico. Quando a quantidade de RAP é aumentada, a transferência de calor pelos agregados virgens não é suficiente, e é necessário que o material fresado seja aquecido diretamente, mas sem que o ligante asfáltico presente nele seja incendiado ou oxidado pelo calor, sendo necessário um processo de produção diferente do habitual (ZAUMANIS; MALLICK; FRANK, 2016a). Pode-se perceber, portanto, que o caminho rumo ao uso de teores elevados de RAP sem prejuízo ao desempenho passa por evoluções em diferentes aspectos da produção. Suzuki et al. (2018) apresentam uma revisão sobre as formas de adaptação de usinas para a produção de misturas asfálticas recicladas. Em usinas gravimétricas, os autores destacam como possíveis adaptações a adição de um funil de pesagem independente para o RAP e a instalação de um tambor secador especial para o material fresado. Já nas usinas contínuas, é possível adicionar o RAP de diferentes formas a depender do tambor misturador disponível, e destaca-se a importância de adaptações para redução de emissões e poluentes, principalmente na produção de misturas 100% RAP. Ressalta-se, ainda, a importância dos cuidados durante a coleta, tratamento e armazenamento do material fresado para que se obtenha bons resultados.

### 2.3 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM RAP

O uso de RAP em revestimentos asfálticos é benéfico ao meio ambiente e representa uma ótima oportunidade para a redução de custos, porém ainda enfrenta a relutância de muitos órgãos rodoviários, construtoras e concessionárias que citam o desempenho das misturas recicladas como maior empecilho. Por outro lado, muitos pesquisadores reconhecem que misturas asfálticas com RAP podem apresentar desempenho equiparável ou ainda melhor que misturas feitas apenas com material virgem, desde que sejam projetadas e dosadas adequadamente (MCDANIEL et al., 2000; NEWCOMB; BROWN; EPPS, 2007). Pode-se perceber que a dificuldade para garantir um bom desempenho está em parte associada ao uso os métodos de dosagem tradicionais e na sua adaptação para incluir o material fresado e as suas propriedades, que podem ser muito variáveis. Assim como os materiais virgens, o RAP pode mudar muito dependendo da sua origem (SULLIVAN, 1996). Por esse motivo, a seleção e caracterização adequada dos materiais torna-se igualmente importante, assim como o tratamento adequado do RAP.

No momento da dosagem de misturas asfálticas, o foco é atingir as propriedades volumétricas e mecânicas consideradas necessárias para um bom desempenho (NEWCOMB; BROWN; EPPS, 2007). Com a incorporação do material fresado, é importante que a quantidade e as propriedades do ligante asfáltico presente nele sejam levadas em conta, assim como as características dos seus agregados. No entanto, ao redor do mundo são utilizadas diferentes metodologias para atingir este objetivo.

Nos Estados Unidos, o método de dosagem Superpave foi implementado na década de 1990 sem apresentar orientações sobre a utilização de RAP nas misturas asfálticas a quente. Além disso, o método propôs o uso de distribuições granulométricas mais graúdas e estabeleceu critérios volumétricos que eram dificilmente obtidos com altos teores de RAP (COPELAND, 2011). Alguns anos mais tarde, a *Federal Highway Administration* publicou um conjunto de recomendações para guiar a dosagem de misturas com RAP utilizando a metodologia Superpave,

baseadas em um estudo anterior por Kandhal e Foo (1997), principalmente no que diz respeito à seleção do ligante asfáltico virgem a ser adicionado, com diferentes abordagens dependendo do teor de RAP desejado (MCDANIEL et al., 2000). Para teores de até 15% de RAP, o ligante asfáltico virgem não precisaria ser alterado, já que a influência do ligante presente no RAP seria mínima, independente das suas propriedades. Já para teores entre 15% e 25%, o órgão recomenda que seja utilizado ligante asfáltico com PG (*Performance Grade*, sistema de classificação de ligantes asfálticos utilizado no país) um nível abaixo, tanto na temperatura alta de PG quanto na baixa. Para as misturas asfálticas com alto teor de RAP (acima de 25%) o projetista deveria recorrer aos blending charts, ou seja, determinar a temperatura alta de PG do ligante presente no RAP (após extração e recuperação) e do ligante desejado para a mistura final, e obter, através de um gráfico, uma relação linear entre a variação deste parâmetro e a proporção de RAP na mistura. Assim, seria possível prever o efeito do ligante envelhecido sobre o ligante virgem, de acordo com as características de cada um e a proporção entre eles, e definir o ligante virgem ideal para a mistura, conforme exemplificado na Figura 3. Nota-se que os blending charts já eram rotineiramente utilizados para projetar misturas com alto teor de RAP mesmo antes da implementação do método Superpave, porém utilizava-se a viscosidade dos ligantes como parâmetro, ao invés da temperatura de PG (WEST; WILLIS; MARASTEANU, 2013).





Tais recomendações foram posteriormente incluídas na norma AASHTO M323-07, que especifica a dosagem de misturas asfálticas pela metodologia Superpave, assim como recomendações adicionais para o manuseio e a caracterização do RAP em laboratório. Na sua versão mais atual, AASHTO M323-17, o sistema para seleção do ligante asfáltico virgem foi revisado, e o critério utilizado não é mais a porcentagem de RAP em relação à massa total de mistura, mas sim o parâmetro RBR (*RAP Binder Ratio*), que indica a proporção de ligante oriundo do RAP em relação ao total de ligante asfáltico na mistura. Para RBR inferior a 25%, o ligante virgem não deve ser alterado, caso contrário deve-se recorrer aos *blending charts* (WEST; WILLIS; MARASTEANU, 2013).

Um conceito semelhante é adotado nos países europeus, porém utilizando a penetração e o ponto de amolecimento como parâmetros para caracterização dos dois ligantes. No lugar dos *blending charts*, a norma EN 13108-8:2005 estabelece que sejam utilizadas equações para estimar os parâmetros do ligante asfáltico resultante, de acordo com a proporção em massa de cada ligante na mistura. Caso o teor de RAP seja inferior a 10% para camadas de revestimento ou 20% para camadas de base e de ligação, o ligante asfáltico virgem deve ser o mesmo considerado na dosagem de uma mistura sem RAP, que costuma ser feita pelo método Marshall (IPAVEC; MARSAC; MOLLENHAUER, 2012; JIMÉNEZ DEL BARCO CARRIÓN; LO PRESTI; AIREY, 2015).

Na Austrália e no Japão os *blending charts* também são aplicados, mas utilizando outros parâmetros para caracterização. A norma australiana da Austroads AGPT-T193-15 faz uso da viscosidade dos ligantes asfálticos, enquanto os japoneses utilizam, além da penetração dos ligantes, resultados do ensaio de resistência à tração feitos em amostras de mistura asfáltica produzidas em laboratório (WEST; COPELAND, 2015).

### 2.4 INTERAÇÃO ENTRE LIGANTES ASFÁLTICOS NA RECICLAGEM

Uma das questões essenciais para a compreensão do comportamento de misturas asfálticas com teores elevados de RAP, de forma a dosá-las de forma adequada, é como o ligante asfáltico novo interage com o ligante envelhecido presente no material fresado. Existem três cenários possíveis para descrever a forma

com que esta interação acontece (DING; HUANG; SHU, 2016), conforme ilustrado na Figura 4. Uma possibilidade é que os dois ligantes se misturem completamente, caracterizando uma situação de interação total, ou *full blending*. Este cenário é o que permite a maior economia de ligante asfáltico novo, e por isso é muito comum que essa hipótese seja adotada na etapa de projeto da mistura asfáltica reciclada. Quando isso é feito, é adicionada à mistura apenas a diferença entre a quantidade de ligante total necessária e a quantidade de ligante existente no RAP (SHIRODKAR et al., 2011).



Figura 4 - Cenários possíveis para interação entre ligantes na reciclagem

Fonte: Autor

Outro cenário representa a situação oposta, ou seja, supõe que o ligante presente no fresado não interage de nenhuma forma com o ligante novo, se comportando, portanto, como parte dos agregados. Nesse caso, o RAP costuma ser chamado de agregado negro, ou *black rock*, e a dosagem da mistura dependerá apenas do ligante virgem, sem nenhum efeito do ligante do RAP (MCDANIEL et al., 2000). A implicação em se adotar este cenário como real é que se ignora a possibilidade de que o ligante asfáltico do RAP seja mobilizado, ou ativado. Assim, além de se perder a oportunidade de economizar no ligante asfáltico virgem, parte do ligante presente pode se mobilizar e resultar em excesso de ligante na mistura reciclada. Soleymani et al. (2000) concluíram que este cenário é o mais distante da realidade, em um estudo de laboratório que comparou misturas reais com misturas que simularam as situações de *full blending* e de *black rock* citadas.

O terceiro cenário supõe que a mistura entre os ligantes acontece de forma parcial, e é o que melhor representa o que acontece na prática segundo indicaram alguns estudos (SOLEYMANI et al., 2000; HUANG et al., 2005; BOWERS et al., 2014;
DING; HUANG; SHU, 2016). O estudo conduzido por Soleymani et al. (2000) observou que metade das misturas utilizadas na prática se comportaram de forma diferente das que simularam os casos de *full blending* e *black rock*, indicando que a interação entre os ligantes foi parcial. Em especial nos casos em que o teor de material fresado é alto, não se consegue garantir que 100% do ligante presente no RAP seja ativado e se misture com o ligante novo, e isso pode ser prejudicial ao desempenho da mistura se, no momento da dosagem, for considerada interação total entre os ligantes. Wellner et al. (2015) sugerem que se admita algo entre 60% e 100% de ativação do ligante do RAP para que se tenha bons resultados de desempenho.

É importante ressaltar que os diferentes cenários citados resultam da ação de dois mecanismos diferentes, conforme citam Lo Presti et al. (2019) e Kaseer, Arámbula-Mercado e Martin (2019). O primeiro deles é a ativação do ligante presente no RAP, ou seja, a redução da sua viscosidade de forma que ele fique disponível para interagir com o ligante virgem adicionado. Se não houver ligante do RAP ativado, ou disponível, não haverá interação entre os ligantes, resultando no cenário de *black rock*. Por outro lado, mesmo que todo o ligante do RAP seja ativado e se torne disponível, isso não significa que os dois ligantes irão interagir completamente e formar um filme asfáltico homogêneo, já que essa interação depende de fatores externos como tempo e temperatura de usinagem. Entretanto, quanto maior a quantidade de ligante do RAP ativado, maior a probabilidade de que ele se dissipe uniformemente em meio ao ligante asfáltico novo. Dessa forma, os dois mecanismos dependem um do outro de uma forma complexa, e é muito difícil que se consiga estudá-los de forma completamente isolada.

# 2.5 PROCEDIMENTOS DE EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO

Existem inúmeros motivos para que se queira analisar as propriedades de um ligante asfáltico que já passou pelo processo de usinagem e já foi aplicado em campo. Entre eles, podemos citar o desejo de confirmar se o ligante asfáltico correto foi utilizado, a necessidade de avaliar o envelhecimento de curto ou longo prazo sofrido pelo material, ou a tentativa de justificar o desempenho apresentado durante sua vida de serviço. Tendo em mente a utilização de RAP nos processos de reciclagem, é

fundamental que se conheça bem o material que está sendo utilizado, já que ele terá um papel importante no desempenho da mistura final. No entanto, avaliar as propriedades de ligantes que já foram misturados aos demais componentes da mistura asfáltica é uma tarefa que envolve alguns cuidados. Por esse motivo, muitos optam por caracterizar somente a mistura asfáltica com ensaios mecânicos. Porém, para conseguir obter as propriedades do ligante isolado é necessário recorrer a técnicas de extração e recuperação com o uso de solvente (RODEZNO; JULIAN, 2018; WAKEFIELD et al., 2018).

O processo de extração consiste na remoção do ligante asfáltico presente na mistura, de forma a se obter os agregados da mistura completamente limpos. Durante esse processo pode-se quantificar o teor de ligante e determinar a curva granulométrica da mistura, além de quaisquer outras propriedades de interesse relacionadas aos agregados. Normalmente, ao final do processo de extração, o ligante asfáltico que foi removido permanece misturado ao solvente que foi utilizado. Por isso, para que se obtenha o ligante asfáltico isolado é necessária ainda a etapa de recuperação, que consiste na remoção completa do solvente (RODEZNO; JULIAN, 2018).

Os primeiros métodos utilizados para separar o ligante de uma mistura asfáltica datam do início do século XX, e utilizavam o dissulfeto de carbono (CS<sub>2</sub>) para a extração, recuperando o ligante em seguida por meio de destilação simples, conforme relatam Wakefield et al. (2018). Segundo os autores, com o passar dos anos percebeu-se que esta técnica não removia o solvente por completo da amostra de ligante, e pesquisadores procuraram melhorar sua eficiência por meio da aplicação de vácuo, ou através do aumento da temperatura. Entretanto, a aplicação de temperaturas muito elevadas favorecia a oxidação do ligante asfáltico, alterando significativamente suas propriedades, e o dissulfeto de carbono apresentava algumas dificuldades como alta pressão de vapor e flamabilidade.

Por isso, em 1933, Gene Abson apresentou um novo método para recuperação de ligante asfáltico, que envolvia o uso do benzeno como solvente e a aplicação de bolhas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante a fase de destilação, tornando mais fácil a remoção do solvente em temperaturas que chegavam no máximo a 163°C (ABSON, 1933). Abson mostrou em seu estudo que ligantes recuperados por esse método

apresentavam resultados de penetração com menos de 3% de diferença em relação aos valores originais. Posteriormente, em 1961, o método de Abson foi aceito pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como método padrão para a recuperação de ligantes asfálticos (WAKEFIELD et al., 2018). O método é detalhado atualmente na especificação ASTM D1856-09.

O benzeno deixou de ser usado a partir da década de 1950, quando o uso do solvente tricloroetileno começou a se popularizar por ser uma opção menos tóxica e não inflamável. Para verificar se o uso do tricloroetileno de fato não influenciava nas propriedades do ligante asfáltico recuperado, Abson e Burton (1960) puseram em prática um experimento envolvendo este e outros tipos de solvente clorado. A partir de resultados de penetração no ligante antes e depois da mistura com o solvente, seguida pelo processo de recuperação, concluíram que o tricloroetileno, assim como alguns outros solventes, era adequado para o processo. Verificou-se, no entanto, um problema que já acontecia com o benzeno, e foi confirmado também para o tricloroetileno: se o ligante asfáltico permanecer diluído nestes solventes por muito tempo, ele sofre um endurecimento (CIPIONE et al., 1991). Assim, os autores recomendam que o ligante permaneça misturado ao solvente por no máximo 8 a 10 horas antes de ser recuperado. Além disso, hoje em dia é reconhecido que o tricloroetileno é uma substância cancerígena e que contribui para a degradação da camada de ozônio, de forma que se busca alternativas para evitar o seu uso ou o contato com esse solvente. A mesma preocupação se dá com o percloroetileno, solvente mais popular nos países europeus (COLLINS-GARCIA et al., 2000; ZIYANI et al., 2017).

Mesmo com o método de Abson bem estabelecido, muitos pesquisadores percebiam que a permanência de resquícios do solvente vinha afetando seus resultados, como citam Burr et al. (1991). Com isso, tornou-se comum também o uso do evaporador rotativo, ou rotaevaporador, para a recuperação do ligante. Nesse método, a solução contendo o solvente e o ligante asfáltico é colocada num frasco de destilação que é rotacionado dentro de um banho de óleo aquecido, enquanto é aplicado vácuo no sistema. De acordo com a norma americana ASTM D5404-12, deve ser aplicado também um fluxo de gás nitrogênio ou de CO<sub>2</sub>, para auxiliar a remoção do solvente e reduzir a oxidação do ligante durante o processo. O método utilizado na Europa, descrito na especificação EN 12697-3, apresenta algumas diferenças em

relação ao método americano, e não utiliza nitrogênio ou CO<sub>2</sub>. Por outro lado, exige uma maior pressão de vácuo e temperaturas mais elevadas. Hospodka, Hofko e Blab (2018) concluíram que uma pressão de vácuo elevada é suficiente para evitar a oxidação do ligante durante o processo, sendo possível inclusive aumentar a temperatura para 180°C na etapa final do processo utilizado na Europa, para facilitar a remoção de solvente em ligantes de viscosidade mais elevada. Uma comparação entre o método de Abson e o do rotaevaporador mostrou que, embora o ligante recuperado possa apresentar diferenças de acordo com o método utilizado, tais diferenças não são sistemáticas e nem significativas. Independentemente do método utilizado, é importante que o solvente seja removido por completo e que se evite a sua oxidação (DIEFENDERFER, 2014).

