

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE MATERIAL
FRESADO COM LIGANTES NÃO-CONVENCIONAIS NA
RECICLAGEM À QUENTE**

Anna Paula Sandri Zappe

Porto Alegre
2020

ANNA PAULA SANDRI ZAPPE

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE MATERIAL
FRESADO COM LIGANTES NÃO-CONVENCIONAIS NA
RECICLAGEM À QUENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2020

ANNA PAULA SANDRI ZAPPE

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE MATERIAL
FRESADO COM LIGANTES NÃO-CONVENCIONAIS NA
RECICLAGEM À QUENTE**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de mestre em engenharia e foi aprovada pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 01 de julho de 2020

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
DSc. pela UFRJ
Orientador

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito
PhD. pela University of Nottingham
Coorientador

Profa. Angela Borges Masuero
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Nuñez (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Prof. Luciano Pivoto Specht (UFSM)
Dr. pela UFRGS

Marlova Grazziotin Johnston (UFRGS)
Dr^a. pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais, minha irmã e todos os amigos que estiveram comigo, pela compreensão, amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

O caminho para chegar no final do processo de mestrado é árduo, é difícil e cheio de altos e baixos, e ter uma rede de suporte é extremamente necessário. Mas ter uma estrutura de suporte como eu tive foi um privilégio. Meus pais, Cledi e Sérgio, são meus maiores apoiadores, sempre me incentivaram e me deram condições de estudar e buscar os meus objetivos e sonhos, eles junto com a minha irmã, Anna Raquel, sempre estiveram ao meu lado incondicionalmente e por isso eu sou eternamente grata, amo vocês.

Tive amigos de todos os lados que estavam sempre dispostos a me ajudar, amigos que já eram amigos, amigos que eu fiz no caminho e amigos que eu fiz por causa do caminho. Eles me ajudaram em todas as crises existenciais, e momentos de auto descoberta, porque sim, ao longo de todo o processo do curso de mestrado, tem um processo de autoconhecimento gigantesco onde a certeza tira férias e as dúvidas sobre nós mesmos e nossa capacidade são o combustível que podem nos fazer explodir ou seguir em frente no meio dos tropeços. Eu sou extremamente grata por ter tido amigos que estiveram ao meu lado, garantindo que mesmo com pequenas explosões, ficaria tudo bem, muito obrigada. Créditos devem ser destinados aqui também à minha psicóloga maravilhosa, obrigado por estar comigo nesse processo.

Agradeço especialmente a Tiana e a Angélica, que estiveram sempre do meu lado, me dando apoio, me ajudando a melhorar, sempre com lições profundas, reforçando minha visão e me fazendo enxergar em perspectiva, eu amo nós três. Agradeço a todos os amigos mestres a quem eu recorria periodicamente, pra me acalmar e ter certeza que chegar no final era possível, e que de uma forma ou de outra daria tudo certo, obrigada pelo apoio. Aos amigos que faziam meus dias melhores apenas por estarem ali, aos que me faziam rir nos momentos de angústia, me acalmavam nos de desespero, e que comemoravam junto comigo ainda mais os melhores momentos, obrigada.

Agradeço também de coração a minha amiga-irmã da vida Mariana, pelo apoio tanto emocional quanto técnico, por estar presente e por me ajudar a concretizar as análises estatísticas que eu tanto queria.

Preciso agradecer também as pessoas queridas que me acolheram e dividiram suas casas comigo nesse período, Natalia, Elisete e Carmen. Obrigado, foi uma grande experiência de convivência que vocês me proporcionaram.

Agradeço ao LAPAV pela oportunidade incrível de trabalhar com pessoas das mais diversas, por poder fazer parte do grupo PETER. Também pelas oportunidades de conhecer pessoas referência na área da pavimentação, poder conviver diariamente com pessoas que compartilham da mesma paixão que eu (pavimentos, por incrível que pareça), e compartilhar conhecimento com profissionais de excelente qualidade. E agradeço ao grupo PETER, RDT da ANTT com a VIA 040, por ter tido a experiência de trabalhar também com os alunos da graduação, cheios de energia e paixões, e infinitas capacidades, sempre com muita determinação, e por aprender diariamente com eles. Agradeço a todos os companheiros do laboratório, bolsistas, técnicos, estagiários, mestrandos, doutorandos, pós-doutorandos, professores, funcionários, muito obrigado.

Agradeço também com carinho especial a Larissa Guerra, essa bolsista maravilhosa, que se tornou uma grande amiga, sem ela teria sido enlouquecedor passar por esse processo, obrigada por toda a tua ajuda, por me ajudar a pensar e me organizar, por fazer meus dias melhores e por absolutamente todas as risadas, elas foram definitivamente essenciais pra eu chegar até aqui.

Agradeço aos colegas e amigos mestrandos e doutorandos que eu conheci no processo, obrigada pelas trocas, pelos momentos compartilhados, pelos desesperos em conjunto, pela compreensão, ajuda e parceria. Especialmente aos colegas que entraram comigo, Bruna, Helenas e Gabriel, foi um prazer fazer parte dessa loucura com vocês.

Agradeço a UFRGS pela oportunidade de realização do curso de mestrado, ao LAPAV pela oportunidade de realizar esta pesquisa, pelo apoio e recursos investidos nela. Agradeço a UFSM por compartilhar o material utilizado, pelo apoio e troca de conhecimento que certamente contribuíram muito pra o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço a Ecosul, Greca Asfaltos e Mineração Eldorado pela parceria e fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa.

E por fim, mas não menos importante, agradeço ao professor Jorge Ceratti pela orientação nesta dissertação, por toda a calma e compreensão. Agradeço ao professor Lélío Brito pela orientação,

pelos incentivos, desafios e oportunidades. Sou grande admiradora do trabalho de vocês, e sou grata pela oportunidade de ter sido orientada e aprender com vocês.

*Não são suas ações, mas o motivo por trás delas que faz
toda a diferença.
Jennifer Loudon*

RESUMO

ZAPPE, A.P.S. Avaliação de diferentes fontes de material fresado com ligantes não-convencionais na reciclagem à quente. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

A reciclagem à quente de pavimentos, com aproveitamento do RAP (do inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement*), proporciona a oportunidade de reduzir o uso de agregados, e de ligante asfáltico, materiais nobres e de alto valor agregado, configurando soluções mais econômicas e ambientalmente sustentáveis. Com o objetivo de avaliar a variação de desempenho apresentada entre misturas asfálticas com diferentes teores utilizados de material fresado, e verificar a influência da aplicação de agente rejuvenescedor neste material, foram estudadas misturas com duas fontes diferentes de material fresado com ligantes não convencionais: RAP 6085 e RAP AB8 (provenientes de misturas asfálticas envelhecidas compostas por ligantes asfálticos do tipo AMP 6085 e AB8, respectivamente). Utilizando agregado virgem granítico e ligante asfáltico virgem convencional do tipo 50/70, as misturas asfálticas recicladas foram produzidas com 10, 20 e 30% de cada um dos RAP's e dosadas de acordo com a metodologia Marshall. Ainda, as misturas com 30% foram avaliadas com e sem a utilização do agente rejuvenescedor AR-5 aplicado sobre o fresado. Para avaliação mecânica das amostras foram utilizados os ensaios de dano por umidade induzida, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, módulo dinâmico e ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. Os resultados quantificam a influência do RAP nas propriedades volumétricas e no enrijecimento das misturas recicladas, em geral aumentando sua rigidez, e associam a influência do tipo de ligante do RAP no comportamento das misturas e suas tendências com o aumento do resíduo. É possível perceber a influência da fonte de ligante do RAP e a utilização do AR altera o comportamento dos materiais, reduzindo a viscosidade das misturas. A mistura R6085_30_LV5070 foi a que teve o melhor comportamento considerando todos os resultados estudados e analisados. Com as propriedades volumétricas determinadas foi proposto uma equação para inferir o grau de ativação do ligante do RAP nas misturas (DoA). Destaca-se a importância de dar devida atenção às propriedades volumétricas da mistura, que apresentaram ter influência no comportamento mecânico.

Palavras-chave: Material asfáltico fresado. Reciclagem a quente. Pavimento asfáltico. Comportamento mecânico. Sustentabilidade.

ABSTRACT

ZAPPE, A.P.S. Avaliação da Influência de Utilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

Hot mix recycling by incorporating RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) to fresh mixes allows to cut aggregate and virgin binder consumption, both non-renewable sources of high aggregate value translating into optimized economical and sustainable solutions. Aiming at evaluating performance influence among asphalt mixes with different amounts of RAP incorporation to hot mix recycling, and the verification on the influence of rejuvenating agent on this material, this research have studied mixes from two different RAP sources with non conventional binders: RAP 6085 and RAP AB8 (from aged in situ asphalt pavements reclamation composed by PMB 6085 and AR8, respectively). By using virgin granitic aggregate and conventional 50/70 virgin asphalt binder, the recycled asphalt mixes were produced with 10, 20 and 30% of each one of RAP's and dosed accordingly to Marshall methodology. Still, the 30% mixes were evaluated with and without rejuvenating agent (RA) AR5 applied over the RAP. To evaluate mechanical behavior of the samples moisture susceptibility test along with indirect tensile strength, resilient modulus, dynamic modulus and flow number test were employed. Results show the influence of RAP on volumetric properties and on hardening the mixes, usually by raising their stiffness, and indicates the influence of RAP binder type on the behavior of mixes and their trends with higher RAP amounts. It is possible to notice the influence of RAP binder source, and how the use of RA modifies materials behavior, reducing viscosity of the mixes. The R6085_30_LV5070 mix displayed the best mechanical behavior closer considering all the results. From the volumetric properties determined an equation was proposed to deduce the degree of activation (DoA) from the RAP binder inside the mixes. It stands out the importance of giving proper attention to volumetric properties of the mix, that appears to influence highly their mechanical behavior.