Em relação ao processo de extração, a especificação ASTM D2172-11 traz cinco metodologias diferentes que podem ser utilizadas. Uma delas é a extração por refluxo (método B da norma), que será utilizada neste trabalho. Neste processo, o solvente é aquecido por uma chapa sobre a qual todo o aparelho de extração é posicionado. Dentro deste, o solvente se transforma em vapor, que atravessa toda a amostra de mistura asfáltica (contida dentro de um cone metálico com papel filtro) e atinge um condensador no topo, onde retorna à forma líquida e cai sobre a amostra. O solvente então percola através da amostra e retorna ao fundo do frasco, levando consigo o ligante asfáltico dissolvido. Segundo Burr et al. (1991) e Mehta et al. (2012), as altas temperaturas envolvidas neste processo podem afetar as propriedades do ligante asfáltico a ser recuperado, sendo preferível o uso de técnicas de extração a frio.

Além dos métodos já mencionados, hoje em dia são muito utilizados processos com o uso do solvente tolueno, dentre os quais se pode citar o procedimento ASTM 7906-14, que faz uso do rotaevaporador no processo de recuperação. A principal tendência, no entanto, para os próximos anos, é que se popularize o uso de sistemas automatizados de extração e recuperação. Estes equipamentos realizam todo o processo de extração e recuperação de forma automática e evitam que o operador entre em contato com o solvente, reduzindo os riscos à saúde. O uso deste tipo de equipamento já é normatizado na especificação ASTM D8159-18.

Apesar dos métodos citados de extração e recuperação terem se consolidado internacionalmente, eles foram desenvolvidos e validados antes do surgimento e da popularização dos ligantes modificados por polímero. Por isso ainda existem dúvidas quanto ao efeito dos diferentes processos na recuperação destes materiais, como citam Wakefield et al. (2018). Um estudo realizado na Bélgica avaliou três ligantes asfálticos modificados por polímero SBS e três solventes: diclorometano, tricloroetileno e tolueno (NÖSLER; TANGHE; SOENEN, 2008). Os autores observaram que em alguns casos o ligante asfáltico perdeu elasticidade após a recuperação, e uma análise por cromatografia de permeação em gel mostrou mudanças no peso molecular dos materiais. Outro trabalho conduzido por Piérard, Vansteenkiste e Vanelstraete (2012), avaliou 19 ligantes modificados por SBS e EVA, e observou-se que o tipo de solvente e o método utilizado podem influenciar no resultado, em especial no caso dos ligantes com EVA. Por outro lado, Hugener e Pittet (2016) concluíram em seu trabalho que a simples dissolução do solvente seguida pela recuperação no evaporador rotativo não causou mudança significativa nas características dos ligantes testados (modificados por SBS e EVA). No entanto, as maiores alterações ocorreram quando consideradas a extração e recuperação após a usinagem das misturas.

Embora existam trabalhos disponíveis na literatura sobre o assunto, é evidente a necessidade de se analisar outros tipos de materiais além do SBS, como o asfaltoborracha e os bio-ligantes, produzidos a partir de fontes renováveis. Willem Vonk, pesquisador que possui ampla experiência no desenvolvimento e na aplicação de polímeros SBS para pavimentação pela empresa Kraton Polymers, afirmou em comunicação documentada como parte do projeto RECYPMA (NIELSEN, 2012) não ter observado anormalidades em ligantes com SBS quando submetidos aos processos de extração e recuperação, e disse não ser possível que qualquer solvente ou método de recuperação em especial possa alterar a estrutura molecular do polímero SBS. Segundo ele isso se dá pelo fato de o SBS não possuir grupos funcionais e não criar ligações fortes com a superfície dos agregados, além de ter compatibilidade elevada com o ligante asfáltico base. No entanto, segundo Vonk, outros tipos de polímero utilizados na pavimentação podem ser muito alterados pelos processos de extração e recuperação, citando, em especial, a borracha de pneu.

## 3 ATIVAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO PRESENTE NO RAP

Neste capítulo é apresentado o estudo de laboratório conduzido para investigar a aplicabilidade do método proposto por Pires (2018), com pequenas adaptações, que visa avaliar a ativação do ligante asfáltico presente nos materiais fresados, ou DoA (*degree of binder activity*). Foram selecionados 6 materiais fresados de diferentes origens para este estudo, os quais foram caracterizados e submetidos ao método laboratorial proposto. A seguir, é apresentada a caracterização dos materiais avaliados, seguida pela descrição da metodologia utilizada. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos e, por fim, é apresentada uma investigação acerca da presença de polímero nos materiais, para melhor compreensão dos resultados.

# 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foram utilizados 6 materiais fresados, ou RAPs, de diferentes localidades, todos provenientes de revestimentos asfálticos que se encontravam deteriorados e passaram por manutenção. A nomenclatura atribuída a cada um deles é apresentada na Tabela 1, assim como o nome da rodovia onde cada um deles foi coletado.

Material	Origem
RAP A	Rod. Fernão Dias (BR-381)
RAP B	Rod. Fernão Dias (BR-381)
RAP C	Rod. Dom Pedro I (SP-065)
RAP D	Rod. Raposo Tavares (SP-270)
RAP E	Rod. Anhanguera (SP-330)
RAP F	Rod. dos Bandeirantes (SP-348)

Tabela 1 - Materiais fresados analisados

Não foi possível obter informações detalhadas sobre as misturas asfálticas que deram origem a estes RAPs. A única exceção é o RAP B, que foi gerado a partir de um trecho experimental construído e apresentado no trabalho de Bessa (2017) para avaliação do efeito da camada de base sobre a vida de fadiga do revestimento asfáltico, e se deteriorou após 18 meses sob tráfego pesado. A camada de revestimento, que possuía 12 cm de espessura, era formada por um concreto asfáltico usinado a quente, com CAP convencional 30/45 e teor de projeto de 4,4% de ligante

(em relação à massa de mistura). Amostras do RAP B foram coletadas durante as obras de reconstrução deste trecho, imediatamente após a fresagem (Figura 5).

Figura 5 - (a) Fresadora utilizada na obtenção do RAP B e (b) pilha da qual foram coletadas as amostras do material



(b)

Fonte: Autor

Quanto aos RAPs E e F, sabe-se que foram obtidos a partir de pavimentos que continham na superfície uma camada de 3 cm de mistura asfáltica do tipo gap-graded com asfalto-borracha. Porém, nos dois casos, este material se misturou ao da camada subjacente durante a fresagem, que é um concreto asfáltico desconhecido. Os demais materiais, RAPs A, C e D, constituíam a camada de revestimento nos seus devidos pavimentos, mas não foi possível levantar informações sobre o tipo de material utilizado. Amostras dos fresados A, C, D, E e F foram coletadas a partir das pilhas em que estavam estocados antes de serem utilizados para outras aplicações.

As amostras coletadas foram levadas ao laboratório. onde foram homogeneizadas e reduzidas por quarteamento a amostras menores para caracterização, de acordo com o procedimento DNER-PRO 199/96. Os materiais foram também passados na peneira de abertura 19,1 mm, e todo o material retido foi removido. Amostras dos materiais foram submetidas aos processos de extração e recuperação do ligante asfáltico. Foi utilizado o método de extração por refluxo (ASTM D2172-11, método B), e o método de Abson para a recuperação dos ligantes (ASTM D1856-09). Estes foram caracterizados através do ensaio de penetração, conforme procedimento da norma ABNT NBR 6576/2007. A análise granulométrica dos materiais foi realizada antes e depois da extração do ligante asfáltico pelo forno de

ignição, seguindo a norma ASTM C136-14, utilizado também para determinar o teor de ligante asfáltico presente em cada material. Além disso, foi avaliada a densidade máxima teórica dos RAPs pelo método Rice (ASTM D2041-11), utilizando o material bruto, antes da extração do ligante asfáltico.

Os resultados da caracterização são apresentados na Tabela 2, e as curvas granulométricas obtidas são apresentadas na Figura 6. Os valores apresentados são uma média de duas amostras para cada ensaio.

Resultado	RAP	RAP	RAP	RAP	RAP	RAP
	А	В	С	D	E	F
Teor de ligante no RAP (%)	5,0	4,5	5,0	6,1	4,5	5,1
Densidade máxima teórica, RICE	2,577	2,554	2,663	2,619	2,530	2,479
Penetração do ligante recuperado (dmm)	5,0	14,0	7,0	19,5	22,5	36,0

Tabela 2 - Resultados da caracterização dos RAPs analisados

Figura 6 - Resultados da análise granulométrica antes e depois da queima do ligante asfáltico: (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F



![](_page_44_Figure_0.jpeg)

Fonte: Autor

A determinação da curva granulométrica representativa de cada material antes da extração do ligante é importante pois é a granulometria que será adotada para a preparação das amostras no presente estudo. A curva granulométrica após a extração do ligante, por sua vez, oferece um indicativo de como a granulometria irá variar à medida que o ligante asfáltico do RAP for ativado. Isso porque grande parte dos agregados presentes nos materiais fresados são na verdade grumos formados por ligante asfáltico e partículas menores de agregado, conforme ilustrado na Figura 7. Quando o material é aquecido, durante a reciclagem, os grumos se desfazem e a granulometria do RAP se altera. A granulometria obtida após a extração do ligante é aquela que o material assumiria numa situação de ativação total do ligante, ou *full blending*, e por isso ela costuma ser adotada na etapa de projeto de misturas asfálticas com RAP (COPELAND, 2011). No entanto, como foi descrito no item 2.4, na prática

apenas parte do ligante é geralmente ativado, por isso é provável que a curva granulométrica real fique em algum lugar entre as curvas obtidas antes e depois da extração do ligante (WELLNER et al., 2015).

Figura 7 - Possíveis composições dos grumos de agregado dentro do RAP

![](_page_45_Figure_2.jpeg)

Fonte: Tebaldi et al. (2012)

Os resultados da caracterização demonstram a importância desta etapa para o projeto adequado de misturas com alto teor de RAP, já que fatores como o teor de ligante, a penetração do ligante e a variação da granulometria podem variar consideravelmente entre os materiais que aparentam ser iguais. Nos RAPs B e D, por exemplo, a alteração da granulometria com a extração do ligante não é tão grande como nos demais, principalmente em relação à parcela mais fina dos agregados. Outro exemplo dessa variabilidade é a penetração do ligante recuperado. Enquanto no RAP A ela é de apenas 5,0 dmm, no RAP F este valor chegou a 36,0 dmm.

## 3.2 METODOLOGIA

O método laboratorial utilizado foi desenvolvido por Pires (2018), com pequenas adaptações no presente estudo, cujo objetivo era criar um procedimento simples para classificar diferentes RAPs de acordo com a facilidade ou dificuldade observada para ativar e mobilizar o ligante asfáltico oxidado presente neles, utilizando equipamentos de laboratório convencionais. O método descrito por Pires (2018) é uma variação da metodologia descrita por Tebaldi et al. (2018), e adota um procedimento definido a partir do estudo de Campher (2012). Outro objetivo foi eliminar a necessidade da extração e recuperação do ligante para caracterizar o RAP. A ideia é que se consiga utilizar o procedimento para estimar a quantidade de ligante asfáltico do RAP que pode ser considerada ativa, de acordo com a temperatura ao qual ele é submetido durante a usinagem. Conforme foi apresentado no capítulo anterior, as características de um RAP podem variar muito de acordo com a sua origem, e o grau

de ativação do ligante é uma das características que podem afetar consideravelmente o desempenho da mistura asfáltica reciclada final.

Para realizar esta classificação, o método busca analisar o efeito da temperatura, considerada como fator primário na ativação do ligante oxidado. Dessa forma, procura-se eliminar a influência de fatores como a umidade do RAP, o tempo de mistura e a aplicação de agentes rejuvenescedores, por exemplo. O procedimento consiste em submeter amostras 100% RAP ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, moldadas com o material condicionado em diferentes temperaturas. Assim, o ganho de resistência do material com o aumento da temperatura fornece um indicativo da quantidade de ligante asfáltico que foi ativada.

De forma detalhada, o procedimento para preparação das amostras consiste na execução das seguintes etapas:

- O RAP é colocado em estufa a 40°C por 48 horas para secagem;
- São preparadas amostras do material, a serem utilizadas para a compactação de corpos de prova Marshall, com aproximadamente 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura;
- Cada uma das amostras de RAP é condicionada em estufa por 4 horas na temperatura desejada, sendo recomendadas no mínimo 3 amostras para cada temperatura;
- Cada amostra é revolvida por 60 segundos em misturador mecânico ou à mão, mantendo-se a temperatura em que foram condicionadas;
- As amostras são compactadas utilizando compactador Marshall, com 50 golpes em cada face.

A temperatura de 40°C utilizada na etapa de secagem foi selecionada arbitrariamente nos primeiros experimentos de aplicação da metodologia, tendo em mente que temperaturas mais altas poderiam influenciar na ativação do ligante de forma prematura. Além disso, é importante que o processo de secagem seja o mesmo para todas as amostras testadas. No entanto, não foram feitos experimentos para determinar a temperatura ideal para esta etapa. Para o presente estudo, a granulometria das amostras foi controlada peneira a peneira, a fim de garantir que elas tivessem a mesma distribuição granulométrica obtida na caracterização de cada material (granulometria antes da remoção do ligante asfáltico), minimizando a variabilidade dos resultados. As temperaturas utilizadas foram 70°C, 100°C, 140°C, 170°C e 190°C, sendo moldadas 3 amostras por temperatura. Não é comum utilizar temperaturas acima de 170°C na usinagem de misturas asfálticas, porém se optou por incluir a temperatura de 190°C (esta não contemplada no estudo de Pires, 2018) para complementar a análise dos resultados. As amostras foram revolvidas manualmente por 60 segundos para homogeneização e espalhamento do ligante asfáltico ativado.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados seguindo a norma americana ASTM D6931-17, com aplicação de carregamento a 50 mm/min e temperatura de ensaio de 25°C. As amostras foram condicionadas por 24 h na temperatura de ensaio antes da execução.

Antes dos ensaios de resistência à tração foi determinado o volume de vazios dos corpos de prova. Para as amostras dos RAPs B, C, E e F, a densidade aparente foi determinada por meio de pesagem hidrostática (através do procedimento DNER ME 117/94). No entanto, acredita-se que os resultados sejam imprecisos por conta do volume de vazios muito elevado das amostras, acima de 7%. Nesses casos, a especificação utilizada exige a aplicação de uma camada de parafina para impermeabilizar a amostra, mas isso impediria que a mesma amostra fosse submetida ao ensaio de resistência à tração em seguida. Por esse motivo, o volume de vazios foi também calculado para todos os RAPs com base nas dimensões e na massa de cada amostra. O procedimento adotado, nesse caso, é o recomendado na norma ASTM D3203-17 para misturas abertas (com volume de vazios maior que 10%). Independentemente da metodologia utilizada para o cálculo da densidade aparente, os volumes de vazios foram calculados com base na densidade máxima teórica obtida na caracterização dos materiais (item 3.1).

A análise dos resultados foi realizada levando em conta o parâmetro resistência à tração (*RT*, em MPa), calculado de acordo com a Equação 1, onde  $P_{max}$  é a carga máxima aplicada durante o ensaio (em kN), *t* é a espessura da amostra (em mm), e *D* é o diâmetro da amostra (em mm). Foi considerada também a energia

dissipada nos ensaios, definida como a área sob a curva de carga versus deslocamento obtida. Foram analisadas a energia total dissipada no ensaio e a energia dissipada até o pico de carregamento. Os valores de energia dissipada foram divididos pela área da seção transversal de cada corpo de prova para que pudessem ser comparados entre si. Dessa forma, foram obtidos os parâmetros  $W_{f,pico}$  e  $W_{f,total}$ , expressos em J/m<sup>2</sup>, que representam a energia dissipada normalizada até o pico de carregamento e até o término do ensaio, respectivamente. O cálculo destes dois parâmetros está ilustrado na Figura 8.

$$RT = \frac{2000 \times P_{max}}{\pi \times t \times D} \tag{1}$$

![](_page_48_Figure_2.jpeg)

Figura 8 - Ilustração do cálculo dos parâmetros (a) W<sub>f,pico</sub> e (b) W<sub>f,total</sub>

Fonte: Autor

Para avaliação do grau de ativação do ligante asfáltico, Pires (2018) utiliza o parâmetro DOA<sub>%</sub>, calculado de acordo com a Equação 2, relacionando o valor de RT obtido em cada temperatura de ensaio  $(RT_{X^{\circ}C})$  com o valor obtido para a temperatura de 170°C ( $RT_{170°C}$ ). Dessa forma, o autor considera que a 170°C se alcança uma ativação de 100% do ligante asfáltico presente no RAP, já que a essa temperatura se alcançaria o valor máximo de RT.

$$DOA_{\%} = 100 \times \frac{RT_{X^{\circ}C}}{RT_{m\acute{a}x^{\circ}C}}$$
(2)

No entanto, os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que nem sempre a máxima resistência é atingida na temperatura de 170°C, principalmente devido à inclusão da temperatura de 190°C na matriz experimental. Tal fato também foi observado por Pinheiro (2017) e Teixeira (2017), que aplicaram procedimento semelhante para RAPs modificados por polímero e obtiveram o pico de resistência nas amostras condicionadas a 140°C, para estes materiais. Por esse motivo, o cálculo do parâmetro  $DOA_{\%}$  neste trabalho foi realizado de acordo com a Equação 3, na qual  $RT_{max}$  é o valor máximo de RT obtido para toda a faixa de temperaturas analisada. O parâmetro  $DOA_{\%}$  também foi calculado utilizando os valores de energia dissipada ao invés dos resultados de resistência à tração.

$$DOA_{\%} = 100 \times \frac{RT_{X^{\circ}C}}{RT_{max}}$$
(3)

# 3.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.3.1 Volume de vazios

A variação do volume de vazios de acordo com a temperatura de condicionamento, para cada um dos materiais analisados, pode ser observada na Figura 9. São apresentados os valores médios obtidos de três amostras para cada condição, e as barras de erro representam um desvio padrão para mais e para menos. Estão representados os resultados para os dois métodos de cálculo da densidade aparente utilizados: o método da pesagem hidrostática (segundo a norma DNER ME 117/94) e o método baseado nas dimensões das amostras (segundo a norma ASTM D3203-17, para misturas com mais de 10% de vazios). Para os RAPs A e D, que foram os primeiros a serem caracterizados, a análise por meio da pesagem hidrostática não foi realizada.

![](_page_50_Figure_0.jpeg)

Figura 9 - Volume de vazios das amostras de (a) RAP B, (b) RAP C e (c) RAP E

Em primeiro lugar, pode-se perceber que os resultados obtidos pelos dois métodos podem ser muito diferentes, principalmente nas amostras com maior índice

Fonte: Autor

de vazios. É provável que isso aconteça por conta de o método da pesagem hidrostática ser bastante preciso apenas para amostras com menos de 7% de vazios. No entanto, quando esse limite é ultrapassado a água escorre muito rapidamente quando o corpo de prova é retirado da condição submersa, e isso faz com que o volume de vazios seja subestimado. Por esse motivo, a norma exige que seja aplicada uma camada impermeabilizante de parafina, o que não seria possível neste estudo. Como a grande maioria das amostras analisadas apresentou volume de vazios acima do limite de 7%, é provável que os resultados obtidos por meio da norma ASTM D3203-17 sejam mais representativos.

Para todos os RAPs analisados os resultados mostraram, em linhas gerais, uma tendência de redução do volume de vazios com o aumento da temperatura de condicionamento. Isso mostra que os materiais foram compactados com maior facilidade conforme a temperatura aumentou, já que isso favoreceu a ativação do ligante asfáltico presente neles. O ligante asfáltico ativado, com viscosidade reduzida, lubrifica as partículas de agregado e preenche os vazios ao longo do processo de compactação, colaborando com a redução dos vazios.

Foi possível perceber, também, que a variação do volume de vazios com o aumento da temperatura de condicionamento pode ser maior ou menor, dependendo das características do material. No RAP F, por exemplo, as amostras condicionadas a 70°C apresentaram volume de vazios consideravelmente menor que as amostras dos outros RAPs. Nos RAPs A, B e C, este valor chegou próximo de 25%, enquanto no RAP F foi de apenas 12%, aproximadamente. Estabelecendo um paralelo com os resultados da caracterização dos materiais, nota-se que a penetração do ligante recuperado do RAP F foi a mais alta observada, o que possivelmente facilitou a compactação do material mesmo na temperatura de condicionamento mais baixa. Da mesma forma, o RAP F foi o que apresentou a menor redução dos vazios com o aumento da temperatura. No RAP C, por exemplo, os vazios caíram de 25%, a 70°C, para 10% a 190°C, uma redução de 15%. Já no RAP F essa redução foi de apenas 7%.

O comportamento que mais se destacou foi o do RAP D, cujo volume de vazios se reduz com o aumento da temperatura, mas somente até a temperatura de 140°C. A partir daí o volume de vazios se estabiliza e passa até a aumentar na temperatura de 190°C. Por algum motivo a temperatura muito elevada, ao invés de auxiliar na ativação do ligante e na compactação, teve efeito contrário, o que pode ter acontecido devido à oxidação excessiva ou à presença de algum modificador neste material, hipótese que será investigada mais adiante.

Em última análise, a avaliação do volume de vazios após a compactação das amostras é um passo importante e que já permite tirar informações sobre os materiais fresados estudados mesmo antes da realização dos ensaios de resistência à tração exigidos pelo método aqui estudado. A variação do índice de vazios também está relacionada com a facilidade ou dificuldade com que o ligante asfáltico presente no RAP é ativado, e pode ser um indicador relevante da forma com a qual esse mecanismo acontece.

### 3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 10, na Figura 11 e na Figura 12 são apresentados os resultados de RT,  $W_{f,pico}$  e  $W_{f,total}$  obtidos nos ensaios, para os seis RAPs nas temperaturas de condicionamento analisadas.

![](_page_53_Figure_0.jpeg)

Figura 10 - Resultados de *RT* obtidos para os materiais (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F

Fonte: Autor

![](_page_54_Figure_0.jpeg)

Figura 11 - Resultados de  $W_{f,pico}$  obtidos para os materiais (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F

Fonte: Autor

![](_page_55_Figure_0.jpeg)

Figura 12 - Resultados de  $W_{f,total}$  obtidos para os materiais (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F

Fonte: Autor

A tendência geral observada foi de aumento para os três parâmetros com o aumento da temperatura de condicionamento. O aumento do parâmetro *RT* significa que as amostras condicionadas em temperaturas mais elevadas se romperam com cargas máximas maiores. Já o aumento dos parâmetros de energia dissipada  $W_{f,pico}$ e  $W_{f,total}$  indica que além de a carga suportada ter sido maior, as amostras resistiram melhor à deformação e à ruptura ao longo de todo o ensaio. Conforme é discutido em Gaspar et al. (2014) e em Gaspar, Vasconcelos e Bernucci (2016), uma maior energia dissipada indica que a amostra consegue suportar o carregamento por mais tempo, e isso é possível graças às características viscoelásticas do ligante asfáltico. Assim, os três parâmetros citados podem ser indicadores do grau de ativação do ligante, já que representam o ganho de resistência com o aumento da temperatura.

Assim como na análise do volume de vazios, o comportamento do RAP D apresentou uma tendência diferente dos demais. Este material atingiu o pico de resistência já na temperatura de 140°C, e a partir desta temperatura sofreu uma queda de resistência. O parâmetro *RT* ainda permaneceu constante na temperatura de 170°C, mas caiu consideravelmente na de 190°C, mesma tendência observada no caso do volume de vazios. Porém, analisando os parâmetros  $W_{f,pico}$  e  $W_{f,total}$ , percebe-se uma queda bastante pronunciada já na temperatura de 170°C, que ainda se intensificou a 190°C. Para os três parâmetros, o RAP D foi o único caso em que o pico foi alcançado já na temperatura de 140°C. O mesmo comportamento foi observado por Pinheiro (2017) e Teixeira (2017) para dois materiais que continham ligante asfáltico modificado por polímero, sendo um RAP coletado de campo e um RAP produzido artificialmente em laboratório. Assim, é possível que o comportamento do RAP D tenha sido causado também pela presença de polímero.

Em alguns outros casos, o aumento de 170°C para 190°C também não resultou em ganho de resistência. Focando nos resultados de *RT*, isso foi observado para os RAPs B e E que parecem atingir um patamar quando atingem 170°C, ao passo que os RAPs A, C e F continuam ganhando resistência. Voltando a atenção para a energia dissipada, percebe-se uma maior probabilidade de que o material pare de ganhar resistência nas temperaturas mais elevadas, principalmente em relação ao parâmetro  $W_{f,total}$ . No caso do RAP B, por exemplo,  $W_{f,total}$  fica aproximadamente constante já a partir de 100°C, mostrando uma tendência de aumento muito discreta. Para os RAPs A, B, E e F, não há aumento de  $W_{f,total}$  a partir de 170°C, aumento esse que só acontece no caso do RAP C. Para o RAP D, por outro lado, o que se observou foi uma queda considerável nos valores obtidos.

Conforme foi citado anteriormente, temperaturas excessivamente elevadas podem resultar em outros efeitos além da ativação do ligante, como a sua oxidação. Além disso, a presença de componentes poliméricos pode também influenciar os resultados dos ensaios. No caso da oxidação, o consequente enrijecimento do ligante faz com que o material resista a picos de tensão mais elevados, porém ocorre também uma redução da resposta viscosa do material que pode afetar de forma diferente a resistência residual do mesmo, após o pico de carregamento, o que influencia na energia dissipada durante o ensaio. Dessa forma, as diferenças observadas entre os diferentes parâmetros podem ser relevantes para compreender até que ponto o ganho de resistência é consequência da ativação do ligante.

3.3.3 Cálculo do grau de ativação de ligante  $(DOA_{\%})$ 

A partir dos resultados obtidos foi calculado o parâmetro  $DOA_{\%}$ , com base em cada um dos parâmetros analisados: *RT*,  $W_{f,pico}$  e  $W_{f,total}$ . Os resultados são apresentados na Figura 13.

![](_page_58_Figure_0.jpeg)

Figura 13 - Resultados de  $DOA_{\%}$  obtidos para os materiais (a) RAP A, (b) RAP B, (c) RAP C, (d) RAP D, (e) RAP E e (f) RAP F

Fonte: Autor

É evidente que os resultados de  $DOA_{\%}$  acompanham o comportamento do parâmetro sobre os quais se basearam, ou seja, as mesmas considerações observadas para os resultados apresentados anteriormente são válidas na análise da DOA<sub>16</sub>. Porém, o objetivo deste parâmetro é representar a proporção de ligante que é ativado em cada temperatura de condicionamento, e para isso é fundamental que se identifique o ponto em que todo o ligante asfáltico presente foi ativado, no qual  $DOA_{\%} = 100$ ., servindo como referência para este cálculo. Pode-se observar a partir dos resultados obtidos que identificar corretamente este ponto com base apenas nos resultados de RT nem sempre é possível, já que para alguns materiais ele apresenta a tendência de a crescer indefinidamente com o aumento da temperatura. Já quando se observa os parâmetros de energia dissipada pode-se perceber que existe a tendência de alcançar um patamar, um valor máximo que não tende a crescer indefinidamente, e isso é observado nos RAPs A, B, E e F. Dessa forma, o uso da energia dissipada como base para o cálculo pode ser mais adequado, principalmente a energia total dissipada, que leva em conta o comportamento do material mesmo após a ruptura.

No caso do RAP D, apesar de não ser observada essa tendência de que a DOA<sub>16</sub> ficasse constante a partir de certa temperatura, para nenhum dos três parâmetros, houve a presença de um valor máximo que, após ser atingido, passou a diminuir. Para os parâmetros de energia dissipada, este pico ficou bastante evidente na temperatura de 140°C, mas para o parâmetro RT o pico se manteve entre 140°C e 170°C, apresentando queda apenas a 190°C. Observando os resultados a 170°C, percebe-se que o RT manteve seu valor máximo, mas os parâmetros de energia dissipada sofreram queda. Isso mostra que a carga máxima suportada foi a mesma, mas os corpos de prova não resistiram tão bem à aplicação de carga se for levada em conta toda a curva de tensão versus deformação do ensaio. Conforme foi afirmado anteriormente, isso pode ter acontecido devido a uma oxidação excessiva do ligante a partir de 140°C ou à presença de algum componente modificador no material. De qualquer forma, tal observação permite concluir que o RAP D possui propriedades diferentes dos demais, e essa identificação é um ponto positivo da metodologia utilizada. Ao se utilizar o RAP D em uma mistura reciclada a quente, por exemplo, os resultados observados mostram que pode ser necessário um cuidado maior com a temperatura, já que temperaturas acima de 140°C provavelmente prejudicariam o desempenho da mistura final obtida. No entanto, são necessários estudos mais aprofundados para confirmar essa hipótese.

Um último detalhe a ser observado é que nos resultados do RAP C nenhum dos parâmetros atinge um valor máximo que tende a permanecer constante ou a se reduzir em seguida, como foi observado nos demais materiais. Nesse caso, os três parâmetros alcançaram o pico na temperatura máxima, de 190°C, e tiveram uma tendência quase linear, sugerindo que eles aumentam indefinidamente com o aumento da temperatura. Isso indica que, possivelmente, o ligante presente neste RAP exige uma temperatura mais elevada para ser completamente ativado. Isso também pode ser consequência da existência de algum tipo de polímero modificador, por exemplo, ou de um tipo de ligante diferente dos demais.

Tendo em vista que os resultados dos RAPs C e D se diferenciaram dos demais, e tendo sido levantada a hipótese da presença de polímero nestes materiais, foi conduzido um estudo para investigar a presença de polímero nos materiais estudados.

# 3.4 INVESTIGAÇÃO DA PRESENÇA DE POLÍMERO NOS RAPS

Para averiguar a presença de polímero nos RAPs estudados, foram analisados os ligantes extraídos e recuperados dos materiais, os mesmos que foram submetidos ao ensaio de penetração no momento da caracterização dos materiais (item 3.1). Os ligantes foram avaliados por meio do ensaio MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery test*), utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), e por meio da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

#### 3.4.1 MSCR

O ensaio MSCR, descrito na norma ASTM D7405-15, é realizado através da aplicação de ciclos de fluência e recuperação sobre a amostra de ligante asfáltico. Cada ciclo envolve a aplicação de uma tensão constante de fluência pelo tempo de 1 s, após o qual a carga é removida, deixando com que o material se recupere por 9 s. São aplicados inicialmente 10 ciclos de condicionamento com tensão de 0,1 kPa. Em seguida mais 10 ciclos sob a mesma tensão de 0,1 kPa são aplicados, dessa vez

registrando os valores de deformação sofrida. Por fim, os últimos 10 ciclos são aplicados sob a tensão de 3,2 kPa. Ao término do ensaio, são obtidos os parâmetros  $J_{nr}$  (compliância não-recuperável) e  $R_{\%}$  (percentual de recuperação) para os dois níveis de tensão. Enquanto o  $J_{nr}$  indica a susceptibilidade do ligante asfáltico à deformação permanente sob cargas cíclicas, o parâmetro  $R_{\%}$  indica a capacidade de o ligante recuperar a deformação sofrida a cada ciclo (D'ANGELO et al., 2007; D'ANGELO; DONGRÉ, 2009).

Um dos motivos para o desenvolvimento do ensaio MSCR foi a necessidade de um ensaio de laboratório prático que conseguisse diferenciar melhor o comportamento de ligantes asfálticos modificados por polímero. Isso porque a especificação original utilizada pela metodologia Superpave para classificação de ligantes nos Estados Unidos levava em conta apenas as propriedades viscoelásticas lineares do material. No entanto, observou-se que os materiais modificados por polímero podem exibir comportamento não-linear mesmo para níveis de tensão mais baixos (D'ANGELO et al., 2007). Isso acontece porque os ligantes modificados são bifásicos, com a rede formada pelas cadeias de polímero suspensas em meio ao ligante asfáltico base (D'ANGELO et al., 2010). Assim, a vantagem do MSCR é que ele avalia o comportamento do material fora da zona viscoelástica linear, fornecendo um parâmetro que indica de forma mais precisa a resistência à deformação permanente tanto para materiais modificados quanto para os não-modificados, que é o  $J_{nr}$ .

No entanto, apesar de o  $J_{nr}$  ser um bom indicador da resistência à deformação permanente, ele não é capaz de indicar a presença de polímero no material. O parâmetro  $R_{\%}$ , por outro lado, consegue medir diretamente a resposta elástica do ligante, resposta esta que se relaciona com a presença e com as características do polímero no material. Tal fato é demonstrado em diversos trabalhos, como em D'Angelo et al. (2010), Mohseni e Azari (2014), Domingos e Faxina (2015a), Domingos e Faxina (2015b), Hossain et al. (2016) e Behnood e Olek (2017). Em todos estes trabalhos, observa-se para ligantes não modificados um percentual de recuperação muito próximo de zero, principalmente na tensão de 3,2 kPa e para temperaturas a partir de 64°C. Já para os ligantes que contém algum tipo de polímero,  $R_{\%}$  pode chegar até bem próximo de 100%.

Portanto, é possível que o percentual de recuperação dos ligantes obtidos a partir dos RAPs aqui estudados seja útil como indicador da presença de polímero e possa ajudar a justificar alguns dos resultados observados anteriormente. Dessa forma, foram moldadas amostras dos ligantes para análise no reômetro de cisalhamento dinâmico seguindo o procedimento da norma ASTM D7175-15. As amostras foram testadas de acordo com a norma ASTM D7405-14 na temperatura de 70°C. Foi utilizada geometria de placas paralelas, com 25 mm de diâmetro e distância entre placas de 1 mm. Os resultados são apresentados na Figura 14.