Key-words: Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Hot mix recycling. Asphalt pavement. Mechanical behavior. Sustainability

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	21
1.1.	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	22
1.2.	OBJETIVO GERAL	24
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	25
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1.	RECICLAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	27
2.1.1.	Estado da prática	27
2.1.2.	Definições e classificações	29
2.2.	FATORES QUE INFLUENCIAM NA RECICLAGEM A QUENTE	34
2.3.	AGENTES DE RECICLAGEM	37
2.4.	DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS.....	43
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1.	MATRIZ EXPERIMENTAL	50
3.2.	AGREGADOS.....	52
3.2.1.	Agregado mineral virgem.....	52
3.2.2.	Agregados reciclados	53
3.2.3.	Misturas utilizadas.....	57
3.3.	LIGANTE ASFÁLTICO	59
3.4.	AGENTE REJUVENESCEDOR	60

3.5.	MÉTODOS DE ENSAIO	61
3.5.1.	Produção das misturas asfálticas	61
3.5.2.	Aplicação do agente rejuvenescedor	65
3.5.3.	Dano por umidade induzida	66
3.5.4.	Ensaio convencionais de resistência a tração e módulo de resiliência	67
3.5.5.	Ensaio de módulo dinâmico	68
3.5.6.	Ensaio para determinação da resistência à deformação permanente.....	70
3.5.7.	Análise estatística	72
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1.	Dosagem das misturas asfálticas.....	73
4.2.	Análises volumétricas	83
4.3.	Análises mecânicas	87
4.3.1.	Dano por umidade induzida	88
4.3.2.	Resistência à tração e módulo de resiliência	91
4.3.3.	Módulo dinâmico	98
4.3.3.1.	Espaço de Black	98
4.3.3.2.	Cole-Cole	102
4.3.3.3.	Curva mestra de ângulo de fase.....	107
4.3.3.4.	Curva mestra de módulo dinâmico.....	111
4.3.3.5.	Correlação com fadiga	118
4.3.4.	Ensaio para determinação da resistência à deformação permanente.....	121

4.4.	Análise integrada dos resultados.....	128
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
5.1.	Sugestões de trabalhos futuros.....	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Contagem de estados com teores de RAP utilizados nos EUA	28
Figura 2: Produção de misturas asfálticas no Japão	28
Figura 3: Cenários de interação entre ligantes.....	33
Figura 4: Considerações ao DoA e DoB	34
Figura 5: DoB em (a) <i>black rock</i> (b) <i>partial blending</i> (c) <i>full blending</i>	35
Figura 6: Teores de AR utilizados pelas pesquisas analisadas	40
Figura 7: Resumo das comparações entre locais de aplicação do AR.....	42
Figura 8: Misturas estudadas	51
Figura 9: Matriz experimental	51
Figura 10: Curva granulométrica material pétreo.....	53
Figura 11: Material armazenado no LMCC – UFSM	54
Figura 12: Pilha de depósito do material fresado da Ecosul.....	54
Figura 13: Curvas granulométricas dos materiais fresados	56
Figura 14: RAP 60/85 (a) e RAP AB8 (b).....	56
Figura 15: Mistura de referência	58
Figura 16: Curvas granulométricas das Misturas 6085	58
Figura 17: Curvas granulométricas das Misturas AB8.....	59
Figura 18: Aspecto físico AR-5.....	60
Figura 19: Aplicação do AR-5 na produção das misturas recicladas	66
Figura 20: representação do resultado de deformação permanente.....	71

Figura 21: Variação de ligante com aumento do teor de fresado	75
Figura 22: Comparativos de TLP com outras pesquisas	81
Figura 23: Análise dos vazios de agregado mineral das misturas	85
Figura 24: Análise da relação betume-vazios das misturas	85
Figura 25: Análise da relação volumétrica das misturas com DoA calculado	87
Figura 26: Resistência à tração das misturas no DUI.....	89
Figura 27: Resistência retida à tração das misturas	90
Figura 28: Resistência à tração das misturas	92
Figura 29: Resistência à tração com e sem AR	93
Figura 30: Módulo de Resiliência das misturas.....	95
Figura 31: Módulo de Resiliência com e sem AR.....	97
Figura 32: Comparativo de RT's com outras pesquisas	97
Figura 33: Comparativo de MR's com outras pesquisas	98
Figura 34: Espaço de Black para as misturas com RAP 6085	99
Figura 35: Espaço de Black para as misturas com RAP AB8.....	100
Figura 36: Espaço de Black para as misturas com e sem AR.....	101
Figura 37: Espaço de Black para todas as misturas.....	102
Figura 38: Plano Cole-Cole para as misturas com RAP 6085.....	103
Figura 39: Plano Cole-Cole para as misturas com RAP AB8.....	105
Figura 40: Plano Cole-Cole para todas as misturas.....	107
Figura 41: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com RAP 6085.....	108

Figura 42: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas de RAP 6085 com e sem AR..	109
Figura 43: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com RAP AB8	109
Figura 44: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas de RAP AB8 com e sem AR...	110
Figura 45: Curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas	111
Figura 46: Curva mestra MD para as misturas com RAP 6085	112
Figura 47: Curva mestra MD em altas frequências com RAP 6085	113
Figura 48: Curva mestra MD em médias frequências com RAP 6085	113
Figura 49: Curva mestra MD em baixas frequências com RAP 6085.....	114
Figura 50: Curva mestra MD com RAP AB8	115
Figura 51: Curva mestra MD em altas frequências com RAP AB8.....	115
Figura 52: Curva mestra MD em médias frequências com RAP AB8.....	116
Figura 53: Curva mestra MD em baixas frequências com RAP AB8.....	116
Figura 54: Curvas mestras MD para as misturas sem AR.....	117
Figura 55: Curvas mestras MD 30% de RAP com e sem AR.....	117
Figura 56: Inferência à fadiga para as misturas @20°C.....	119
Figura 57: Inferência à fadiga para as misturas com e sem AR @20°C	120
Figura 58:FN das misturas sem AR.....	123
Figura 59: FN das misturas com e sem AR	123
Figura 60: Comparativo de FN com outras pesquisas	125
Figura 61: Comparação das relações RBV-FN	127
Figura 62: Comparação das relações RBV-RT	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Guia para seleção de método de reciclagem.....	32
Tabela 2: Quadro resumo de pesquisas com utilização de AR.....	40
Tabela 3: Quadro resumo de pesquisas com utilização de RAP	47
Tabela 4: Descrição das misturas estudadas.....	51
Tabela 5: Caracterização do material pétreo	52
Tabela 6: Granulometria do material pétreo.....	53
Tabela 7: Caracterização dos materiais fresados.....	57
Tabela 8: Proporções das frações em cada mistura	57
Tabela 9: Caracterização do ligante virgem 50/70	59
Tabela 10: Especificações técnicas do AR-5.....	60
Tabela 11: Vantagens e desvantagens das opções de processamento de fresado.....	62
Tabela 12: Especificações normativas para parâmetros de projeto.....	63
Tabela 13: Resultados da dosagem Marshall para determinação de TLP (1)	73
Tabela 14: Resultados da dosagem Marshall para determinação de TLP (2)	74
Tabela 15: Dosagens das misturas.....	74
Tabela 16: Ligante efetivo nas misturas	76
Tabela 17: Quantidades de ligante nas misturas.....	76
Tabela 18: Grau de ativação do ligante do RAP proposto (DoA).....	79
Tabela 19: Resultados das dosagens.....	80
Tabela 20: Análise comparativa dos materiais dos diferentes estudos.....	82

Tabela 21: Análise comparativa de absorção dos agregados utilizados.....	83
Tabela 22: Análises de variação volumétricas das misturas	84
Tabela 23: Análise da relação volumétrica das misturas com DoA calculado.....	87
Tabela 24: Análises de DUI das misturas.....	88
Tabela 25: Análises de RT das misturas.....	91
Tabela 26: Análises de MR das misturas	94
Tabela 27: Dados das misturas para ensaio de MD.....	112
Tabela 28: Resultados de FN.....	122
Tabela 29: Resumo dos resultados de FN	122
Tabela 30: Recomendações FN	124
Tabela 31: Análise integrada dos resultados quanto à adição de RAP.....	133

LISTA DE ABREVIATURAS

AR: Agente rejuvenecedor

BR: *Black Rock*

CP: Corpo de prova

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DoA: *Degree of binder activity*

DoB: *Degree of blending*

FB: *Full Blending*

FN: *Flow Number*

MD: Módulo Dinâmico

MR: módulo de resiliência

MRi: módulo de resiliência instantâneo

NAPA: *National Asphalt Pavement Association*

PB: Partial Blending

PG: Performance Grade

RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement*

RBV: relação betuma-vazios

VAM: vazios de agregado mineral

VCD: vazios cobertos com betume

Vv: volume de vazios

1. INTRODUÇÃO

O pavimento como estrutura tem por objetivo resistir aos esforços provenientes do tráfego e ao clima e garantir conforto e segurança para os usuários, mas ainda, um de seus propósitos como elemento de infraestrutura é conectar a população e promover aproximação entre pessoas, serviços e recursos, colaborando para o desenvolvimento da nação. Suzuki (2019) aponta que com o crescimento da preocupação sobre as questões ambientais aumenta-se a atenção quanto a durabilidade e sustentabilidade dessas estruturas, e ressalta a otimização dos recursos com a reutilização de materiais no ciclo de vida dos pavimentos. E Luzzi (2019) destaca a busca da engenharia rodoviária pela redução do consumo de insumos na pavimentação a partir de critérios técnicos, econômicos e de produção, consoantes às políticas de sustentabilidade.

A pavimentação é uma área responsável por consumir enormes quantidades de recursos naturais, sendo grande parte não renováveis, ao passo que gera elevada quantidade de resíduos, especialmente na forma de material fresado, também conhecido como RAP (do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*). Esses impactos têm capacidade de serem reduzidos significativamente através da reciclagem, utilizando-se os resíduos gerados para construção de novas camadas de pavimentos (Karlsson e Isacsson, 2006; Gaspar et al, 2017). Hoje em dia existem, em muitos países, incentivos para a utilização desse tipo de material. O desenvolvimento de novas tecnologias costuma visar o aumento da relação custo-benefício, mas recentemente têm sido também considerados os efeitos ambientais, visando a redução dos impactos ambientais negativos na produção de materiais e execução de serviços (Lyubarskaya et al, 2017).

Além da redução de geração de resíduos, a reciclagem ainda conta com redução de emissão de gases de efeito estufa, do passivo ambiental, e ainda as vantagens econômicas com redução de custos atrelados. E, segundo Suzuki (2019), não é apenas benéfico para o meio ambiente, mas também assegura competitividade econômica na construção e manutenção de pavimentos flexíveis.

O RAP pode ser aplicado através da reciclagem em diversos tipos de materiais, como por exemplo: bases e sub-bases granulares em substituição ao agregado natural, e na construção de novas misturas asfálticas recicladas com as mais diversas tecnologias construtivas. No entanto

é através das misturas asfálticas quentes e mornas que se destaca seu potencial de substituir materiais mais nobres e mais custosos da pavimentação asfáltica, os ligantes asfálticos (Karlsson e Isacsson, 2006; Gaspar et al, 2018). A reciclagem a quente já é prática comum na engenharia rodoviária e o uso de RAP é fortemente encorajado ao redor do mundo, sua utilização em novas misturas asfálticas a quente (HMA, do inglês *hot mix asphalt*) representa um avanço no que diz respeito a perspectiva econômica e ambiental (Nahar et al, 2013; Sreeram et al, 2018).

No entanto, os teores de uso de RAP em novas camadas de pavimentos ainda se mantêm inferiores ao que poderiam ser no ponto de vista técnico, se mostrando especialmente desafiador para camadas de rolamento em função da exigência de alta performance dos materiais para esta utilização. Ao redor do mundo legislações limitam o uso de RAP em misturas quentes e mornas a teores reduzidos, de 10 a 20%, principalmente pela alta variabilidade nas propriedades do RAP e falta de entendimento sobre os mecanismos envolvidos na mistura que ocorre entre o material fresado e os componentes virgens da mistura asfáltica (Lo Presti et al, 2016; Gaspar et al, 2018). Sendo assim, constitui-se um grande desafio a utilização de maiores teores do resíduo sem que se comprometa o desempenho das misturas, uma vez que, quanto maiores as quantidades de RAP aplicadas, mais importante o papel assumido pelo ligante envelhecido.

Segundo Bankowski (2018), outros fatores que limitam a aplicação da tecnologia de reciclagem à quente, além da falta de recomendações e diretrizes técnicas, incluem a falta de experiência, de equipamentos apropriados, de RAP's de boa qualidade, e ainda deve ser garantido que a utilização de fresado não deteriora as propriedades de novas misturas. De acordo com Lo Presti et al (2016), para conseguir-se aumentar a utilização de RAP em misturas asfálticas, além de adaptação física de usinas, outros fatores devem ser considerados, como políticas locais e melhorias no tratamento do RAP, garantindo que a qualidade desse material não seja uma limitação.

1.1. PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A maioria das rodovias construídas, principalmente no Brasil, são constituídas de revestimento com misturas asfálticas. Os materiais utilizados para construí-las são bastante custosos econômica e ambientalmente, por se utilizarem de recursos não renováveis, e gerar grandes quantidades de resíduos que são prejudiciais à natureza ao serem removidos e descartados no

final de sua vida útil. Promover a reciclagem do material asfáltico residual dentro de sua própria cadeia produtiva gera grandes benefícios, especialmente quando aplicados na reciclagem à quente das misturas asfálticas. Tais benefícios são expressados majoritariamente pela economia de materiais mais nobres utilizados na pavimentação, que são os de maior valor econômico atribuído: os ligantes asfálticos.

Dúvidas pertinentes são tangentes ao assunto, questiona-se a respeito do comportamento do material asfáltico envelhecido, presente no RAP, quando reaquecido e em contato com os materiais virgens, sua influência no comportamento mecânico e volumétrico das misturas. Ainda há necessidade de se conhecer melhor os efeitos de alteração das propriedades das misturas recicladas ao utilizar aditivos como os agentes rejuvenescedores (AR).

O que se busca nos estudos realizados sobre aplicação de RAP é como o material influencia no comportamento das misturas de acordo com a variação dos teores utilizados, de maneira ampla visando o funcionamento mecânico delas, se melhorariam ou não as propriedades da mistura. Há dificuldade de encontrar estudos que façam uma análise levando em consideração as diferentes origens dos materiais que compõe cada RAP, entendendo os materiais têm propriedades diferentes, e que variam muito de fresado para fresado.

Deve-se levar em conta que o material RAP precisa ser considerado nas análises de acordo com suas peculiaridades, considerando todos os componentes presentes em sua formulação. Incluso nessa perspectiva estão os agregados pétreos que podem ser de diferentes origens, e os ligantes asfálticos com diferentes propriedades, ainda, esses ligantes asfálticos podem ser não-convencionais, como os ligantes asfálticos modificados que levam adição de polímeros ou até mesmo resíduo de borracha na sua composição.

No âmbito dos ligantes modificados é de suma importância entender melhor o fator “reciclabilidade”, ou seja, como esses ligantes (após o processo de oxidação da vida útil do pavimento em que se encontravam) se comportam ao serem adicionados em misturas asfálticas recicladas, e como suas propriedades específicas melhoradas inicialmente com a utilização de polímeros ou borracha reagiriam na contribuição às propriedades das misturas recicladas.

Entende-se como sendo expressiva a necessidade de compreender e gerar conhecimento a respeito do desempenho apresentado por misturas asfálticas quando se faz adição de material envelhecido (como é o caso das misturas asfálticas oxidadas utilizadas na reciclagem), tendo

em vista que para a construção de vias espera-se um comportamento mínimo desejável que não pode ser comprometido.

Apresentados os pontos de vista dos problemas discutidos, e sob perspectiva de implementação dos estudos referentes a reciclagem a quente de misturas asfálticas no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, reconhecendo sua importância intrínseca no desenvolvimento de uma pavimentação mais sustentável. Compreende-se a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre o comportamento dessas misturas recicladas com materiais regionais e fresados com ligantes não-convencionais, e da variação de comportamento quando se faz a adição de AR.

1.2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do tipo e teor de material reciclado no desempenho mecânico e propriedades volumétricas de misturas asfálticas e verificar a influência da aplicação de agente rejuvenescedor nos elevados teores de incorporação de material reciclado.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são descritos a seguir.

- I. Avaliar o comportamento volumétrico de misturas asfálticas com teores de 10, 20 e 30% adicionados de material fresado para dois diferentes tipos de RAP; um RAP proveniente de mistura asfáltica fresada com ligante tipo AMP 60/85e outro proveniente de mistura asfáltica com ligante do tipo AB8;
- II. Avaliar o desempenho mecânico das misturas realizadas com RAP através de ensaios de dano por umidade induzida, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, módulo dinâmico e resistência à deformação permanente através de ensaio uniaxial de cargas repetidas;
- III. Analisar o impacto da utilização de AR nas propriedades de desempenho das misturas recicladas em análise contendo 30% de RAP;
- IV. Analisar de maneira qualitativa a variação de comportamento entre misturas com diferentes fontes de RAP;

- V. Avaliar viabilidade técnica para utilização das misturas recicladas a quente estudadas através da verificação das normativas técnicas de desempenho previstas.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo inicial se trata de uma breve introdução à pesquisa que será realizada. Busca contextualizar e explicar a relevância do assunto tratado e a perspectiva global do tema, apresentando o estado da arte e da prática referente ao assunto.

O segundo capítulo traz a revisão bibliográfica da pesquisa, com definições importantes para a construção da dissertação, destacando a importância do tema abordado. Busca também indicar parâmetros para posterior análise de dados, tendo como base pesquisas realizadas.

Materiais, métodos e equipamentos a serem utilizados na pesquisa serão encontrados no capítulo três, que tem como principal função esclarecer a matriz experimental e como a pesquisa será desenvolvida. Este capítulo apresenta também de forma mais clara as variáveis analisadas e os métodos utilizados.