![](_page_62_Figure_1.jpeg)

![](_page_62_Figure_2.jpeg)

(a)

![](_page_63_Figure_0.jpeg)

Fonte: Autor

O principal parâmetro a ser observado é o percentual de recuperação sob a tensão de 3,2 kPa, e os resultados mostram que os RAPs C e D são os únicos a exibir alguma recuperação, com 12,6% e 8,6%, respectivamente. Mesmo sendo valores baixos de recuperação, estes são valores significativos já que os ensaios foram conduzidos numa temperatura relativamente alta e que em todos os outros materiais  $R_{\%}$  foi igual a zero. Soma-se ainda o fato de que o próprio processo de extração e recuperação pode ter reduzido a quantidade de modificador no ligante, conforme observado em estudos anteriores (NIELSEN, 2012; WAKEFIELD et al., 2018). Na tensão de 0,1 kPa é normal que se observe alguma recuperação causada pelo próprio comportamento viscoelástico do ligante asfáltico, já que as deformações são bem menores. Já na tensão de 3,2 kPa são esperados valores muito próximos de zero na ausência de modificadores. Portanto, os resultados dos ensaios MSCR fornecem fortes indícios da presença de polímero nos RAPs C e D, já que estes apresentaram  $R_{\%}$  diferente de zero e valores baixos de  $J_{nr}$ . É importante ressaltar que, no escopo deste trabalho, o MSCR não tem a função de classificação de ligantes asfálticos conforme ele é utilizado na metodologia Superpave, mas sim a de identificar a presença de algum modificador nos materiais.

#### 3.4.2 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

A espectroscopia no infravermelho é uma técnica de caracterização química usada para determinar a presença de grupos funcionais químicos em determinado meio. O procedimento é baseado na incidência de radiação infravermelha, que é parcialmente absorvida pelo material. Cada grupo funcional absorve um comprimento de onda já conhecido, de forma que é possível identificá-los a partir da análise do espectro gerado. Os ensaios foram realizados no modo de refletância total atenuada (ATR, do inglês *Attenuated Total Reflectance*), e foram obtidos os espectros na região de 2000 cm<sup>-1</sup> a 400 cm<sup>-1</sup>. Os espectros obtidos são apresentados na Figura 15.

![](_page_64_Figure_2.jpeg)

Figura 15 - Espectros obtidos nos ensaios de FTIR-ATR

Fonte: Autor

A fim de identificar a presença de componentes poliméricos nos RAPs, existem algumas bandas de especial interesse que não estão presentes nos ligantes asfálticos convencionais. A absorção em 698 cm<sup>-1</sup>, por exemplo, é característica da presença do anel aromático correspondente ao mero do estireno, enquanto a absorção em 966 cm<sup>-1</sup> é característica do butadieno, ambos presentes em polímeros como SBS e SBR (MASSON; PELLETIER; COLLINS, 2001; GHAVIBAZOO; ABDELRAHMAN; RAGAB, 2013; NIVITHA; PRASAD; KRISHNAN, 2016). Na Figura 16 são apresentados os espectros característicos dos polímeros poliestireno (PS), polibutadieno (PB) e SBS.

![](_page_65_Figure_0.jpeg)

Figura 16 - Espectros característicos dos polímeros polisestireno, polibutadieno e SBS

Fonte: Adaptado de Masson, Pelletier e Collins (2001)

Voltando a atenção para as bandas de 698 cm<sup>-1</sup> e 966 cm<sup>-1</sup>, citadas anteriormente, é possível perceber a presença de picos em somente alguns dos RAPs analisados, como se pode observar na Figura 17. Em ambas as bandas analisadas, percebem-se a existência de picos de absorbância somente no caso dos RAPs C e D, confirmando a presença de polímero que era suspeita nestes materiais. Apesar de os resultados confirmarem a presença dos grupos butadieno e estireno, ainda não se pode afirmar com exatidão qual o tipo de polímero em cada um dos RAPs. Isso porque os dois compostos estão presentes tanto no polímero SBS quanto no SBR, que costuma ser o principal componente da borracha de pneu.

![](_page_65_Figure_4.jpeg)

Figura 17 - Detalhe dos espectros nas bandas (a) 698 cm<sup>-1</sup> e (b) 966 cm<sup>-1</sup>

Fonte: Autor

Em ambas as bandas analisadas, percebem-se a existência de picos de absorbância somente no caso dos RAPs C e D, confirmando a presença de polímero que era suspeita nestes materiais. Apesar de os resultados confirmarem a presença dos grupos butadieno e estireno, ainda não se pode afirmar com exatidão qual o tipo de polímero em cada um dos RAPs. Isso porque os dois compostos estão presentes tanto no polímero SBS quanto no SBR, que costuma ser o principal componente sintético da borracha de pneu (NIVITHA; PRASAD; KRISHNAN, 2016).

É interessante notar que, no caso dos RAPs E e F, os materiais foram retirados de pavimentos que possuíam uma fina camada de *gap graded* com asfalto borracha. Porém, nenhum dos dois mostrou indícios significativos da presença de polímero na análise por meio do FTIR, o que pode ter acontecido devido à quantidade muito pequena do material em relação à mistura asfáltica subjacente, ou também ao fato de que muitos tipos de borracha são despolimerizadas, e por isso sua presença não pode ser capturada pelo FTIR.

Outra possibilidade que foi considerada é a presença do polímero de nome comercial Elvaloy, também muito utilizado na pavimentação. Segundo Bulatovic, Rek e Markovic (2014), no espectro infravermelho a presença de Elvaloy corresponde a picos perceptíveis nas bandas de 1732 cm<sup>-1</sup> e 1640 cm<sup>-1</sup>. Uma análise das duas bandas nos espectros obtidos mostra que o polímero não está presente em nenhum dos materiais estudados, conforme mostra a

Figura 18. Embora existam pequenos picos nas proximidades destas bandas, não estão presentes picos bem definidos que caracterizem a presença do Elvaloy.

![](_page_67_Figure_0.jpeg)

Figura 18 - Detalhe dos espectros nas bandas (a) 1732 cm<sup>-1</sup> e (b) 1640 cm<sup>-1</sup>

## 3.5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A metodologia proposta por Pires (2018) demonstra ser uma ferramenta simples e prática, porém muito útil para caracterizar materiais fresados de propriedades desconhecidas, no que diz respeito à ativação do ligante asfáltico. Para os materiais aqui avaliados, o método foi capaz de avaliar o efeito da temperatura sobre a ativação do ligante, permitindo identificar em quais deles o ligante é ativado mais facilmente, ou em quais deles são exigidas temperaturas mais elevadas. Tudo isso dispensando a necessidade de procedimentos mais trabalhosos como a extração e recuperação do ligante.
- A inclusão da temperatura de 190°C no protocolo da metodologia, bem como a consideração do maior valor de RT (ou demais parâmetros associados) no denominador, se mostraram adaptações importantes. Apesar de não ser comum que o material atinja essa temperatura nos processos de reciclagem a quente, a sua inclusão permitiu enxergar melhor a tendência de variação da resistência de acordo com a temperatura de condicionamento das amostras.

- Uma forma encontrada para aprofundar a análise dos resultados foi a análise da energia dissipada nos ensaios, que permitiu identificar padrões de comportamento diferentes da simples análise da resistência à tração. Além disso, a análise do volume de vazios das amostras também mostrou ser uma forma interessante de complementar os resultados.
- Ficou evidente, também, a possibilidade de se utilizar o método para identificar RAPs modificados por polímero. Justamente os dois materiais que apresentaram comportamento diferente dos demais (RAPs C e D) foram aqueles em que se identificou a presença de polímero por meio dos ensaios MSCR e da análise do espectro FTIR. No entanto, são necessários mais estudos para compreender por que em um deles (o RAP D) houve uma queda de resistência com o aumento da temperatura, enquanto no outro (RAP C) a tendência foi de que a resistência aumentasse indefinidamente. Tal diferença pode estar relacionada ao tipo de polímero, e seria interessante saber de que forma cada tipo de polímero afeta os resultados da metodologia utilizada e a ativação do ligante.

# 4 AVALIAÇÃO DO GRAU DE INTERAÇÃO ENTRE LIGANTES ATRAVÉS DO PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO POR ETAPAS

## 4.1 INTRODUÇÃO

Para melhor compreensão dos mecanismos da interação entre os ligantes presentes nas misturas asfálticas recicladas, uma técnica que vem sendo estudada e demonstra potencial é a extração e recuperação do ligante asfáltico realizada em etapas. O procedimento de extração por etapas tem sido adotado por diferentes grupos de pesquisa como uma forma de se analisar o grau com que o ligante asfáltico presente no RAP e o ligante asfáltico novo interagem entre si nos processos de reciclagem a quente e morna. Este processo, que se baseia na remoção de camadas sucessivas de ligante da mistura asfáltica reciclada e a subsequente recuperação do ligante asfáltico que recobre os agregados. Tal homogeneidade, por sua vez, indica se os dois ligantes presentes na mistura se misturaram adequadamente, o que é importante para assegurar um bom desempenho em campo, principalmente quando o teor de RAP é elevado. Uma ilustração da execução do processo em três etapas, como realizado neste trabalho, é apresentada na Figura 19.

![](_page_69_Figure_3.jpeg)

![](_page_69_Figure_4.jpeg)

Fonte: Autor

A técnica de extração por etapas foi utilizada inicialmente por Zearley (1979), que, após recobrir material fresado com ligante de penetração elevada, extraiu o ligante em três camadas, utilizando tricloroetileno, e viu que em nenhuma delas o ligante manteve as características originais, concluindo que os ligantes interagiram entre si de forma não homogênea. Outros trabalhos na década de 1980 utilizaram a mesma abordagem, porém verificando a interação entre o ligante presente no RAP e agentes rejuvenescedores adicionados (SOLEYMANI et al., 2000; BOWERS et al., 2014).

O processo de extração em etapas foi utilizado também por Huang et al. (2005), que concluiu que parte do ligante presente no RAP permanece preso aos agregados do RAP ao invés de se misturar aos materiais novos durante a usinagem. Outras pesquisas utilizaram a técnica e analisaram os ligantes recuperados utilizando diferentes ferramentas, que incluem cromatografia de permeação em gel, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier e espectroscopia por ultravioleta, além da análise da reologia dos ligantes (CARPENTER; WOLOSICK, 1980; NOURELDIN; WOOD, 1987; EDDHAHAK-OUNI et al., 2012; BOWERS et al., 2015). Os trabalhos citados consideraram a extração em etapas uma forma válida de se estudar a heterogeneidade existente no filme de ligante asfáltico que recobre os agregados. Se a heterogeneidade for alta, significa que o ligante envelhecido não foi completamente mobilizado, e por isso não se misturou bem com o ligante asfáltico novo. Por outro lado, se houver homogeneidade entre as camadas do filme asfáltico, pode-se concluir que os ligantes se misturaram bem durante a usinagem da mistura reciclada.

Apesar de este método ter sido utilizado em diversos estudos que consideraram a sua aplicação bem-sucedida, tanto o procedimento quanto os equipamentos utilizados em cada um deles são muito variáveis, o que dificulta a sua reprodutibilidade por aqueles interessados em aplicá-lo (CARPENTER; WOLOSICK, 1980; NOURELDIN; WOOD, 1987; HUANG et al., 2005; EDDHAHAK-OUNI et al., 2012; BOWERS et al., 2015; ZHAO; HUANG; SHU, 2015). Além disso, é um processo que ainda não foi totalmente explorado, existindo espaço para o uso de novos ensaios e novas abordagens na análise da homogeneidade entre as camadas de ligante. Tendo isso em mente, o estudo descrito neste capítulo buscou desenvolver um método de análise da interação entre ligantes, a partir dos processos de extração por etapas observados na literatura, que utilizasse equipamentos de laboratório padronizados e de uso rotineiro em laboratórios de pavimentação asfáltica, tornando sua aplicação mais prática e facilitando sua reprodução, além de permitir a execução do processo de maneira mais controlada. A partir disso, buscou-se aplicar este método a misturas asfálticas recicladas produzidas em usina e empregar diferentes ensaios e técnicas de análise na avaliação da homogeneidade entre as camadas de ligante, com o objetivo de identificar o parâmetro, ou ensaio, mais adequado para quantificar o grau de interação entre os ligantes.

## 4.2 MATERIAIS

Para o presente estudo, foram utilizadas amostras de três misturas asfálticas produzidas em usina para aplicação como camada de revestimento em trechos experimentais, sendo uma mistura asfáltica morna sem RAP (WMA 0% RAP, utilizada como mistura de controle), uma mistura morna com 25% de RAP (WMA 25% RAP) e uma mistura asfáltica usinada a quente com 60% de RAP e ligante modificado por polímero (PMA 60% RAP). Em nenhuma delas foi utilizado agente rejuvenescedor.

#### 4.2.1 Misturas asfálticas mornas WMA 0% RAP e WMA 25% RAP

As duas misturas mornas foram produzidas em usina gravimétrica a partir da combinação entre agregados de origem basáltica, ligante asfáltico convencional classificado por penetração como CAP 30/45 e um aditivo químico surfactante, dosado em 0,6% em massa de ligante asfáltico. Além disso, foi adicionada cal hidratada CH-1 como melhorador de adesividade. O mesmo projeto de dosagem e os mesmos materiais foram utilizados para ambas as misturas. Na mistura com RAP, 25% em massa de agregados foram substituídos por material fresado, que foi o mesmo utilizado no capítulo anterior sob o nome de "RAP C". Informações detalhadas sobre a caracterização deste material podem ser encontradas na seção 3.1.

Tais misturas foram produzidas para aplicação em campo como parte de um projeto de pesquisa que trouxe para o cenário nacional o uso da tecnologia de mistura morna como forma de permitir a produção de misturas asfáltica com teores mais altos de RAP (no caso, de 25%) em usinas gravimétricas sem a necessidade de grandes alterações no processo de usinagem e nos equipamentos disponíveis. Assim, a dosagem das misturas foi também resultado de um cuidadoso estudo laboratorial (LOPES et al., 2016).
O teor de ligante utilizado nas duas misturas foi de 4,7% em relação à massa total, e para a mistura WMA 25% RAP assumiu-se que todo o ligante presente no RAP fosse ativado e mobilizado. Dessa forma, foi adicionado 3,5% de CAP convencional 30/45 novo e o ligante contido no RAP (que possuía 5,0% de ligante) representou 1,2% da mistura. As características do CAP 30/45 utilizado são apresentadas na Tabela 3.

Parâmetro	CAP 30/45	Especificação brasileira (DNIT 095/2006)
Penetração (0,1 mm)	37	30-45
Ponto de amolecimento (°C)	53	mín. 52
Ponto de fulgor (°C)	350	mín. 235
Densidade a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1,008	-
Viscosidade Brookfield a 135°C (cP)	528	mín. 374
Viscosidade Brookfield a 150°C (cP)	248	mín. 203
Viscosidade Brookfield a 177°C (cP)	84	76-285

Tabela 3 - Características do ligante asfáltico virgem das misturas WMA 0% RAP e WMA 25% RAP

Na Figura 20 está representada a curva granulométrica de projeto para as misturas (que se enquadra na Faixa III DERSA), junto das curvas granulométricas do RAP antes e depois da extração do ligante asfáltico. No projeto da mistura WMA 25% RAP, foi utilizada a granulometria do RAP após a extração do ligante, e a composição dos agregados virgens foi ajustada para que a curva de projeto fosse obtida.



Figura 20 - Curva granulométrica de projeto das misturas WMA 0% RAP e WMA 25% RAP

Fonte: Autor

Para a produção da mistura com RAP foram necessárias algumas adaptações na usina gravimétrica, tais como a instalação do silo de material fresado, a instalação de elevador para a injeção do material fresado, a instalação de componentes elétricos e a adaptação do equipamento de peneiramento. O RAP foi introduzido no processo de usinagem à temperatura ambiente, sendo aquecido por contato direto com os agregados novos, que foram superaquecidos a 180°C. A temperatura de mistura foi de 140°C. Além disso, foi necessário o aumento do tempo de mistura de 20 para 60 segundos, para que a umidade presente no RAP, de cerca de 3%, fosse reduzida.

#### 4.2.2 Mistura asfáltica PMA 60% RAP

A mistura PMA 60% RAP utilizada é uma mistura asfáltica do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*), com tamanho máximo nominal de 8 mm, que foi produzida como parte de um projeto conduzido na Europa visando estabelecer um conjunto de instruções a serem seguidas para a produção rentável e de qualidade de misturas com alto teor de RAP (DI MINO et al., 2015; WELLNER et al., 2015). A mistura foi produzida em uma usina gravimétrica na Alemanha, equipada de tambor secador específico para aquecer o RAP antes deste ser misturado aos demais materiais, o que permite a adição de maiores quantidades de RAP, que no caso foi de 60% em relação à massa

total da mistura. Foram utilizados três frações de agregados, fíler calcário e ligante asfáltico modificado por polímero (classificado como PmB 25/55-55 A pela especificação europeia EN 14023), além de fibras de celulose. A usinagem foi conduzida a 170°C, e o teor de ligante de projeto foi de 7,0%, dos quais 4,08% foram de ligante asfáltico virgem.