Posteriormente nos capítulos quatro e cinco constarão, respectivamente, os resultados obtidos no decorrer do desenvolvimento da pesquisa juntamente com análises pertinentes, e as conclusões que se chegam a partir destes resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo da pavimentação é proporcionar tráfego seguro e confortável, composto por estruturas e materiais capazes de suportar esforços provenientes da ação do tráfego e condições climáticas a um mínimo custo. Deve-se, portanto, sempre que possível e viável tecnicamente, realizar o aproveitamento dos materiais disponíveis localmente para as obras, garantindo desempenho em custos operacionais e de manutenção ao longo do tempo (Balbo, 2007).

A camada de revestimento de um pavimento deve ser impermeável, melhorar condições de rolamento com intuito de garantir comodidade e segurança ao usuário e resistir aos esforços horizontais oriundos do tráfego (Medina e Motta, 2015). A mistura asfáltica deve ser adequadamente trabalhável, possuir estabilidade quando solicitada sob ações de cargas, deve ser durável, pouco suscetível a fissuras por fadiga e baixa deformação permanente (Balbo, 2007). Em grande parte dos pavimentos as misturas asfálticas são utilizadas na camada de rolamento da estrutura, desenvolvidas para que atendam a características específicas funcionais e estruturais da camada em questão (Ceratti; Bernucci; Soares, 2015).

Misturas asfálticas têm na sua composição agregados minerais e ligante asfáltico, suas variações são decorrentes da variação dos materiais minerais e asfálticos utilizados, da granulometria selecionada e do método de preparação da mistura empregado. A granulometria dos componentes pétreos da mistura varia pela composição de teores dos tamanhos de agregados selecionados, podendo apresentar granulometria aberta, uniforme, bem graduada ou descontínua, e sua escolha interfere diretamente na densidade do produto. Os ligantes utilizados, também conhecidos como cimento asfáltico de petróleo (CAP), podem ser convencionais, naturais ou modificados por polímero, e ainda podem ser aplicados a estes agentes modificadores das suas propriedades (Ceratti; Bernucci; Soares, 2015).

Ainda segundo os autores, no que diz respeito aos métodos de preparação utilizados para o concreto asfáltico, eles diferem as misturas entre: revestimentos asfálticos usinados a quente, mornos, a frio e reciclados. Entre os três primeiros as diferenças fundamentais se encontram na temperatura de usinagem e compactação utilizada na produção do material e no tipo de agente que proporciona ligação utilizado. Já a diferença fundamental entre estes e a mistura reciclada é que a mistura reciclada utiliza resíduo gerado por pavimentos asfálticos antigos como fonte de material mineral e asfáltico.

Este trabalho busca estudar a aplicação de material fresado em misturas asfálticas recicladas do tipo Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ).

2.1. RECICLAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

2.1.1. Estado da prática

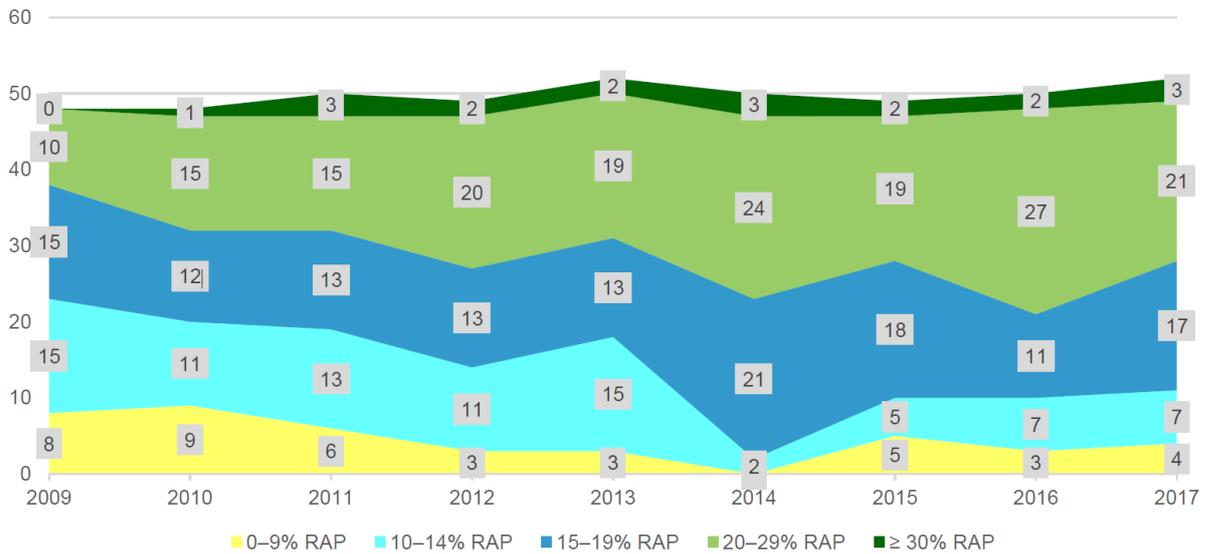
National Asphalt Pavement Association (NAPA, 2014), com o objetivo de quantificar o uso de materiais reciclados pela indústria de pavimentação asfáltica, realizou uma pesquisa voluntária com os produtores de misturas asfálticas nacionais. Segundo a associação, o material fresado é o material com mais alta taxa de reciclagem do que qualquer outro material nos Estados Unidos da América, e é vital ao estender vida de serviço da infraestrutura nacional e reduzir custos. O uso do RAP em pavimentos asfálticos tem capacidade de reduzir as quantidades consumidas de ligante asfáltico e agregados, assim, possibilitando a estabilização do preço do ligante e preservando recursos naturais.

De acordo com a pesquisa realizada em 2014, com dados atualizados posteriormente por NAPA (2017), o número de estados que reportam uso de RAP em maiores teores tem aumentado significativamente com o decorrer dos anos. A Figura 1 mostra bem essa informação (com a linha do tempo na abcissa e quantia de estados na ordenada) onde é possível perceber um aumento expressivo da quantidade de estados que reciclam teores acima de 20%. A pesquisa também informa que em 2014 100% dos produtores relataram o uso do RAP na produção de misturas asfálticas.

Em 2015, NAPA realizou outro estudo com base na experiência japonesa na reciclagem asfáltica, uma vez que para os EUA a quantidade de RAP reciclado era pouco acima de 20%, enquanto o Japão, na época, reciclava em média 47% do RAP produzido em pavimentos asfálticos, com teores de 20 a 60% de RAP nas misturas, em média, em todas as regiões do país (NAPA, 2015b). Segundo a pesquisa, os japoneses atribuíam o sucesso na reciclagem de pavimentos em três pontos chave:

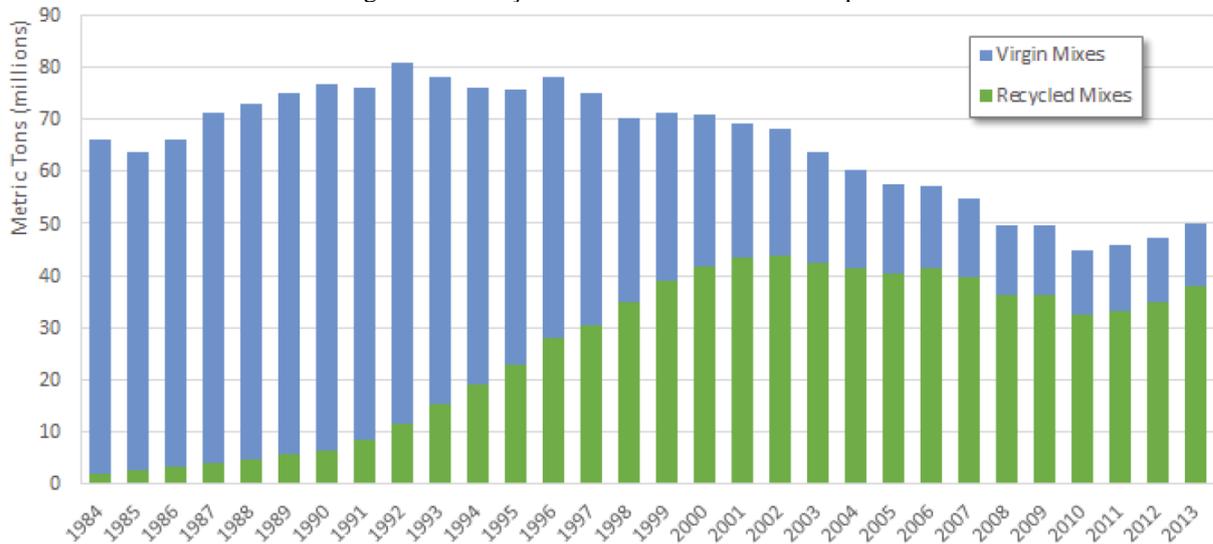
1. Foco na qualidade, ao reduzir a variabilidade com processamento do RAP e cobrindo as pilhas de material;
2. Aquecimento do RAP para secagem e redução de viscosidade do ligante envelhecido;
3. Utilização de agentes de reciclagem, para atingir as características desejadas da mistura.

Figura 1: Contagem de estados com teores de RAP utilizados nos EUA



Fonte: NAPA, 2017

Figura 2: Produção de misturas asfálticas no Japão



Fonte: NAPA, 2015b

O sucesso da reciclagem no Japão é devido à atenção aos detalhes e foco na qualidade, apresentada pelo potencial de altos teores de utilização do RAP (>25%) mantendo qualidade e performance igual ou superior às misturas virgens. A Figura 2 mostra a evolução na reciclagem

no Japão com o passar dos anos. NAPA (2015) então chega ao consenso sobre a importância da parceria entre indústria, produtores, fornecedores e autoridades de todos os níveis para buscar o maior potencial de utilização do resíduo RAP, mantendo qualidade e performance. Ainda, conforme Zaumanis, Mallick e Frank (2014), a quantidade máxima de material fresado reciclado é limitada pela tecnologia de produção disponível.

Na Europa, segundo *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 2017), 50 milhões de toneladas de RAP são disponibilizados por ano, dos quais 81 são reciclados, e desses 57% são reutilizados. A aplicação mais comum para RAP é a produção de novas misturas asfálticas, seu uso tem aumentado no decorrer dos últimos 25 anos, com teores de RAP variando entre 10 e 90%, podendo chegar a 100% em alguns casos. A associação ainda recomenda que a prioridade de reuso seja em misturas asfálticas a quente e mornas, pois representam potencial para menor consumo de ligante asfáltico e economia energética.

No Brasil não são encontrados muitos dados a respeito do estado da prática de misturas asfálticas recicladas. Sabe-se que a técnica de reciclagem de revestimentos começou a ser empregada no Brasil em 1960, no Rio de Janeiro. Após, em 1980, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) começou a incentivar a reciclagem *in situ*. Na mesma época a reciclagem em usinas começou a utilizar usinas do tipo “*drum mixer*” (Castro, 2003).

Existem registros de aplicação da técnica de reciclagem a frio de revestimentos em reciclagem profunda em 2011, pela Autopista Régis Bittencourt, do grupo OHL, em um trecho da BR 116 entre km 435,500 e 433,000 Pista Norte -SP, entre Curitiba e São Paulo (ANTT, 2011). No âmbito da reciclagem a quente Suzuki (2019) realizou pesquisa com trechos experimentais aplicando 25 e 35% de RAP na camada final de rolamento da SP-348. Suzuki (2019) relaciona a reduzida quantidade de informação nacional com a falta de exigência dos órgãos competentes no âmbito da reciclagem de pavimentos, falta de conscientização a respeito dos impactos e benefícios gerados a partir da reciclagem, e falta de técnicas adequadas para execução e controle tecnológico das obras.

2.1.2. Definições e classificações

Reciclagem de revestimento é definida pela utilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas, resultantes do processo de corte de pavimento antigo, para a produção de novas misturas asfálticas (Ceratti; Bernucci; Soares, 2015). Historicamente materiais secundários têm sido utilizados para restauração da superfície de pavimentos desde o início do século XX, mas

a reutilização do resíduo de material asfáltico para este fim só se difundiu amplamente após o início dos anos 1970, com a elevação dos preços de ligante asfáltico, resultantes do embargo do petróleo contra os países árabes. Produtores de asfalto reagiram à situação aumentando a atenção ao desenvolvimento de métodos que pudessem ser utilizados para reciclagem do material asfáltico envelhecido, com intuito de diminuir os volumes necessários de asfalto, para reduzir custos de preparação da mistura asfáltica (Lyubarskaya et al, 2017).

A reciclagem de pavimentos é realizada após avaliação estrutural e funcional do pavimento, e tem o intuito de eliminar camadas com potencial de reflexão de trincas (Bernucci et al, 2008). O material fresado, também conhecido como RAP, provém de pavimentos que já tenham alcançado sua vida útil, e por isso passaram por processos de demolição ou fresagem, e consiste em compósito formado por agregados, ligante asfáltico e mastique (Tebaldi et al, 2018). Ao material fresado utilizado para reciclagem podem ser adicionados agentes rejuvenescedores, novos agregados para correção granulométrica e emulsões ou espuma de asfalto, e a mistura pode ser feita em campo logo após a fresagem ou em usina (Bernucci et al, 2008). Dentre os principais benefícios da reciclagem, os autores apontam a reutilização dos materiais constituintes, desde os agregados até materiais mais nobres como o ligante asfáltico, a conservação de energia e a preservação ambiental.

A obtenção do material para reciclagem é realizada através de dois possíveis processos: a fresagem do material por máquinas fresadoras, ou remoção da camada seguida de britagem do material. O material resultante do processo de fresagem é mais uniforme e está pronto para uso, enquanto que o material resultante do outro processo precisa um esforço maior afim de garantir que o material asfáltico não esteja contaminado por solo.

A reciclagem de misturas asfálticas pode ser em usina ou *in situ* quando classificada quanto ao local onde o processo é de fato realizado. O tipo de reciclagem também pode ser diferenciado de acordo com a temperatura aplicada no processo, sendo utilizados os termos: reciclagem a quente, reciclagem morna e reciclagem a frio.

Na reciclagem de pavimentos em usina (*in-plant asphalt recycling*) o RAP é misturado com novo ligante na usina de asfalto, que geralmente necessita pequenos ajustes para a realização da mistura reciclada, este tipo de reciclagem é comumente aplicada mais perto de áreas urbanas, em função dos altos custos necessários com transporte, e o material asfáltico recuperado precisa ser estocado de maneira uniforme em diferentes pilhas, e precisam ser considerados os cuidados

com manutenção necessários. Neste tipo de reciclagem antes da mistura o material deve ser seco afim de evitar problemas com o aquecimento posterior a elevadas temperaturas, e as usinas devem ter dispositivos instalados para minimizar o envelhecimento do ligante e emissões indesejadas (Karlsson e Isacsson, 2006).

A reciclagem *in situ* (*in-place asphalt recycling*) pode ser realizada de maneira superficial ou profunda, podendo ser também reciclagem a frio. Neste tipo de processo a necessidade de transporte e armazenamento são minimizadas, e os processos podem variar entre remistura ou repavimentação. A remistura é um processo no qual a superfície do pavimento é fresada, novos materiais são adicionados e misturados e após a mistura é compactada. Já na repavimentação não tem adição de ligante novo, o pavimento é aquecido, fresado, algum rejuvenescedor é aplicado, o material é espalhado e compactado. Este segundo processo recebe aplicação de uma nova camada sobreposta (Karlsson e Isacsson, 2006).

A reciclagem de pavimento asfálticos pode ser efetuada quente ou morna, com utilização de cimento asfáltico de petróleo (CAP), e a frio, com utilização de emulsão asfáltica de petróleo (EAP) ou espuma de asfalto. E a realização pode ser feita em usina estacionária, usina móvel ou *in situ* (a frio) (Ceratti; Bernucci; Soares, 2015). De acordo com o FHWA (1997), a Tabela 1 permite selecionar a melhor alternativa de reciclagem a ser utilizada de acordo com o tipo de defeito apresentado pelo pavimento. É possível perceber que a reciclagem a quente pode ser adotada para corrigir a maioria dos defeitos apresentados.

No Brasil a utilização de reciclagem a quente de pavimentos é destacada para utilização como método de restauração das camadas de rolamento das rodovias, aumentando principalmente a eficiência em custos e energética na sua utilização quando comparado a outros métodos de restauração ou construção, como por exemplo na economia com materiais novos e menores distâncias de transporte (DNIT, 2006).

No que diz respeito ao desempenho, as duas maiores preocupações são a qualidade da mistura entre ligante virgem e envelhecido, especialmente para altos teores de RAP, e o enrijecimento da mistura com maiores quantidades de RAP com trincamento resultante (FHWA, 2011).

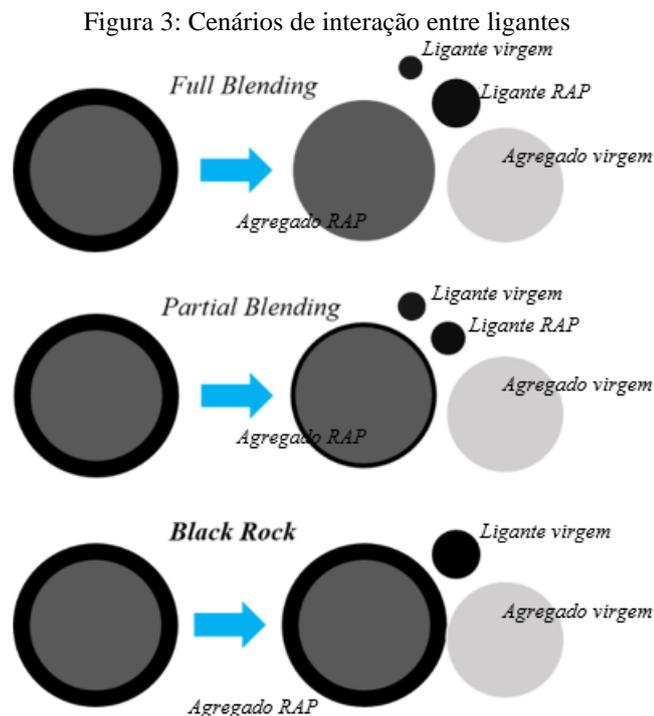
Tabela 1: Guia para seleção de método de reciclagem

Tipo de falha no pavimento	Reciclagem a quente	Reciclagem a quente <i>in situ</i>	Reciclagem a frio	<i>Full Depth</i>
Defeitos na superfície				
<i>Desagregação</i>	X	X		
<i>Exsudação (Alisamento)</i>	X	X		
<i>Escorregamento</i>	X	X		
Deformação				
Corrugação	X	X		
Deformação superficial	X	X		
Deformação profunda	X		X	X
Trincamento por carga				
Couro de Jacaré	X		X	X
Longitudinal	X	X	X	X
Junta	X		X	X
Escorregamento	X	X		
Trincamento não associado ao carregamento				
Bloco	X		X	X
Junta longitudinal	X	X		
Transversal (térmico)	X		X	X
Reflexão	X		X	X
Remendo de Manutenção				
Spray	X		X	X
<i>Skin</i>	X		X	X
<i>Buraco</i>	X		X	X
<i>Deep</i>	X		X	X
Problemas com Base/Subleito				X
Rugosidade				
Desnível em geral	X	X		
Consolidação	X	X		X
<i>High spots (corrugação)</i>	X	X		X