O RAP passou por britagem antes de ser utilizado, visando reduzir o tamanho das suas partículas. O teor de ligante no RAP era de 4,8%, e a penetração deste ligante, obtido após extração e recuperação, foi de 21 dmm. Este material fresado foi originado de uma mistura asfáltica também do tipo SMA, portanto é provável que seu ligante asfáltico seja também modificado por algum tipo de polímero.

## 4.3 METODOLOGIA

#### 4.3.1 Procedimento de extração por etapas

O procedimento de extração por etapas utilizado foi desenvolvido a partir do método de extração por refluxo (método B da norma ASTM D2172-11). Foi utilizado o mesmo equipamento descrito na norma, porém com apenas um cesto metálico, conforme ilustrado na Figura 21. O solvente utilizado foi o tricloroetileno.

Na extração por etapas, o processo de extração é iniciado conforme o método padrão, mas é interrompido e retomado duas vezes antes da remoção completa do ligante. Em cada uma dessas interrupções, a solução de tricloroetileno e ligante asfáltico é coletada e substituída por solvente limpo. Dessa forma, o ligante que recobre os agregados é separado em três camadas, que são analisadas separadamente para avaliação da homogeneidade entre elas.



Figura 21 - Aparelho de extração por refluxo utilizado nos experimentos

A mistura asfáltica a ser analisada é destorroada e três amostras de 500 g são separadas em cones de papel filtro. Cada um deles é colocado dentro de um aparelho de extração por refluxo contendo aproximadamente 600 ml do solvente tricloroetileno. Os três aparelhos são então tampados, com água corrente passando pelo condensador, e posicionados sobre chapas de aquecimento, que são ligadas simultaneamente à temperatura aproximada de 250°C. Após um tempo de aproximadamente 10 a 15 minutos, durante os quais o sistema começa a se aquecer, é possível perceber o início da condensação do solvente evaporado, no momento em que gotas de solvente começam a se formar no condensador, caindo sobre a amostra de mistura asfáltica em seguida.

Optou-se pela utilização de três aparelhos de extração simultaneamente para que fosse possível obter, em cada uma das etapas, quantidade de ligante suficiente para a execução de diferentes ensaios reológicos e químicos. A execução das extrações de forma simultânea também permite observar a velocidade do fluxo de solvente em cada um dos aparelhos e ajustá-la, a partir da mudança da temperatura nas chapas, de forma que seja aproximadamente a mesma em cada um deles. Também pode ser necessário o controle dessa velocidade caso a solução comece a transbordar do cesto metálico e do cone de papel filtro, caso em que a temperatura deve ser reduzida. Neste estudo, procurou-se extrair aproximadamente a mesma proporção de ligante asfáltico em cada uma das etapas, uma vez que se observou em estudo preliminar que esse seria um fator relevante na análise (GASPAR et al., 2017). Porém, a quantidade de ligante asfáltico extraído em cada etapa é dependente da duração de cada uma delas, e observou-se que esta relação entre tempo e quantidade extraída pode variar consideravelmente dependendo da mistura asfáltica utilizada. Além disso, os primeiros experimentos mostraram que o ritmo com que a extração acontece é mais rápido na primeira etapa, e se reduz sucessivamente nas etapas seguintes.

Como não é possível acompanhar a quantidade de ligante extraído em tempo real, a obtenção de quantidades aproximadamente iguais em cada etapa se deu por tentativa e erro. A primeira amostra de cada uma das misturas foi submetida a tempos de extração arbitrários, e se observou a quantidade obtida em cada etapa ao final do processo. Assim, a cada amostra os tempos de extração foram ajustados com o intuito de equilibrar a quantidade de ligante obtida em cada etapa. Após algumas tentativas foram definidos os tempos adequados para as etapas de cada mistura, que são apresentados na Tabela 4.

Mistura	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
WMA 0% RAP	5 min	10 min	até a extração completa
WMA 25% RAP	10 min	20 min	até a extração completa
PMA 60% RAP	20 min	20 min	até a extração completa

Tabela 4 - Tempos de duração estabelecidos para cada etapa do processo

As soluções de ligante asfáltico obtidas ao final das três etapas são centrifugadas para remoção do material fino e os ligantes são recuperados pelo método de Abson (ASTM D1856-09), sendo em seguida caracterizados por meio de diferentes ensaios laboratoriais para avaliação da homogeneidade.

Com os tempos de extração fixados para cada etapa, foram submetidas ao processo de extração por etapas duas amostras de WMA 0% RAP, duas amostras de WMA 25% RAP e apenas uma de PMA 60% RAP. As réplicas para as duas primeiras foram feitas para a análise da repetibilidade do processo, porém a limitação na quantidade de material disponível da mistura PMA 60% RAP impediu que fosse feita uma réplica para ela.

Em primeiro lugar, foram determinadas as proporções de ligante recuperado em cada uma das etapas. O ideal seria que fossem obtidas as mesmas quantidades em cada etapa, ou seja, 33% do ligante em cada. No entanto, o controle da quantidade a partir dos tempos de extração precisa ser feito por tentativa e erro, e para minimizar o número de tentativas necessárias e evitar o gasto excessivo de tempo e de material, decidiu-se que seria aceitável que cada etapa tivesse no mínimo 20% e no máximo 50% do total recuperado. Assim, para as amostras testadas, as proporções obtidas em cada etapa são apresentadas na Figura 22.







Nota-se que foi possível manter a quantidade de ligante relativamente equilibrada em cada etapa. Somente para a mistura PMA 60% RAP aconteceu de a quantidade obtida na segunda etapa ter ficado relativamente alta, com 48%, e talvez fosse necessária mais uma tentativa de ajuste dos tempos para essa mistura. Pode-se perceber também que a repetição do processo com os mesmos tempos para cada etapa consegue obter quantidades de ligante bem próximas, como para WMA 0% RAP, onde a variabilidade entre as duas amostras foi pequena.

Ao término dos processos de extração por etapas e a recuperação dos ligantes, as amostras foram avaliadas por meio dos ensaios reológicos.

#### 4.3.2 Ensaios reológicos

Os ligantes obtidos no processo de extração por etapas foram caracterizados a partir de suas propriedades reológicas. A reologia é a ciência que estuda as deformações e o fluxo da matéria, principalmente em relação ao efeito da temperatura e do tempo de carregamento. Os ligantes asfálticos são materiais viscoelastoplásticos que apresentam uma variação muito significativa no seu comportamento com a mudança de temperatura e com a mudança no tempo de carregamento. Por exemplo, em locais muito frios é comum que os pavimentos asfálticos apresentem trincas mesmo sem serem solicitados por veículos pesados, enquanto nos locais mais quentes o defeito mais comum é a deformação plástica da camada asfáltica. Por esse motivo, a reologia é muito útil na investigação das propriedades dos materiais asfálticos, e existem diversos métodos de análise para caracterizar não somente as propriedades viscoelásticas, mas também suas propriedades de dano.

Neste trabalho, as amostras de ligante asfáltico foram caracterizadas utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico modelo Discovery HR-3, da empresa TA Instruments. Os materiais foram submetidos ao ensaio oscilatório de varredura de frequência e temperatura, do qual se obtêm as propriedades viscoelásticas lineares  $|G^*|$  (módulo de cisalhamento dinâmico) e  $\delta$  (ângulo de fase), usados na construção das curvas mestras e dos diagramas de Espaço *Black*, além do cálculo do parâmetro *Glover-Rowe*. Além disso, foram executados o ensaio MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery Test*) e o ensaio LAS (*Linear Amplitude Sweep*). Para cada um destes ensaios, foram preparadas e avaliadas duas amostras de material, preparadas seguindo as recomendações da norma ASTM D7175-15.

## 4.3.2.1. Curvas mestras de $|G^*| \in \delta$

As curvas mestras de  $|G^*|$  e de  $\delta$  são ferramentas usadas para investigar as propriedades reológicas dos materiais viscoelásticos. Elas permitem observar a variação destes dois parâmetros para um espectro bastante amplo de temperaturas e frequências de carregamento. No caso específico dos materiais asfálticos, as curvas mestras costumam cobrir toda a faixa de temperaturas e de frequências às quais o material está sujeito durante a sua vida de serviço em campo.

Os dois parâmetros foram obtidos por meio do ensaio oscilatório com deformação controlada de 0,1%. Este nível de deformação se mostrou dentro da faixa viscoelástica linear para todos os materiais, nas temperaturas e frequências analisadas. Os ensaios foram conduzidos na faixa de frequência de 0,1 a 10 Hz e nas temperaturas de 5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C e 80°C. Para as temperaturas abaixo de 40°C foi utilizada geometria de placas paralelas com diâmetro de 8 mm e espaçamento entre placas de 2 mm. Já para as temperaturas mais altas, acima de 40°C, foi utilizada geometria de placas paralelas com 25 mm de diâmetro e espaçamento entre placas de 1 mm.

As curvas mestras foram geradas considerando o princípio da superposição tempo-temperatura, sendo feito o deslocamento horizontal das curvas para a

temperatura de referência de 15°C. Segundo este princípio, as baixas frequências de carregamento representam também o comportamento do material nas temperaturas mais altas, da mesma forma que as altas frequências estão associadas às temperaturas baixas. Dessa forma, as curvas trazem uma visão completa do comportamento do material, tanto em relação ao tempo de carregamento como para a temperatura.

## 4.3.2.2. Diagramas de Espaço Black

Além de serem usados para a construção das curvas mestras, os dados de  $|G^*|$ e de  $\delta$  podem ser plotados um em relação ao outro, em escala logarítmica, gerando o diagrama conhecido como Espaço *Black*.

O diagrama de Espaço *Black*, conhecido também como *black space*, explora a relação entre as duas propriedades viscoelásticas lineares, e é muito utilizado para detectar inconsistências nos resultados dos ensaios. Alguns comportamentos atípicos decorrentes de erros durante os ensaios podem acabar sendo mascarados durantre a construção da curva mestra, mas podem ser detectados com facilidade no diagrama de Espaço *Black*. Isso porque para materiais com comportamento viscoelástico linear e termorreologicamente simples a curva formada no diagrama é suave, sem irregularidades. Quando existe alguma inconsistência, costumam ser visíveis linhas desconexas no diagrama, ou pontos fora da curva (MARASTEANU; ANDERSON, 2001; AIREY, 2002).

O diagrama tem sido utilizado também para detectar mudanças reológicas que acontecem nos ligantes asfálticos devido à oxidação. Durante o envelhecimento do material, a tendência é que o material fique mais rígido (maior  $|G^*|$ ), e mais elástico (menor  $\delta$ ), de forma que a curva do diagrama se desloca para a esquerda e para cima (KING et al., 2012; MOGAWER et al., 2017). A grande vantagem é que o Espaço *Black* elimina a influência das manipulações matemáticas que são necessárias quando a superposição tempo-temperatura é aplicada, permitindo ver as mudanças reológicas com mais clareza (KING et al., 2012)

## 4.3.2.3. Parâmetro Glover-Rowe (GR)

O parâmetro *Glover-Rowe* (*GR*) é calculado a partir dos dados de  $|G^*|$  e de  $\delta$  na frequência de 0,005 rad/s e na temperatura de 15°C. *GR* é calculado a partir da Equação 4.

$$GR = |G^*| \frac{(\cos \delta)^2}{\sin \delta}$$
(3)

O parâmetro foi desenvolvido com base no parâmetro de fadiga criado por Glover, que obteve uma boa correlação com o trincamento induzido por envelhecimento nos pavimentos monitorados (GLOVER et al., 2005). *GR* também apresenta uma boa correlação com este defeito, mas é calculado de forma bastante simples a partir dos dados plotados no Espaço *Black*. De fato, o parâmetro é utilizado também como um indicador objetivo para monitorar a movimentação do diagrama de Espaço *Black* conforme o material asfáltico sofre envelhecimento (ROWE; KING; ANDERSON, 2014).

Neste trabalho, *GR* é aplicado da mesma forma, na tentativa de verificar a mudança de comportamento causada pela presença de diferentes quantidades de ligante oxidado oriundo do RAP, e assim oferecer um indicativo sobre a homogeneidade entre as camadas de ligante extraídas das misturas.

#### 4.3.2.4. Ensaio MSCR

Uma descrição detalhada do ensaio MSCR é apresentada no item 3.4.1. No estudo referente ao presente capítulo, todos os ensaios foram conduzidos à temperatura de 70°C.

É importante ressaltar que, apesar de o MSCR ser um ensaio utilizado na classificação de ligantes asfálticos no sistema americano *Performance Grade*, no que diz respeito à susceptibilidade do material ao problema da deformação permanente, neste estudo ele não possui essa mesma função. Aqui o MSCR é aplicado como uma forma de avaliar o comportamento dos ligantes asfálticos fora da zona viscoelástica linear, em temperaturas altas, e a partir disso permitir uma avaliação da homogeneidade entre os ligantes obtidos em cada etapa do processo de extração analisado.

#### 4.3.2.5. Ensaio LAS

O ensaio LAS, ou ensaio de Varredura Linear de Amplitude de Deformação (*Linear Amplitude Sweep*), tem sido muito estudado recentemente, e se discute o seu uso como critério para a resistência à fadiga de ligantes asfálticos na especificação americana Superpave. O ensaio é realizado no DSR, com geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro e espaçamento entre placas de 2 mm, e acontece em duas etapas. Na primeira é feita uma varredura de frequência entre 1 e 30 Hz, com amplitude de deformação de 0,1%, de forma a obter as propriedades reológicas do material na condição inicial, antes da aplicação de dano. A segunda etapa consiste na aplicação de carregamento também oscilatório, mas com uma varredura linear de amplitude de deformação, que vai de 1% até 30%, com frequência constante de 10 Hz (HINTZ; BAHIA, 2013; MARTINS, 2014). O procedimento encontra-se descrito de forma detalhada na norma AASHTO TP 101-14.

Os dados coletados na execução do procedimento citado são analisados através da aplicação do princípio do Dano Contínuo Viscoelástico (VECD, *Viscoelastic Continuum Damage*). O princípio VECD analisa a taxa de propagação do dano no material em relação a variação de energia, ou trabalho realizado. É utilizado um conjunto de equações matemáticas para obter a curva característica de dano, que relaciona os parâmetros *C* (o parâmetro de integridade do material) e *S* (dano acumulado (MARTINS, 2014). Os dados obtidos são ainda manipulados para a obtenção da curva de fadiga, que apresenta informações sobre o comportamento do material em relação à fadiga para uma ampla faixa de deformações e ciclos de carregamento (HINTZ, 2012). A curva de fadiga apresenta, em escala logarítmica, a relação entre o número de ciclos ( $N_r$ ) e a deformação.

Neste trabalho, os ensaios LAS foram conduzidos a 20°C. Assim como no caso do ensaio MSCR, o LAS não foi aplicado como forma de tentar prever o desempenho em campo dos materiais e nem classifica-los em relação ao dano por fadiga, mas sim como forma de comparar o comportamento, fora da faixa viscoelástica linear, dos ligantes obtidos nas diferentes etapas do processo de extração analisado, e assim avaliar a homogeneidade entre eles.

# 4.4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 4.4.1 Curvas mestras de $|G^*| \in \delta$

A partir dos resultados obtidos na varredura de frequência e temperatura, foram construídas as curvas mestras das propriedades viscoelásticas  $|G^*|$  e  $\delta$ , na temperatura de referência de 15°C. As curvas são apresentadas na Figura 23 e na Figura 24.

A ideia da análise das curvas mestras é identificar visualmente uma possível heterogeneidade entre os ligantes obtidos em cada etapa. Assim, espera-se que quanto melhor a interação entre o ligante virgem e o ligante presente no RAP, mais próximas as curvas fiquem umas das outras. Da mesma forma, é esperado que as curvas fiquem mais espaçadas no caso de uma interação incompleta. Numa mistura com RAP onde os ligantes não interagiram completamente, a camada mais externa do ligante deverá conter menor quantidade de ligante oriundo do RAP, sendo, portanto menos rígida, enquanto a camada mais interna deverá ser mais rígida, já que contém maior parte de ligante do RAP.

Seguindo esse raciocínio, para uma mistura sem RAP seria esperado que os ligantes obtidos nas três etapas fossem muito similares, já que constituem o mesmo material: o ligante virgem. No entanto, observamos que já existe uma pequena separação entre as curvas obtidas para as amostras da mistura WMA 0% RAP. Isso mostra que, mesmo em uma mistura sem RAP, o filme de ligante asfáltico não é perfeitamente homogêneo, com a camada mais interna de ligante (Etapa 3) se mostrando mais rígida que a camada mais externa (Etapa 1).

A hipótese levantada para esse caso seria uma oxidação adicional da camada mais interna de ligante no momento do contato com os agregados durante a mistura. Além disso, é possível que na última etapa da extração estejam presentes as frações de ligante que haviam sido absorvidas pelos agregados. Sabe-se que os agregados tendem a absorver as frações mais polares do ligante, que são também as mais rígidas (LEE et al., 1990). Independente do motivo, observa-se que uma pequena heterogeneidade pode existir independente da condição da interação entre ligantes.