Fonte: adaptado de FHWA, 1997

Ao trabalhar com reciclagem a quente existem duas teorias extremas que podem ser consideradas no que tange a interação entre o ligante envelhecido do fresado e o ligante virgem adicionado na mistura. A primeira é conhecida como *black rock* (BR) e considera que o material fresado funciona simplesmente como agregado, contribuindo para o esqueleto pétreo da mistura final, e o ligante presente no fresado não interage de forma alguma com o ligante virgem adicionado, ou seja, o material reciclado contribui apenas para a estabilidade da mistura e

resistência a deformação permanente, sendo necessário que se adicione ligante asfáltico virgem que seria o único responsável pela coesão do material. A segunda teoria é chamada de *full blending* (FB) e considera que o ligante envelhecido contido no RA se mistura completamente com o ligante asfáltico novo adicionado na mistura, essa mistura é entendida como uma interação completa entre as duas partes, gerando economia maior de ligante asfáltico virgem, o que incentiva adoção de tal hipótese (Shirodkar et al, 2011; Zaumanis & Mallick, 2015; Ding, Huang & Shu, 2016, Gaspar et al, 2017).

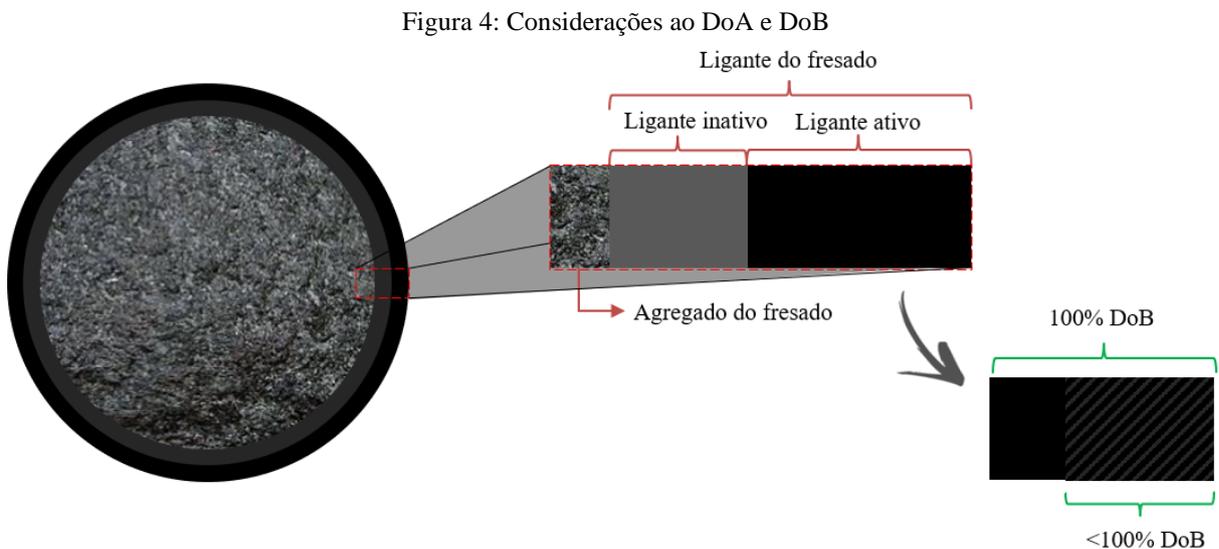


Em um terceiro cenário, outra teoria de comportamento que também pode ser considerada para esta interação é a ocorrência de *partial blending* (PB), uma mistura parcial dos ligantes quando interagidos, algo entre os fenômenos extremos de *black rock* e *full blending*, que segundo diversos autores, é o cenário que mais se aproxima do que acontece na prática (Shirodkar et al, 2011; Lo Presti et al, 2016; Bowers, 2014; Sreeram et al, 2018; Gaspar et al, 2018). Sendo assim, assumir alguma das teorias extremas resultaria em pavimentos de baixa performance. Quando considerado BR a mistura conta com ligante em excesso, o que prejudicaria seu desempenho quanto à deformação permanente, e quando considerado FB a mistura resultante possui menos ligante do que o realmente necessário, o que reduziria seu desempenho no comportamento aos esforços de fadiga (Shirodkar et al, 2011; Zaumanis & Mallick, 2015; Ding, Huang & Shu, 2016, Gaspar et al, 2017). A Figura 1, composta pela autora para simplificar o

entendimento sobre os fenômenos, apresenta de forma ilustrativa as hipóteses de interação descritas para melhor compreensão.

2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA RECICLAGEM A QUENTE

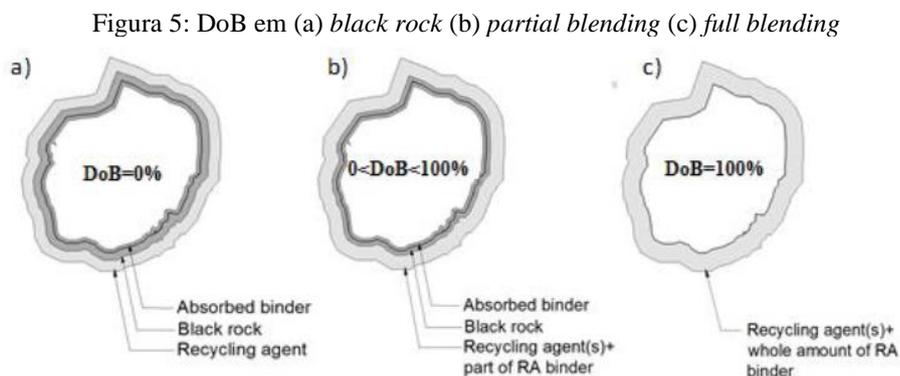
Dois parâmetros bastante expressivos no estudo de reciclagem a quente são: *Degree of Binder Activity (DoA)* e *Degree of Blending (DoB)*. DoA representa uma característica do material fresado, determina a quantidade de ligante envelhecido presente no RAP que pode ser considerado “ativa” na formulação da nova mistura asfáltica a quente, (Figura 4: Considerações ao DoA e DoB) Ou seja, no material fresado o total de ligante asfáltico (que pode ser determinado pelos métodos de extração) se diferencia em duas partes, a parte inativa, que se mantém inerte em termos de mistura com novos componentes da mistura, e a parte ativa, disponível para interagir com os novos componentes enquanto recurso de ligação entre os materiais, que determina em si o DoA.



Fonte: Autora.

Enquanto DoB é definido como sendo a proporção de ligante do RAP que se mistura com o ligante asfáltico virgem adicionado à mistura, podendo também ser entendido como um indicador para saber a extensão da contribuição do ligante do fresado na mistura de ligante resultante da mistura asfáltica reciclada (Lo Presti et al, 2019).

A Figura 5 ilustra como o DoB pode ser facilmente explicado ao relacioná-lo com as teorias explicadas anteriormente: num cenário de BR DoB é 0%, sem apresentar interação do ligante envelhecido do RAP; já num cenário FB DoB é de 100%, com todo ligante ativo do fresado participando da mistura final de ligantes.



Fonte: adaptada de Lo Presti *et al* (2019).

Ainda existe muita variabilidade de termos utilizados para definir essas características, DoB é também encontrado em referências como *Blending Efficiency*, *Degree of Partial Blending*, *blendind effect* (Huang et al, 2005; Coffey et al, 2013; Bowers et al, 2014). Já a utilização de DoA não é muito recorrente na bibliografia encontrada, entende-se se tratar de um parâmetro ainda mais recentemente tratado que o DoB, poucos trabalhos encontrados tratam sobre ele e ainda utilizam termos como *binder transfer* e *mobilisation* (Sreeram et al, 2018; Shirodkar et al, 2011). Recentemente Lo Presti et al (2019) estabelecem nomenclaturas precisas a serem usadas na academia para padronização dos termos e suas definições.

Os autores destacam, conforme vastas pesquisas reproduzidas, alguns dos fatores cuja consideração é fundamental no processo de produção e previsão de desempenho de misturas asfálticas recicladas. Os fatores apontados incluem: (a) variabilidade dos materiais fresados por causa da sua heterogeneidade; (b) falta de especificações para caracterização e classificação; (c) falta de métodos para apurar de maneira mais precisa as propriedades do ligante envelhecido; (d) desconhecimento do processo como um todo quando da incorporação de polímeros; (e) incertezas para adaptação dos procedimentos de projetos de misturas; (f) falta de conhecimento sobre os mecanismos envolvidos ao utilizar-se na mistura componentes como agentes rejuvenescedores (Lo Presti et al, 2019). Estes fatores devem ser entendidos e contornados para que se tenha maior conhecimento e controle das misturas asfálticas produzidas

a partir do processo de reciclagem, visando redução da variabilidade entre misturas, e entre processos produtivos adotados em pesquisas e produções de maior escala.