Figura 23 - Curvas mestras de  $|G^*|$ , na temperatura de referência de 15°C, dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP



Figura 24 - Curvas mestras de δ, na temperatura de referência de 15°C, dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP

Observando as curvas mestras obtidas para as misturas com RAP (WMA 25% RAP e PMA 60% RAP), percebe-se uma tendência de maior diferenciação entre as camadas de ligante, do que foi observado na mistura sem RAP. Ao longo do processo de extração, o ligante se torna mais rígido e a curva mestra fica mais achatada. A mudança no formato da curva acontece porque materiais mais oxidados apresentam uma transição mais gradual entre o comportamento elástico e o escoamento, ou seja, são menos afetados pela variação na frequência de carregamento (MOGAWER et al., 2017). Graças a essa mudança no formato da curva mestra, a diferença entre as curvas se mostra mais perceptível para as baixas frequências, que equivalem às altas temperaturas.

Apesar de a maior separação entre as curvas mestra ser perceptível (principalmente para a mistura WMA 60% RAP), a análise visual não é muito precisa, principalmente porque as curvas são plotadas em escala logarítmica. Para conseguir diferenciar melhor as propriedades viscoelásticas lineares dos ligantes de cada etapa, e quantificar essa diferença, foi feita uma análise do valor percentual da relação entre os parâmetros  $|G^*|$  e  $\delta$  nas Etapas 2 e 3 e valores obtidos para o ligante da Etapa 1, para diferentes frequências. Os resultados são apresentados na Figura 25. Como foram ensaiadas duas amostras de cada ligante, foi calculada a média dos resultados para a Etapa 1, e em relação a ela foram calculados os valores percentuais das Etapas 2 e 3.

A análise do valor relativo entre os resultados permite observar a heterogeneidade de forma mais clara, e foi possível perceber que a heterogeneidade observada na mistura WMA 25% RAP foi apenas ligeiramente maior que a observada na mistura WMA 0% RAP, tanto para  $|G^*|$  como para  $\delta$ . Porém, mesmo essa diferença sendo pequena, foi possível perceber o efeito da presença de RAP. Já na mistura PMA 60% RAP, esse efeito foi muito mais pronunciado, o que é coerente já que, devido ao elevado teor de RAP, a probabilidade de que a interação entre ligantes seja incompleta nessa mistura é muito maior.



Figura 25 - Valor relativo de |G\*| dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP amostra 2 e (e) PMA 60% RAP



Figura 26 - Valor relativo de δ dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP amostra 2 e (e) PMA 60% RAP

Fonte: Autor

A análise comprovou também a impressão causada na análise das curvas mestras de que, para  $|G^*|$ , a heterogeneidade é mais pronunciada nas frequências

mais baixas, que equivalem às temperaturas mais altas. De fato, nas frequências mais elevadas a diferença de rigidez entre os ligantes foi muito pequena. O ângulo de fase também é afetado, mas em proporções menores, e parece ser mais afetado nas frequências mais altas, embora a variação seja pequena.

Percebe-se também que o comportamento do ligante obtido na Etapa 2 não é muito bem definido. Para WMA 0% RAP, na amostra 1 ele ficou muito próximo do ligante da Etapa 1, e na amostra 2 ficou muito próximo do ligante da Etapa 3. Já nas misturas com RAP, o ligante da Etapa 2 pareceu assumir uma posição intermediária, o que pode indicar que nessas misturas a mescla entre os ligantes ocorre de forma mais gradual. No entanto, devido a esta variabilidade, a forma mais adequada para a análise da heterogeneidade parece ser a comparação entre Etapa 1 e Etapa 3.

#### 4.4.2 Diagramas de Espaço Black

Os mesmos dados utilizados na construção das curvas mestras foram plotados para gerar os diagramas de espaço *Black*. Os diagramas obtidos são apresentados na Figura 27.

As curvas obtidas para a mistura WMA 0% RAP, nas Etapas 1, 2 e 3, são muito próximas e é difícil perceber uma separação entre elas. Diferente do que aconteceu nas curvas mestras de  $|G^*|$  e  $\delta$ , no Espaço *Black* não foi possível perceber a heterogeneidade para a mistura sem RAP. Já para as outras misturas essa separação é visível, mas é difícil avaliar se a separação é mais pronunciada para WMA 60% RAP, como aconteceu no caso das curvas mestras. A heterogeneidade causada pela presença de RAP é visível nos diagramas de Espaço *Black*, mas assim como nas curvas mestras é difícil quantificá-la.



Figura 27 - Diagramas de Espaço *Black* dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP

#### 4.4.3 Parâmetro *Glover-Rowe* (*GR*)

Os resultados obtidos no cálculo do parâmetro *GR* são apresentados na Figura 28. Neles, é possível observar com maior facilidade a diferença entre as misturas. Para WMA 0% RAP, os valores de *GR* são relativamente baixos nas três etapas, o que se dá pelo fato de não haver ligante oxidado nessa mistura. Por outro lado, os valores obtidos para PMA 60% RAP são consideravelmente altos, principalmente para a Etapa 3. Os valores mais elevados podem ser resultado do tipo de ligante virgem diferente nesta mistura, mas muito provavelmente têm relação com o elevado teor de RAP utilizado.

Comparando os resultados das três etapas em cada amostra, os valores de *GR* parecem confirmar a tendência observada anteriormente nas curvas mestras, com WMA 0% RAP mais homogênea, WMA 25% RAP com uma relativa heterogeneidade e WMA 60% RAP mais heterogênea. Nota-se que a heterogeneidade é observada principalmente quando se compara Etapa 1 e Etapa 3, pois a Etapa 2 parece assumir posições variáveis em cada amostra.

Para uma análise mais detalhada como a que foi realizada anteriormente com as curvas mestras, foram calculados os valores percentuais de *GR* nas Etapas 2 e 3, em relação aos resultados da Etapa 1. Isso permite verificar de forma mais clara a magnitude da diferença entre as etapas, já que o fato de os valores serem mais baixos para uma das amostras pode afetar a percepção. Os resultados são apresentados na Figura 29.

Os resultados mostram que percentualmente a diferença entre Etapa 1 e Etapa 3 não variou tanto entre as misturas. Levando em conta a variabilidade das amostras, pode-se dizer que não há efeito significativo da quantidade de RAP, mesmo que este efeito tenha sido observado nas análises anteriores. Para o parâmetro *GR*, a análise da variação percentual parece não ser uma boa opção para o estudo da homogeneidade entre as etapas.



Figura 28 - Resultados do parâmetro Glover-Rowe para ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP







## 4.4.4 Ensaio MSCR

Os resultados de  $J_{nr}$  obtidos nos ensaios MSCR, executados na temperatura de 70°C, são apresentados na Figura 30.

É possível observar que nas misturas com RAP parece haver uma redução gradual de  $J_{nr}$  ao longo das etapas de extração. Tanto nas duas amostras de WMA 25% RAP como para a amostra de PMA 60% RAP se percebe uma tendência muito bem definida, o que não acontece nas amostras da mistura WMA 0% RAP.

Isso também condiz com a hipótese de que, quanto mais interna a camada de ligante, maior quantidade de material proveniente do RAP (devido à interação incompleta entre os ligantes), e menor o valor de  $J_{nr}$ . Assim, nota-se que a presença de RAP varia gradualmente nas três etapas, nas misturas com RAP.

Além disso, a redução de  $J_{nr}$  da Etapa 3 em relação à Etapa 1 aparenta ser maior à medida que o teor de RAP aumenta na mistura. Para confirmar este fato, foi feita uma análise da variação percentual do parâmetro, que é apresentada na Figura 31.

Figura 30 - Resultados de J<sub>nr</sub> para os ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP amostra 2 e (e) PMA 60% RAP





Figura 31 - Valor relativo de  $J_{nr}$  para os ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP





Os resultados mostram que, de fato, a diferença entre os resultados de  $J_{nr}$  da Etapa 1 e da Etapa 3 foi maior para a mistura PMA 60% RAP, e a menor para mistura WMA 0% RAP. Na mistura sem RAP, o MSCR também capturou uma heterogeneidade que não está relacionada à presença de RAP. Porém os resultados confirmam que a heterogeneidade tende a aumentar quando o teor de RAP aumenta, o que pode indicar a ocorrência da interação parcial entre ligantes.

Outro parâmetro que resulta do ensaio MSCR é o percentual de recuperação  $(R_{\%})$ . Para as misturas WMA 0% RAP e WMA 25% RAP, em todas as amostras este parâmetro foi igual a zero. Somente na mistura PMA 60% RAP foi possível analisar este parâmetro. Os resultados são apresentados na Figura 24. Nota-se que os resultados de  $R_{\%}$  seguiram aproximadamente a mesma tendência dos demais resultados, com uma variação gradual.

Figura 32 - Resultados de R<sub>%</sub> dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP amostra 2 e (e) PMA 60% RAP



Fonte: Autor

#### 4.4.5 Ensaio LAS

As curvas características de dano obtidas para as diferentes amostras de ligante são apresentadas na Figura 33, onde C é a integridade do material e S é o dano acumulado.

Mais uma vez se observa uma tendência geral de que a diferença entre as curvas de cada etapa aumente conforme o teor de RAP aumenta. No entanto, estão presentes algumas situações que parecem ir contra essa tendência. Por exemplo, para a mistura WMA 0% RAP, na amostra 1 as curvas são bem parecidas para as três etapas, mas na amostra 2 o ligante da Etapa 1 mantém a integridade com um dano acumulado consideravelmente maior que as outras. No caso da mistura PMA 60% RAP se observa que a Etapa 2 rompeu com um dano acumulado maior que as outras, enquanto para todos os outros ensaios a Etapa 2 mostrou comportamento intermediário entre Etapa 1 e Etapa 3. É possível que estes casos sejam resultado da maior variabilidade obtida do ensaio LAS. Na Figura 34 são apresentadas as curvas de fadiga, resultado final do ensaio LAS. Nelas se observa a mesma tendência das curvas características de dano, mesmo porque elas são produzidas com os mesmos dados.



Figura 33 - Curvas características de dano dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP - amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP - amostra 2 e (e) PMA 60% RAP

Fonte: Autor



Figura 34 - Curvas de fadiga dos ligantes obtidos em cada etapa nas misturas (a) WMA 0% RAP amostra 1, (b) WMA 0% RAP - amostra 2, (c) WMA 25% RAP - amostra 1, (d) WMA 25% RAP amostra 2 e (e) PMA 60% RAP

Fonte: Autor

As curvas mostram o comportamento dos ligantes no que diz respeito à fadiga para diferentes níveis de deformação, e é possível perceber que a principal diferenciação entre as curvas das três etapas do processo se dá pela sua inclinação. Mesmo com as observações feitas sobre o possível efeito da variabilidade do ensaio, se consegue perceber a maior diferenciação na mistura PMA 60% RAP, mesmo sem considerar o ligante da Etapa 2.

Apesar disso, os resultados do LAS não apresentaram tendência bem definida como a que foi observada nos ensaios de MSCR e na análise das curvas mestras de  $|G^*| \in \delta$ . Talvez isso aconteça porque o LAS avalia os ligantes numa temperatura intermediária, na qual a diferença de comportamento entre os ligantes é menos evidente. Na análise das curvas mestras se observou que a variação da rigidez se intensifica nas temperaturas mais altas, e a variação do ângulo de fase se intensifica nas temperaturas mais baixas. É possível que a temperatura considerada no LAS não seja a mais adequada para a diferenciação dos ligantes justamente por ser intermediária, e nela as diferenças sejam menos evidentes, embora existam.

## 4.5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da metodologia de extração por etapas mostrou que foi possível aproveitar os equipamentos que são tradicionalmente utilizados na extração e recuperação de ligantes para fazer o processo por etapas e avaliar o grau de interação entre ligantes nas misturas. Isso é importante pois torna o método mais fácil de ser padronizado e também mais acessível. A partir da configuração utilizada, o método foi capaz de identificar diferentes níveis de interação entre ligantes para as diferentes misturas analisadas, sempre a partir da heterogeneidade entre as camadas de ligante. Os resultados são condizentes com o que se espera para as misturas analisadas, isto é, uma menor interação entre ligantes para as misturas com maior teor de RAP.

Ficaram evidentes algumas dificuldades na execução do método de extração por etapas, principalmente na definição dos tempos de extração para cada etapa, que pode consumir muito tempo e material. Outra dificuldade é saber a partir de que ponto a heterogeneidade entre os ligantes de cada etapa é resultado da interação incompleta entre ligantes, pois se observou uma certa heterogeneidade mesmo na mistura WMA 0% RAP, na qual se supõe que o ligante é totalmente homogêneo. Por esse motivo, é importante que se conheça melhor a sensibilidade do método e dos parâmetros utilizados.

Em relação aos parâmetros utilizados na avaliação da heterogeneidade, a análise das curvas mestras (por meio dos valores percentuais em relação aos da primeira etapa) e do ensaio MSCR parecem ser as que melhor caracterizam a diferença entre as camadas de ligante, visto que se observou diferenciação mais clara de comportamento nas temperaturas mais elevadas.

# 5 EFEITO DA TEMPERATURA DE CONDICIONAMENTO DO RAP SOBRE O GRAU DE INTERAÇÃO ENTRE LIGANTES

# 5.1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes empecilhos para a produção de misturas com teores elevados de RAP está no aquecimento do material fresado. Conforme foi visto anteriormente, o seu aquecimento é fundamental para que o ligante oxidado seja ativado e possa interagir com os demais componentes da mistura. O problema é que o RAP não pode ser aquecido da mesma forma com que se aquecem os agregados normalmente, isto é, em contato direto com a chama no tambor de secagem (BROCK; RICHMOND, 2007). No caso do RAP, o contato com a chama deve ser evitado, pois pode fazer com que o ligante asfáltico presente nele entre em processo de ignição (WEST, 2015; ZAUMANIS; MALLICK, 2015).

Para solucionar este problema, o mais adequado é que o RAP seja aquecido num sistema em paralelo, ou seja, em um tambor de secagem separado dos agregados virgens, com um equipamento que evite o contato direto da chama com o material. Outra opção seria aquecer os dois materiais juntos, mas também evitando o contato com a chama, o que é mais comum nas usinas asfálticas volumétricas americanas que utilizam tambor misturador de fluxo paralelo. Nos dois casos, tanto o fresado quanto os agregados virgens entram no misturador já na temperatura adequada (WEST; COPELAND, 2015; ZAUMANIS; MALLICK; FRANK, 2016b). No entanto, a necessidade de investimentos em equipamentos especiais para o aquecimento do RAP é um fator que muitas vezes desencoraja a reciclagem asfáltica por parte das usinas no cenário brasileiro.

Como forma de contornar essa necessidade de equipamentos especiais para o aquecimento do RAP, é possível também recorrer ao método de aquecimento indireto. Nele, o material fresado é introduzido no alto da torre da usina gravimétrica ainda à temperatura ambiente, onde é misturado a seco com os agregados virgens superaquecidos. Em outras palavras, os agregados virgens são aquecidos a uma temperatura maior que a necessária e aquecem o material fresado por meio de transferência de calor. A ideia é que os dois materiais estejam na temperatura adequada para a mistura após atingir o equilíbrio térmico. Este processo é muito utilizado, porém limita a quantidade de RAP que pode ser adicionada à mistura. Em misturas produzidas pelo método de aquecimento indireto o teor de RAP costuma ser baixo, entre 10% e 20% (ZAUMANIS; MALLICK, 2015). Isso porque o aumento do teor de RAP exige que os agregados virgens sejam aquecidos a temperaturas excessivamente altas, o que, além de aumentar o consumo energético, causa dificuldades técnicas na operação da usina. Uma delas é a formação de nuvens de vapor a partir da umidade presente no RAP, o que pode causar explosões se o misturador não for devidamente ventilado. Além disso, gases da combustão acima de 230°C podem danificar os filtros de ar (BROCK; RICHMOND, 2007; MALLICK; KANDHAL; BRADBURY, 2008).

Por esse motivo, a redução da temperatura de usinagem a partir da aplicação de tecnologias de mistura morna é uma forma de se conseguir aumentar um pouco mais o teor de RAP. No estudo descrito em Lopes (2017) e Gaspar et al. (2019), por exemplo, foi possível produzir misturas recicladas com 25% de RAP por meio desse processo. No entanto, a redução da temperatura de usinagem não é suficiente para ir mais além no que diz respeito à quantidade de RAP nas misturas, já que essa redução pode acabar também prejudicando os mecanismos de interação entre ligantes que têm papel importante no processo de reciclagem (COPELAND et al., 2010; FRIGIO et al., 2017).

Fica evidente que a temperatura do RAP possui um papel de destaque no processo de reciclagem, sendo determinante para a definição da quantidade do material que pode ser incorporada à mistura sem prejuízos ao desempenho. Sabendo que a temperatura afeta particularmente a ativação do ligante presente no RAP e a sua interação com o ligante asfáltico virgem, dois mecanismos que se relacionam de forma complexa, foi elaborado o estudo laboratorial que é apresentado neste capítulo.

O presente estudo buscou aplicar a metodologia de extração por etapas desenvolvida no Capítulo 4 para avaliar o grau de interação entre ligantes em duas misturas asfálticas contendo 50% de RAP, produzidas em laboratório utilizando os mesmos materiais, mas por meio de procedimentos de condicionamento do RAP diferentes. Foram utilizados dois procedimentos que buscaram simular os processos utilizados na produção nas usinas. Em um deles (Mistura A) o RAP foi aquecido indiretamente, por meio do contato com os agregados virgens superaquecidos, e no

outro (Mistura B) foi aquecido separadamente, sendo introduzido na mistura já na temperatura de usinagem. Assim, foi possível analisar a aplicabilidade do método de extração por etapas e, ao mesmo tempo, verificar a influência do processo de aquecimento do RAP sobre o grau de interação entre ligantes nas misturas.

## 5.2 MATERIAIS

Para a produção das misturas de laboratório, Mistura A e Mistura B, foram utilizados ligante asfáltico convencional CAP 30/45, agregados graníticos e material fresado. Além disso, foi adicionada cal hidratada do tipo CH-1, na quantidade de 1,5% em relação à massa de agregados. As características do ligante asfáltico utilizado são apresentadas na Tabela 5. O material fresado utilizado é o mesmo que foi estudado no Capítulo 3 sob o nome de RAP D, que possui teor de ligante asfáltico de 6,1%. Demais características deste material são apresentadas na seção 3.1. No momento da seleção dos materiais e da produção das misturas de laboratório, não se sabia que este RAP continha qualquer tipo de polímero na sua composição, o que foi verificado na seção 3.4 deste trabalho.

Parâmetro	CAP 30/45	Especificação brasileira (DNIT 095/2006)
Penetração (0,1 mm)	32	30-45
Ponto de amolecimento (°C)	54	mín. 52
Densidade a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1,010	-
Viscosidade Brookfield a 135°C (cP)	422	mín. 374
Viscosidade Brookfield a 150°C (cP)	212	mín. 203
Viscosidade Brookfield a 177°C (cP)	76	76-285

Tabela 5 - Características do ligante asfáltico virgem utilizado nas misturas de laboratório

Foi feita dosagem pelo método Marshall para uma mistura do tipo concreto asfáltico Faixa III da DERSA, com 50% de material fresado. O teor ótimo de ligante virgem foi definido em 2,8% em relação à massa total de mistura, resultando em uma mistura com teor de ligante total de 5,75%. Este teor foi definido considerando a totalidade do ligante presente no RAP, e descontando-a do teor ótimo encontrado para uma mistura sem RAP. A faixa granulométrica de projeto é apresentada na Figura 35.



Figura 35 - Curva granulométrica de projeto das misturas de laboratório

## 5.3 METODOLOGIA

#### 5.3.1 Preparação das misturas asfálticas

A partir da curva de viscosidade do ligante virgem CAP 30/45, foi definida a temperatura de mistura de 155°C. Os materiais foram separados em porções pequenas para a produção de bateladas de 1,5 kg de mistura, que é a capacidade do misturador utilizado.

Para a produção da Mistura A, foi simulado o método de aquecimento indireto do RAP. Dessa forma, os agregados virgens foram superaquecidos a 185°C antes da mistura, e o RAP foi mantido à temperatura ambiente. Na produção da Mistura B, as amostras de RAP foram mantidas à temperatura de 150°C pelo período de 1 hora antes da usinagem, e os agregados virgens foram aquecidos a 165°C.

Para cada uma das amostras produzidas, os materiais foram misturados no equipamento mecânico por 45 s. Em seguida, foram deixados em estufa por 1 hora para simular o envelhecimento de curto prazo. Foram produzidas 5 amostras para cada mistura, totalizando 7,5 kg cada.

#### 5.3.2 Procedimento de extração por etapas

Duas amostras de cada uma das misturas produzidas foram submetidas ao processo de extração por etapas que foi desenvolvido e aplicado no Capítulo 4. O procedimento é descrito de forma detalhada no item 4.3.1.

Foram necessários testes preliminares para definir os tempos de extração em cada etapa, de forma que fosse obtida aproximadamente a mesma proporção de ligante em cada uma delas. Após algumas tentativas, foram fixados os tempos apresentados na Tabela 6. As proporções de ligante obtidas em cada etapa para estes tempos é apresentada na Figura 36.

Mistura	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Mistura A	25 min	20 min	até a extração completa
Mistura B	10 min	20 min	até a extração completa

Tabela 6 - Tempos de extração fixados para cada etapa do processo







Após a recuperação dos ligantes e a verificação das quantidades obtidas em cada etapa, as amostras foram submetidas aos ensaios reológicos.

# 5.3.3 Ensaios reológicos

A caracterização do comportamento reológico dos ligantes obtidos em cada etapa do processo, para as duas misturas de laboratório, foi feita da mesma forma que no estudo descrito no Capítulo 4. Foram realizados ensaios de varredura de frequência e temperatura para obtenção das propriedades viscoelásticas lineares, a partir dos quais foi feita a análise das curvas mestras, dos diagramas de Espaço *Black* e do parâmetro *Glover-Rowe*. Além disso, foram realizados os ensaios MSCR e LAS. Para as misturas A e B de laboratório, os ensaios MSCR foram conduzidos na temperatura de 64°C. Já os ensaios LAS foram feitos a 20°C.

Todos os ensaios realizados e os procedimentos de análise são descritos de forma detalhada na seção 4.3.2 deste trabalho.

# 5.4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.4.1 Módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ )

A partir dos resultados obtidos na varredura de frequência e temperatura, foram construídas as curvas mestras das propriedades viscoelásticas  $|G^*|$  e  $\delta$ , na
temperatura de referência de 15°C. Estas são apresentadas na Figura 37 e na Figura 38, respectivamente.

Visualmente, é possível perceber uma maior diferenciação entre as curvas de cada etapa para a Mistura A, principalmente em relação às Etapas 1 e 3. Em relação a  $|G^*|$ , para as duas amostras da Mistura A há um distanciamento bem definido entre a curva da Etapa 1 e a curva da Etapa 3, enquanto a Etapa 2 ficou bem próxima da Etapa 1. Já para a Mistura B, as curvas da Etapa 1 e da Etapa 3 são mais próximas, sendo que na amostra 2 parece não haver diferença de rigidez entre as duas. Nas curvas mestras de  $\delta$  se observa um distanciamento entre Etapa 1 e Etapa 3 para todas as amostras, mas essa distância parece ser menor para a Mistura B.

Figura 37 - Curvas mestras de |*G*<sup>\*</sup>|, na temperatura de referência de 15°C, dos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2



Fonte: Autor





Fonte: Autor

Para uma avaliação mais detalhada, e como forma de quantificar essa diferenciação entre as curvas, foram calculados, para diferentes frequências, os valores percentuais de  $|G^*|$  e  $\delta$  nas Etapas 2 e 3 em relação ao valor obtido para a Etapa 1. Estes resultados são apresentados na Figura 39 e na Figura 40.

Os resultados confirmam a observação feita anteriormente, principalmente para as curvas mestras de  $|G^*|$ , em especial para as frequências mais baixas. A diferença entre as curvas foi consideravelmente maior para a Mistura A, indicando uma maior heterogeneidade, que se deve ao menor grau de interação entre os ligantes nessa mistura, já que o RAP foi introduzido à temperatura ambiente. Mesmo com o superaquecimento dos agregados virgens, a transferência de calor não foi suficiente para mobilizar totalmente o ligante presente no RAP e fazê-lo interagir de forma homogênea com o ligante virgem. Os resultados da Mistura B mostram um material mais homogêneo, com os ligantes obtidos em cada etapa apresentando propriedades mais semelhantes entre si, o que resulta do aquecimento do RAP antes da usinagem.

Em relação ao ângulo de fase, a diferença foi mais perceptível nas frequências altas, que equivalem às temperaturas mais baixas. Também na Mistura B a diferenciação entre as curvas mestras de  $\delta$  foi menor, mas a diferença de homogeneidade entre as duas misturas não é tão pronunciada como na análise das curvas mestras de  $|G^*|$ .

Figura 39 - Valor relativo de  $|G^*|$  nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2



Fonte: Autor



Figura 40 - Valor relativo de  $\delta$  nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2

Fonte: Autor

## 5.4.2 Diagramas de Espaço Black

Os mesmos dados utilizados na construção das curvas mestras foram plotados para gerar os diagramas de Espaço *Black*. Os diagramas obtidos são apresentados na Figura 41.





Fonte: Autor

Observando os diagramas de *Black*, não é possível perceber uma diferença significativa de comportamento entre as misturas, como a que foi observada nas curvas mestras de  $|G^*|$ . É esperado que a curva obtida para a Etapa 1 fique posicionada mais à direita, por conter menor quantidade de material proveniente do RAP, e que a curva da Etapa 3 se posicione mais à esquerda, já que contém maior quantidade do material já oxidado proveniente do RAP. De fato, isso é observado para todas as misturas, mas se esperava também que na Mistura A a separação entre Etapa 1 e Etapa 3 fosse maior, enquanto na Mistura B elas fossem mais semelhantes. Embora visualmente essa separação pareça, de fato, menor na Mistura B, essa percepção não é evidente.

A diferença de comportamento entre as misturas foi perceptível (e quantificável) na análise das curvas mestras, mas não ficou clara na análise dos diagramas de Espaço *Black*. Assim como se observou no item 4.4.2, isso indica que este tipo de diagrama pode não ser uma ferramenta adequada para avaliar a homogeneidade entre as camadas de ligante.

#### 5.4.3 Parâmetro Glover-Rowe (GR)

Para cada uma das amostras submetidas à varredura de frequência e temperatura, o parâmetro *GR* foi calculado. Os resultados são apresentados na Figura 42.



Figura 42 - Resultados do parâmetro Glover-Rowe nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2

Fonte: Autor

Assim como foi observado no item 4.4.3, o uso do parâmetro *GR* aparenta ser uma boa opção para a avaliação da homogeneidade entre os ligantes obtidos nas três

etapas do processo de extração, principalmente por ser um parâmetro quantificável e por ter relação com os efeitos da oxidação do ligante.

Mais uma vez se obteve maior heterogeneidade para a Mistura A, que teve o RAP introduzido à temperatura ambiente. Os ligantes da Etapa 3 apresentaram *GR* consideravelmente mais alto que os ligantes da Etapa 1 para essa mistura. Apesar de na Mistura A também ser observada uma certa heterogeneidade, no caso dela a diferença entre Etapa 1 e Etapa 3 foi relativamente menor. Para corroborar essa observação, assim como na análise de  $|G^*|$  e  $\delta$ , foi feito o cálculo dos valores percentuais de *GR* das Etapas 2 e 3 em relação à Etapa 1, e os resultados são apresentados na Figura 43. Esse tipo de análise torna a diferença mais evidente, mostrando que, na mistura A, o ligante da Etapa 3 teve *GR* em torno de 5 a 6 vezes maior que o ligante da Etapa 1, enquanto na Mistura B foi aproximadamente 2 vezes maior apenas.

Figura 43 - Valor relativo do parâmetro Glover-Rowe nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2



Fonte: Autor

#### 5.4.4 Ensaio MSCR

Na Figura 44 são apresentados os resultados de  $J_{nr}$ , dos ensaios na temperatura de 64°C, para os dois níveis de tensão aplicados.

Figura 44 - Resultados de  $J_{nr}$  nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2



Fonte: Autor

É possível perceber para a Mistura A uma tendência de redução gradual de  $J_{nr}$ , bem definida, ao longo das etapas de extração para as duas amostras. Isso é também condizente com a hipótese de que, quanto mais interna a camada de ligante, maior quantidade de material proveniente do RAP (devido à interação incompleta entre os ligantes), e menor o valor de  $J_{nr}$ . Assim, nota-se que a presença de RAP varia gradualmente nas três etapas. Essa mesma variação gradual foi observada na análise das curvas mestras de  $|G^*| \in \delta$ , para a mesma mistura A, mas não ficou tão evidente na análise do parâmetro *Glover-Rowe*. Nas amostras da Mistura B, o que se observou foi um valor maior para o ligante da Etapa 1, e valores mais baixos e aproximadamente iguais para as Etapas 2 e 3. Isso indica que nessa mistura as duas camadas mais internas estão mais homogêneas, enquanto a camada mais externa se apresenta mais suscetível à deformação (devido ao valor mais alto de  $J_{nr}$ ). Essa é a tendência que foi observada também nos resultados de  $|G^*|$  e  $\delta$ .

Para quantificar a redução do valor de  $J_{nr}$  ao longo das etapas de extração, da mesma forma que se fez para os resultados anteriores, foram calculados os valores percentuais de  $J_{nr}$  das Etapas 2 e 3, em relação ao valor obtido na Etapa 1. Os resultados são apresentados na Figura 45. Nela se observa que, para a Mistura A, o  $J_{nr}$  do ligante da Etapa 3 foi aproximadamente 68% menor que o da Etapa 1, enquanto na Mistura B essa diferença foi de 57% na primeira amostra e 36% na segunda amostra (para a tensão de 3,2 kPa). Nota-se que houve uma variabilidade considerável entre as duas amostras da Mistura B. Mesmo assim é possível afirmar que a heterogeneidade foi maior para a Mistura A.

Figura 45 - Valor relativo de  $J_{nr}$  nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2





Fonte: Autor

Diferentemente do que aconteceu nos resultados de MSCR do Capítulo 4 (item 4.4.4), para as duas misturas de laboratório o percentual de recuperação ( $R_{\%}$ ) nos ensaios foi diferente de zero. Assim, foi possível conduzir uma análise adicional em relação a estes resultados, que são apresentados na Figura 46.

Os resultados de  $R_{\%}$  seguiram aproximadamente a mesma tendência observada para os resultados de  $J_{nr}$ , mas trazem uma interpretação adicional.  $R_{\%}$  é um parâmetro que consegue caracterizar melhor a presença de polímero no material, e após a investigação conduzida no Capítulo 3 (item 3.4) se concluiu que o RAP D, o mesmo utilizado nas misturas aqui analisadas, possui algum tipo de polímero na sua composição. Dessa forma, a variação do parâmetro  $R_{\%}$  em cada uma das etapas indica também a quantidade de polímero presente em cada uma, principalmente para a tensão de 3,2 kPa, já que a tensão de 0,1 kPa costuma ser muito baixa para caracterizar bem a resposta do polímero.



Figura 46 - Resultados de  $R_{\%}$  nos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2

### 5.4.5 Ensaio LAS

Como resultado do ensaio LAS, foram construídas as curvas características de dano dos ligantes, utilizando o modelo VECD. As curvas são apresentadas na Figura 47. Pode-se perceber que nas etapas da Mistura A há uma maior diferenciação entre as curvas de cada etapa. O ligante da Etapa 1, consegue manter a integridade para um maior dano acumulado do que o da Etapa 3, que atinge a ruptura mais cedo. Essa diferença entre Etapa 1 e Etapa 3 também é observada nos resultados da Mistura B (amostra 1), mas de forma mais reduzida. Para a amostra 2 da mesma Mistura B, as

curvas são muito próximas, mostrando maior homogeneidade entre os ligantes das três etapas.



Figura 47 - Curvas características de dano dos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2

Fonte: Autor

Foram construídas as curvas do modelo de fadiga, que é o resultado final obtido no ensaio LAS. Estas são apresentadas na Figura 48. Nelas se percebe mais ou menos a mesma tendência observada nas curvas características de dano e nos demais ensaios executados: uma maior homogeneidade para a Mistura B. No entanto, a análise visual das curvas do modelo de fadiga não permite distinguir tão bem os materiais.



Figura 48 - Curvas de fadiga dos ligantes obtidos em cada etapa para (a) Mistura A - amostra 1, (b) Mistura A - amostra 2, (c) Mistura B - amostra 1 e (d) Mistura B - amostra 2

# 5.5 CONCLUSÕES

A produção das misturas de laboratório A e B buscou simular situações opostas de baixa e alta interação entre ligantes, respectivamente, por meio da mudança da temperatura de condicionamento do RAP. As amostras de ambas foram submetidas ao processo de extração por etapas definido no Capítulo 4, e os resultados mostraram que o método é capaz de capturar a diferença no grau de interação entre os ligantes, a partir da heterogeneidade entre as camadas extraídas e recuperadas. Para a mistura A, em que se esperava menor grau de interação entre ligantes, foi observada maior heterogeneidade entre as camadas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho trouxe uma contribuição para o estudo da ativação do ligante presente no RAP e da interação entre ligantes, dois mecanismos que afetam significativamente o desempenho de misturas asfálticas recicladas, mas que ainda não são devidamente compreendidos, conforme foi demonstrado na revisão bibliográfica. Para que se possa obter informações relevantes sobre como estes mecanismos acontecem e de que forma eles influenciam o comportamento da mistura, é fundamental que se disponha de métodos de análise adequados e validados, o que ainda não é uma realidade.