Além disso, também são apontados alguns parâmetros que comprovadamente influenciam no DoB, contribuindo diretamente nas propriedades do ligante resultante na formulação final da mistura: (a) Temperatura de mistura; (b) Tempo de condicionamento; (c) Tempo de mistura; (d) Teor de material fresado incorporado na mistura; (e) Forma dos agregados virgens; (f) Utilização de aditivos; (g) Propriedades do ligante virgem; (h) Quantidade de filler; (i) Absorção do agregado; (j) Reaquecimento; (l) Textura dos agregados virgens (Lo Presti et al, 2019). Tais fatores também necessitam atenção no processo de reciclagem do material, para maior controle da variabilidade e desempenho das misturas produzidas.

Entende-se que os parâmetros como DoA e DoB têm potencial para serem quantificados, e que uma vez que forem de fato determinados possam explicar de maneira mais acurada características encontradas nas misturas recicladas. Dessa maneira poderão contribuir para determinação e normatização de procedimentos, definição de materiais virgens a serem adicionados e entendimento mais pontual a respeito do comportamento mecânico das misturas e suas previsões. O parâmetro DoA influencia diretamente o teor de ligante de projeto das misturas asfálticas recicladas, sendo fator de suma importância quando considerada a economia de ligante asfáltico virgem resultante. Quanto maior o DoA espera-se que menor quantidade de ligante virgem seja necessário para suprir as características volumétricas necessárias, já quanto menor o DoA maior a necessidade de ligante virgem para atender às necessidades do material.

O DoA influencia também a propriedade da mistura resultante entre ligantes asfálticos, permitindo que mais ou menos ligante asfáltico seja aproveitado como composição do material de ligação das misturas, contribuindo de maneira direta na determinação de DoB. No entanto, DoA é uma característica do material fresado, o que indica uma relação de mão única quando correlacionado com DoB, ou seja, DoA influencia DoB mas independe deste.

O parâmetro DoB é o que tem capacidade de expressar grande parte dos resultados mecânicos obtidos nos ensaios de desempenho das misturas asfálticas. Por ser uma representação da quantidade de ligante oxidado presente na mistura de ligantes, suas características reológicas passam a ter influência significativa no comportamento reológico das misturas asfálticas também.

2.3. AGENTES DE RECICLAGEM

Os impactos causados pela variação de temperatura e clima que atingem os pavimentos em serviço mudam significativamente as características dos ligantes asfálticos, reduzindo propriedades como penetração e ductilidade, e aumentando ponto de amolecimento e viscosidade. Em decorrência da oxidação por presença de oxigênio (principal reação química que ocorre no envelhecimento do ligante) somada às variações de temperatura durante a vida do pavimento, o ligante sofre mudança nos seus componentes químicos, com a transformação contínua de aromáticos em asfaltenos, que são responsáveis pelo endurecimento do material e maior rigidez resultante do processo de envelhecimento. O rejuvenescimento é o processo inverso do envelhecimento, e os rejuvenescedores são projetados e dosados para compensar a transformação dos leves aromáticos em asfaltenos (Liu, et al, 2019).

Os métodos para compensar o envelhecimento e rigidez do ligante, garantindo performance adequada do pavimento, incluem utilização de rejuvenescedores ou aditivos, uso de ligante virgem com PG (do inglês *Performance Grade*) mais macio e aumento no conteúdo total de ligante da mistura (Isaks et al, 2015). O rejuvenescedor deve restaurar as características do ligante a um nível apropriado para o propósito de construção do novo pavimento e atendimento do desempenho necessário, e ao mesmo tempo otimizar as características químicas no que diz respeito a durabilidade do material (Karlsson e Isacsson, 2006).

Agentes de reciclagem são definidos como famílias de aditivos adicionados na produção da mistura asfáltica reciclada para melhorar as propriedades destas. Eles podem funcionar como rejuvenescedores ou lubrificantes. Apesar da terminologia utilizada geralmente ser a mesma existe diferença entre os processos de amolecimento do ligante asfáltico e rejuvenescimento do mesmo, (Lo Presti et al, 2019; Sabhafer e Hossain, 2017)

Rejuvenescedores restauram as propriedades químicas e físicas do ligante oxidado do RAP, são responsáveis por restaurar algumas das propriedades que o material reciclado possuía antes da sua vida de serviço, através do reestabelecimento da razão original entre asfaltenos e maltenos. Este tipo de agente pode ser o responsável por permitir a utilização de 100% de RAP em misturas asfálticas recicladas. Já os “lubrificantes”, responsáveis pelo efeito de amolecimento do ligante oxidado, facilitam a ativação do ligante envelhecido por redução da viscosidade, permitem também menores temperaturas de produção, como no processo de misturas mornas

(Lo Presti et al, 2019; Lo Presti et al, 2016; Sabhafer e Hossain, 2017; Karlsson e Isacsson, 2006).

Hoje, no mercado, de acordo com Silva & Farias (2018), os principais produtos disponíveis para este fim são os rejuvenescedores a base de alcatrão e a base de óleo de xisto. Esses que têm como base o óleo de xisto se subdividem de acordo com a concentração do óleo: AR-1, AR-5, AR-25, AR-75, AR-250 e AR-500 (quanto maior o número da classificação, menor a concentração de óleo de xisto) e são fornecidos pela empresa brasileira de petróleo (Petrobras).

Os rejuvenescedores buscam devolver o ligante envelhecido a um estado no qual o RAP possa ser reutilizado na produção de novas misturas asfálticas a quente com capacidade para suportar uma nova vida útil do pavimento. Estudos comprovam que o pavimento rejuvenescido, com até 30% de RAP pode ter a mesma capacidade de performance dos pavimentos construídos com misturas asfálticas virgens (Liu, et al, 2019; Zaumanis, Cavalli e Poulikakos, 2018).

Existem quatro propósitos básicos para a utilização de agentes de reciclagem (FHWA, 1997):

- a) Restaurar as características do ligante asfáltico envelhecido a um nível apropriado de consistência para propósito construtivo e uso final da mistura;
- b) Restaurar na mistura a quente reciclada suas características ótimas para durabilidade;
- c) Prover ligante adicional suficiente para recobrimento dos agregados virgens adicionados a mistura reciclada;
- d) Fornecer ligante adicional suficiente para satisfazer os requerimentos para dosagem da mistura.

O mecanismo do processo de difusão do agente rejuvenescedor se resume em quatro etapas: inicialmente o AR forma uma camada de baixa viscosidade ao redor do agregado do RAP encoberto pelo ligante oxidado; em seguida o AR inicia a penetração no ligante envelhecido, reduzindo a quantidade de AR em seu estado natural que cerca o material, e amolecendo o ligante do RAP; o processo de penetração do AR no ligante do RAP continua, com redução de viscosidade das camadas de ligantes mais internas (próximas ao agregado) e aumento da viscosidade das camadas mais externas do ligante; para finalizar, após um certo período de tempo alcança-se equilíbrio de difusão no filme de ligante reciclado que envolve o agregado (Carpenter e Wolosick, 1980 *apud* TRB, 2018; Mohammadafzali et al, 2018; Karlsson e Isacsson, 2006). Os autores Carpenter e Wolosick (1980) confirmaram tal processo de difusão

a partir de recuperação de ligante num processo por etapas e verificação da propriedade de penetração do ligante asfáltico.

É de extrema importância se ater as etapas de difusão do AR no ligante do RAP, justamente porque em casos de a mistura acontecer de maneira incompleta, ocorre a formação de uma micro camada de baixa viscosidade ao redor do RAP, reduzindo propriedades de ligação entre os materiais componentes da mistura asfáltica, o que pode prejudicar diretamente a performance da mistura.

Ficam estabelecidos alguns parâmetros que influenciam diretamente na performance do pavimento quando da utilização de AR: a) dosagem ótima do AR; b) homogeneidade do RAP; c) distribuição homogênea do AR; d) boa difusão por parte do AR no ligante envelhecido do RAP; e) boa mistura entre AR e ligante do RAP (Zaumanis, Cavalli e Poulidakos, 2018).

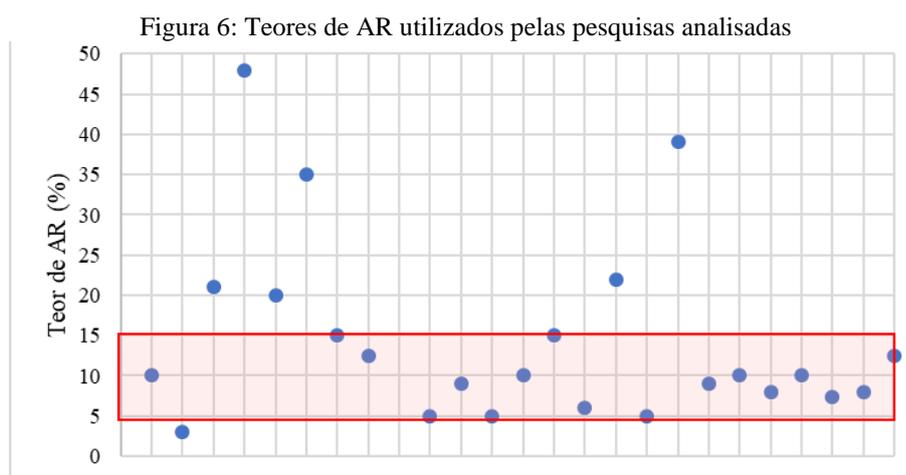
Na produção de misturas asfálticas recicladas a quente com utilização de agentes rejuvenescedores, pesquisas recentes buscam descobrir a influência do aditivo nas mais variadas configurações de elementos, com variações nos materiais até variações no procedimento de utilização do AR e produção das misturas. Os estudos vão de análises realizadas em misturas de ligantes a misturas produzidas em usina, os teores de fresados variam de 10 a 100% e são investigados até quatro tipos de agente de reciclagem no mesmo estudo.