O trabalho deu um passo adiante ao mostrar que tanto o método proposto por Pires (2018), para a análise da ativação do ligante no RAP, quanto o método de extração por etapas (desenvolvido neste trabalho), para análise da interação entre ligantes, são capazes de caracterizar estes mecanismos e identificar, em diferentes materiais, o grau com que eles acontecem. O método de avaliação da ativação do ligante mostrou também ser capaz de capturar o efeito da presença de polímero, uma característica que pode fazer muita diferença para a mistura reciclada final, mas que é difícil de ser identificada adequadamente.

Em trabalhos futuros que busquem aplicar o método de avaliação do ligante do RAP, é interessante que se busquem formas de aprofundar ainda mais a análise dos resultados. Por exemplo, condicionar os RAPs em uma temperatura ainda mais alta, de 210°C, pode mostrar se as tendências observadas continuam presentes. Além disso, a análise dos ligantes recuperados a partir dos RAPs pode ser aprofundada com ensaios MSCR em diferentes temperaturas. É importante também buscar formas de observar como os grumos do RAP se comportam com o aumento da temperatura de condicionamento, e se a desintegração destes pode estar causando algum efeito sobre a resistência dos corpos de prova.

Já no âmbito da interação entre ligantes, um avanço importante seria adaptar o método da extração por etapas para equipamentos de extração e recuperação automatizadas, já que o uso deste tipo de equipamento tende a se tornar cada vez mais popular por evitar que o operador entre em contato com o solvente, podendo também tornar o processo de extração por etapas mais rápido e menos trabalhoso. Além disso, é importante dar sequência à investigação dos parâmetros que melhor indicam a interação entre ligantes a partir da heterogeneidade entre as camadas, principalmente através da correlação com parâmetros de desempenho para misturas asfálticas, e não apenas relacionados ao ligante.

# 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSON, G. Method and apparatus for the recovery of asphalt. **ASTM Proceedings**, v. 33, p. 704-714, 1933.

ABSON, G.; BURTON, C. The use of chlorinated solvents in the Abson recovery method. In: Association of Asphalt Paving Technologists Annual Meeting, 1960, **Proceedings**...1960.

AIREY, G. D. Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data. **Road Materials and Pavement Design**, v. 3, n. 4/2002, p. 403–424, 2002.

AL-QADI, I. L.; ELSEIFI, M.; CARPENTER, S. H. **Reclaimed asphalt pavement - A literature review**. Research report FHWA-ICT-07-001, Illinois Center for Transportation, 2007.

BEHNOOD, A.; OLEK, J. Stress-dependent behavior and rutting resistance of modified asphalt binders: An MSCR approach. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 635–646, 2017.

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

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3<sup>a</sup> ed. São Paulo: Exceção editorial, 2010.

BOWERS, B. F. et al. Investigation of Reclaimed Asphalt Pavement blending efficiency through GPC and FTIR. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 517–523, 2014.

BOWERS, B. F. et al. Investigation of Sequential Dissolution of Asphalt Binder in Common Solvents by FTIR and Binder Fractionation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 8, 2015.

BROCK, J. .; RICHMOND, J. L. **Milling and Recycling**. Technical Paper T-127, ASTEC Inc., 2007.

BROSSEAUD, Y. Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França. In: 7° Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu. **Anais**... Foz do Iguaçu: 2011.

BULATOVIĆ, V. O.; REK, V.; MARKOVIĆ, K. J. Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen. **Journal of Elastomers & Plastics**, v. 46, n. 5, p. 448–469, 2014.

BURR, B. L. et al. Asphalt hardening in extraction solvents. Transportation Research

Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 1323, 1991.

CAMPHER, L. Herwonne Asfalt: Hoe effektief is verouderde bitumen in Bitumen Stabliliseerde Materiale? Stellenbosch: University of Stellenbosch, South Africa, 2012.

CARPENTER, S. H.; WOLOSICK, J. R. Modifier influence in the charaterization of hotmix recycled material. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 777, p. 15–22, 1980.

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

CIPIONE, C. A. et al. Evaluation of solvents for extraction of residual asphalt from aggregates. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1323, p. 47–52, 1991.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial**. Confederação Nacional do Transporte. Brasília: CNT, 2015.

CNT. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas**. Confederação Nacional do Transporte. Brasília: CNT, 2018.

COLLINS-GARCIA, H. et al. An evaluation of an alternative solvent for extraction of asphalt to reduce health and environmental hazards. In: Transportation Research Board Annual Meeting, 2000, Washington. **Proceedings**... Washington, 2000.

COPELAND, A. et al. Field Evaluation of High Reclaimed Asphalt Pavement–Warm-Mix Asphalt Project in Florida. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2179, n. 1, p. 93–101, 2010.

COPELAND, A. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. **Report No. FHWA-HRT-11-021**, Federal Highway Administration, McLean, Virginia, 2011.

D'ANGELO, J. et al. Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test. **Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 76, p. 123, 2007.

D'ANGELO, J. et al. Development in Asphalt Binder Specifications. Transportation Research Circular Number E-C147. **Transportation Research Board**. Washington: 2010.

D'ANGELO, J.; DONGRÉ, R. Practical Use of Multiple Stress Creep and Recovery Test. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2126, n. 2126, p. 73–82, 2009.

DI MINO, G. et al. **AllBack2Pave End-User Manual**. CEDR Call 2012, Deliverable No D3.1, Conference of European Directors of Roads, 2015.

DIEFENDERFER, S. D. **Developing a Laboratory Protocol for Asphalt Binder Recovery**. Final Report VCTIR 15-R7, Virginia Center for Transportation Innovation and Research. Charlottesville: 2014.

DING, Y.; HUANG, B.; SHU, X. Characterizing blending efficiency of plant produced asphalt paving mixtures containing high RAP. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 172–178, 2016.

DOMINGOS, D. M. I.; FAXINA, A. L. Rheological behaviour of bitumens modified with PE and PPA at different MSCR creep –recovery times. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 9, p. 771–783, 2015a.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Rheological analysis of asphalt binders modified with Elvaloy® terpolymer and polyphosphoric acid on the multiple stress creep and recovery test. **Materials and Structures**, v. 48, n. 5, p. 1405–1416, 2015b.

EDDHAHAK-OUNI, A. et al. Experimental investigation of the homogeneity of the blended binder of a high rate recycled asphalt. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. 3, p. 566–575, 2012.

FRIGIO, F. et al. Performance Assessment of Plant-Produced Warm Recycled Mixtures for Open-Graded Wearing Courses. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2633, p. 16–24, 2017.

GASPAR, M. S. et al. Comportamento Mecânico de Misturas Tipo Concreto Asfáltico (CA) e Mistura Asfáltica Antirreflexão de Trincas (MAAT). In: 21º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro. **Anais**... Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2014.

GASPAR, M. S. et al. Procedimento de extração em etapas para avaliação da interação entre ligantes na reciclagem a quente e morna. In: XIX CILA - Congreso Iberoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia. **Anais**... Medellín, Colombia: 2017.

GASPAR, M. S. et al. Experimental application of warm-mix technique for recycled asphalt mixtures using conventional batch plants. In: 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington. **Proceedings**... Washington, D.C.: 2019.

GASPAR, M. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B. Influência do tipo de ligante no projeto de misturas asfálticas finas e delgadas. In: 45<sup>a</sup> RAPv - Reunião Anual de Pavimentação, Brasília. **Anais**... Brasília: 2016.

GHAVIBAZOO, A.; ABDELRAHMAN, M.; RAGAB, M. Mechanism of Crumb Rubber

Modifier Dissolution into Asphalt Matrix and Its Effect on Final Physical Properties of Crumb Rubber–Modified Binder. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2370, n. 1, p. 92–101, jan. 2013.

GLOVER, C. J. et al. **Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation**. Report No. FHWA/TX-05/1872-2, Texas Transportation Institute. College Station: 2005.

HINTZ, C. Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue. University of Wisconsin - Madison, 2012.

HINTZ, C.; BAHIA, H. Simplification of Linear Amplitude Sweep Test and Specification Parameter. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2370, n. 1, p. 10–16, 2013.

HOSPODKA, M.; HOFKO, B.; BLAB, R. Impact of distillation temperature on the solvent residue and viscoelastic properties of asphalt binders. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 6, p. 1275–1287, 2018.

HOSSAIN, Z. et al. Use of the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test Method to Characterize Polymer-Modified Asphalt Binders. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 1, 2016.

HOWARD, I. L.; COOLEY, L. A.; DOYLE, J. D. **Laboratory testing and economic analysis of high rap warm mixed asphalt**. Final Report FHWA/MS-DOT-RD-09-200, Mississipi Department of Transportation. Jackson: 2009.

HUANG, B. et al. Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1929, n. Figure 1, p. 37–45, 2005.

HUGENER, M.; PITTET, M. Extraction and recovery of polymer modified bitumen. In: Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, June, **Proceedings**...Praga: Czech Technical University, 2016.

IPAVEC, A.; MARSAC, P.; MOLLENHAUER, K. Synthesis of the European national requirements and practices for recycling in HMA and WMA (Direct\_mat project). In: 5th Euroasphalt and Eurobitume Congress, Istanbul. **Proceedings**... Istanbul: 2012.

JIMÉNEZ DEL BARCO CARRIÓN, A.; LO PRESTI, D.; AIREY, G. D. Binder design of high RAP content hot and warm asphalt mixture wearing courses. **Road Materials and Pavement Design**, v. 16, n. sup1, p. 460–474, 2015.

KANDHAL, P. S.; FOO, K. Y. Designing Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures Using SuperPAVE Technology. **NCAT Report 96-05**, National Center for Asphalt Technology. Auburn: 1997.

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

KING, G. et al. Using Black Space Diagrams to Predict Age-Induced Cracking. (A. Scarpas et al., Eds.) In: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Dordrecht. **Proceedings**... Dordrecht: Springer Netherlands, 2012.

LEE, D.-Y. et al. **Absorption of Asphalt Into Porous Aggregates**. Report SHRP-A/UIR-90-009, Strategic Highway Research Program. Washington: 1990.

LO PRESTI, D. et al. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 43–51, set. 2016.

LO PRESTI, D. et al. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. **Road Materials and Pavement Design**, 2019. No prelo.

LOPES, M. et al. Avaliação laboratorial da tecnologia de reciclagem morna com incorporação de elevadas taxas de material fresado. In: 22° Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro. **Anais**... Rio de Janeiro: 2016.

LOPES, M. de M. Avaliação laboratorial e em pista da tecnologia de reciclagem morna com incorporação de elevadas taxas de material fresado para redução do consumo energético e de materiais não renováveis. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017.

MALLICK, R.; KANDHAL, P.; BRADBURY, R. Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2051, p. 71–79, 2008.

MARASTEANU, M.; ANDERSON, D. Techniques for Determining Errors in Asphalt Binder Rheological Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1766, n. 1, p. 32–39, 2001. Disponível em: <a href="http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1766-05">http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1766-05</a>>.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MASSON, J.-F.; PELLETIER, L.; COLLINS, P. Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 79, n. 6, p. 1034–1041, 2001.

MCDANIEL, R. S. et al. **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method.** NCHRP Web Document 30 (Project D9-12): Contractor's Final Report, National Cooperative Highway Research Program. Washington: 2000.

MEHTA, Y. et al. **Reclaimed Asphalt Pavement in Hot Mix Asphalt**. Report FHWA-NJ-2012-005. New Jersey Department of Transportation. Trenton: 2012.

MOGAWER, W. S. et al. Using binder and mixture space diagrams to evaluate the effect of re-refined engine oil bottoms on binders and mixtures after ageing. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, p. 154–182, 2017.

MOHSENI, A.; AZARI, H. High-Temperature Characterization of Highly Modified Asphalt Binders and Mixtures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2444, p. 38–51, 2014.

NEWCOMB, D. E.; BROWN, E. R.; EPPS, J. A. **Designing HMA mixtures with High RAP content: A practical guide**. NAPA Quality Improvement Series 124. National Asphalt Pavement Association. Maryland: 2007.

NEWCOMB, D. E.; EPPS, J. A. Asphalt recycling technology: literature review and research plan. Report No. ESL-TR-81-42. New Mexico Engineering Research Institute. Albuquerque: 1981.

NIELSEN, E. **State of the Art - Recycling Polymer Modified Asphalt.** RECYPMA Project Report, Deliverable No. 2.1 and 2.2 (combined). Danish Road Directorate. Dinamarca: 2013.

NIVITHA, M. R.; PRASAD, E.; KRISHNAN, J. M. Ageing in modified bitumen using FTIR spectroscopy. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 17, n. 7, p. 565–577, 2016.

NÖSLER, I.; TANGHE, T.; SOENEN, H. Evaluation of binder recovery methods and the influence on the properties of polymer modified bitumen . **European Asphalt Pavement Association (EAPA)**, p. 1–12, 2008.

NOURELDIN, A. S.; WOOD, L. E. Rejuvenator Diffusion in Binder Film for Hot-Mix Recycled Asphalt Pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1115, p. 51–61, 1987.

PIÉRARD, N.; VANSTEENKISTE, S.; VANELSTRAETE, A. Effect of Extraction and Recovery Procedure on the Determination of PmB Content and on the Properties of the Recovered Binder. **Road Materials and Pavement Design**, v. 11, n. sup1, p. 251–279, 2012.

PINHEIRO, H. L. Estudo da reativação de ligantes em misturas asfálticas visando

o uso de 100% de RAP. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

PIRES, G. M. A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation. Nottingham: University of Nottingham, 2018.

RODEZNO, C.; JULIAN, G. Asphalt Binder Extraction Protocol for Determining Amount and PG Characteristics of Binders Recovered from Asphalt Mixtures. Report No. WHRP 0092-16-02. National Center for Asphalt Technology at Auburn University. Auburn: 2018.

ROWE, G. M.; KING, G.; ANDERSON, M. The Influence of Binder Rheology on the Cracking of Asphalt Mixes in Airport and Highway Projects. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 42, n. 5, 2014.

SHIRODKAR, P. et al. A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 150–155, 2011.

SOLEYMANI, H. R. et al. Investigation of the Black Rock Issue for Recycled Asphalt Mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Pavement** Technologists, v. 69, 2000.

SREERAM, A. et al. Evaluation of RAP binder mobilisation and blending efficiency in bituminous mixtures: An approach using ATR-FTIR and artificial aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 245–253, 2018.

SULLIVAN, J. **Pavement recycling executive summary and report**. Report No. FHWA-SA-95-060. Federal Highway Administration. Washington: 1996.

SUZUKI, K. Y. et al. Adaptações em usinas de asfalto para reciclagem a quente ou morna de material fresado (RAP). **REVISTA ESTRADAS (PORTO ALEGRE)**, v. 23, p. 84, 2018.

TAYLOR, N. H. Life expectancy of recycled asphalt paving. **Recycling of Bituminous Pavements, ASTM STP 662**, p. 3–15, 1978.

TEBALDI, G. et al. Classification of recycled asphalt (RA) material. In: 2nd International Symposium on Asphalt Pavements and Environment, France. **Proceedings**... Fortaleza: 2012.

TEBALDI, G. et al. Recommendation of RILEM TC237-SIB on cohesion test of recycled asphalt. **Materials and Structures**, v. 51, n. 5, p. 117, 18 out. 2018.

TEIXEIRA, C. C. **Utilização do ITS test para a análise de misturas asfálticas com 100% de RAP**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

WAKEFIELD, A. et al. A Review of Solvent Extraction-Recovery Procedures and their

Effect on Recovered Asphalt Binder Properties. In: Canadian Technical Asphalt Association Conference 2018, November, Regina, Canada. **Proceedings**... Regina, Canada: 2018.

WELLNER, F. et al. **High-content RA asphalt mixture design**. AllBack2Pave Project, Deliverable No D2.1. Conference of European Directors of Roads. 2015.

WEST, R. C. Best Practices for RAP and RAS Management. **NAPA Quality Improvement Series 129**, p. 44. Lanham: 2015.

WEST, R.; COPELAND, A. Information Series 139: High RAP asphalt pavements. Japan practice - Lessons learned. National Asphalt Pavement Association. Lanham: 2015..

WEST, R.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. NCHRP Report 752, Transportation Research Board. Washington: 2013.

WILLIAMS, B.; COPELAND, A.; ROSS, T. C. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2017. NAPA Information Series 138 (8th edition). National Asphalt Pavement Association. Washington: 2018.

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

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

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits. **Transportation Research Procedia**, v. 14, p. 3493–3502, 2016a.

ZEARLEY, L. J. **Penetration characteristics of asphalt in a recycled mixture**. Iowa Department of Transportation. Ames: 1979.

ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X. Investigation on binder homogeneity of RAP/RAS mixtures through staged extraction. **Construction and Building Materials**, v. 82, n. April, p. 184–191, 2015.

ZIYANI, L. et al. Bitumen extraction and recovery in road industry: A global methodology in solvent substitution from a comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 53–68, 2017.