Ainda não há convergência na bibliografia atual a respeito de como realizar a dosagem do AR, alguns autores determinam a quantidade do rejuvenescedor baseados nas características reológicas esperadas para o ligante final da mistura reciclada de acordo com as classificações de PG definidas pela metodologia Superpave (Mahoammadafzali et al, 2019; Arafat and Wasiuddin, 2019; Shen, Armikhanian and Miller, 2007; Kaseer et al, 2019). Outros autores buscam na mistura de ligante final características como ponto de amolecimento, penetração e viscosidade, parâmetros mais convencionalmente utilizados para classificar o tipo de ligante asfáltico (Zaumanis, Cavali and Poulidakos, 2018; Chen et al, 2015). Há ainda os que apenas seguem a recomendação do fabricante para sua utilização, como Cooper Jr. et al (2017).

Das pesquisas analisadas apenas uma utilizava o teor de AR em função do peso total da mistura e não em função do peso de ligante virgem no RAP, sendo com estudo de misturas provenientes da técnica de *in-place recycling*. Dois dos estudos trabalham a variação do AR na determinação do teor ótimo a ser utilizado, numa delas, Chen, Lee and Lin (2018) chegam à conclusão de que 30% de AR já consegue alcançar características do ligante virgem. Na outra pesquisa Forton et

al (2020) utilizaram teores de 5, 10 e 15% do aditivo rejuvenecedor e apontam que 10% de AR faz a mistura de ligante alcançar valores mais próximos do ligante virgem.

Os demais estudos encontrados se referem ao teor de AR dosado em função do peso total de ligante do fresado nas misturas recicladas, e apresentam valores bastante variados para o teor de aplicação do rejuvenecedor. Conforme pode ser observado na Figura 6 (que mostra a variabilidade de teor de AR - eixo das abcissas - em diferentes pesquisas – eixo das ordenadas), a grande maioria encontra teores na faixa de 5 a 15% de AR. Certamente algumas questões principais giram ao redor dos dados apresentados, as pesquisas podem apresentar variações que influenciariam as características das misturas resultantes, podendo ser a respeito do tipo de ligante asfáltico envelhecido, tipo de agente rejuvenecedor utilizado, forma e local de aplicação do aditivo na fabricação das misturas, para citar algumas. A Tabela 2 apresenta um resumo dos estudos analisados.



Fonte: Autora.

Tabela 2: Quadro resumo de pesquisas com utilização de AR

Autores	Teores de RAP	Uso AR	Teor AR	sobre peso do
Shen, Armikhanian and Miller, 2007	30 a 50% dependendo da característica do ligante final	1 tipo de AR	12.5	ligante
Rui, xiao-ming and hai-jun, 2007	30 a 70%	1 tipo de AR	10%	ligante

Chen et al, 2015	10 a 100%	2 tipos de AR e 2 ligantes	AR5(30%), AR75(50%), AC5(80%), AC10(90)	ligante
Lo Presti et al, 2016	30, 60 e 90%	1 tipo de AR	20%	ligante
Zaumanis, Cavali and Poulidakos, 2017	100%	1 tipo de AR	3%	ligante
Cooper Jr. et al, 2017	15% RAP e 5% RAS	1 AR e 1 ligante	5%	RAP e RAS
Sabhafer and Hossain, 2017	100%	1 tipo de AR	1,25%	mistura
Purdy et al, 2017	50%	1 tipo de AR	8%	ligante
Hossain, Rashid and Roy, 2017	25, 40 e 60%	1 tipo de AR	12.50%	ligante
Mahoammadafzali et al, 2018	100%	2 tipos de AR	21 a 48%	ligante
Chen, Lee and Lin, 2018	100%	1 tipo de AR	0 a 100%	ligante
Zaumanis, Cavali and Poulidakos, 2018	100%	1 tipo de AR	7.30%	ligante
Liu et al, 2019	100%	3 tipos de AR	10%	ligante
Arafat and Wasiuddin, 2019	32%	2 tipos de AR	35 e 15%	ligante
Kaseer et al, 2019	22 e 31%	1 tipo de AR	1.2 5.5 e 9%	ligante
Forton et al, 2020	0, 25, 50, 75 e 100%	1 tipo de AR	5, 10 e 15%	ligante
Zhang et al, 2020	60	3 tipos de AR e 1 ligante	39, 9, 10 e 8%	ligante
Li and Ma	30, 40, 50, 60, e 70%	2 tipos de AR	6 e 22%	ligante

Um estudo realizado por Silva e De Faria (2018), no Brasil, que busca analisar química e ambientalmente as misturas asfálticas rejuvenescidas, realiza análise dos agentes rejuvenescedores RejuvaSeal (a base de óleo de alcatrão), AR-5, AR-250 e AR-500 (a base de óleo de xisto) ao serem aplicados na reciclagem a quente de um material fresado, todos nos teores de 15, 20 e 25% de AR sobre o peso de ligante do RAP. Ao comprovar que a reciclagem a quente com rejuvenescimento é técnica e ambientalmente satisfatória para a pavimentação, os autores também apontam com base na análise química que o AR-5 no teor de 20% apresenta

os melhores resultados na capacidade de devolver ao ligante envelhecido as suas características iniciais.

Figura 7: Resumo das comparações entre locais de aplicação do AR

Local de adição	Ambiental		Operacional		Qualidade		
	Segurança operacional e risco de segurança	Emissões	Facilidade de integração na usina	Flexibilidade de dosagem do AR	Precisão da dosagem do AR	Distribuição homogênea do AR	Eficácia do AR/Desempenho da mistura
Adição de rejuvenescedor antes do tambor secador							
1 Correia trituradora do RA	X	X	-	-	X	-	-
2 Estocagem do RA	X	X	-	-	X	X	-
3 Esteira de transporte do RA	O	O	O	O	O	O	O
4 Rampa de entrada do RA	-	X	-	-	-	-	-
Adição de rejuvenescedor depois do tambor secador							
5 Rampa de saída do secador	O	O	O	O	O	O	-
6 RA scale	-	-	-	-	-	X	-
7 Rampa do RA	-	-	-	-	-	X	-
8 Misturador	O	O	O	O	O	O	O
Adição de rejuvenescedor no ligante virgem							
9 Linha do ligante	-	-	-	-	-	-	X
10 Tanque do ligante	-	-	-	-	-	-	X
Legenda:	O Sem risco		Mais fácil		Maior desempenho		
	O Mínimo risco		Simples		Bom desempenho		
	* Aceitável		Aceitável		Desempenho aceitável		
	X Inaceitável		Não possível		Desempenho inaceitável		
	- Não avaliado		Não avaliado		Não avaliado		

Fonte: adaptado de Zaumanis, Cavali e Poulidakos, 2017

Ao tentar determinar o melhor local de aplicação para os agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas, Zaumanis, Cavali e Poulidakos (2017) fazem um estudo em escala real de produção ao explorar dez potenciais locais para adição de AR em usina, avaliando parâmetros como segurança ambiental, operação da usina e desempenho do material. Os locais de adição se diferenciam em três categorias: antes do tambor secador, depois do tambor secador e no ligante virgem. Com levantamento de prós e contras de cada um dos lugares, a ordem de prioridade dependeu de alguns critérios: segurança para meio-ambiente e trabalhadores, preferência pelo contato direto do AR com ligante do fresado, e dosagem precisa e distribuição homogênea do AR. Reduzindo a três opções de locais para aplicação do produto: esteira de transporte do

fresado, rampa de saída do secador, misturador. As conclusões analíticas a respeito dos pontos de aplicação de AR possíveis, e os resultados experimentais obtidos no estudo, são resumidos na Figura 7: Resumo das comparações entre locais de aplicação do AR. Os autores concluem que dentre os locais avaliados, o local de aplicação não tem diferença estatística na difusão do AR, e a diferença de teor de ligante que pode ocorrer entre as amostras dos diferentes locais é estritamente em função da variabilidade do fresado estocado.

2.4. DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Diversas pesquisas foram realizadas com o passar do tempo ao redor do mundo afim de conseguir determinar a real influência dos materiais asfálticos fresados quando aplicados com a técnica de reciclagem a quente para construção de novas camadas de revestimento asfáltico.

De maneira geral algumas abordagens têm sido utilizadas afim de tentar contornar a variação indesejada de desempenho em decorrência da maior rigidez da mistura, causada pela adição do RAP. As principais abordagens são: a) limitação da utilização do material reciclado nas misturas; b) aplicação de ligantes mais macios (com PG inferior ao do ligante presente no fresado); c) aumentar a densidade da mistura asfáltica; d) utilização de agentes de reciclagem (ou rejuvenescedores) no projeto de dosagem, (TRB, 2018).

As pesquisas encontradas trabalham com teores considerados elevados de RAP (>25%), e analisam o desempenho dos materiais das mais diversas maneiras.

Xiao, Amirkhanian e Wu (2010) estudaram o desempenho à fadiga de misturas asfálticas com duas fontes de RAP distintas e testaram ligantes virgens com diferentes PG, e concluem que a utilização de teores de RAP até 30%, não causa variação significativa no comportamento das misturas asfálticas. Já a mudança de PG com redução de um grau do ligante virgem adicionado na mistura com 30% ajuda a reduzir de maneira significativa a rigidez da mistura apresentando melhores resultados de fadiga em relação a mistura sem redução de PG, mas ainda a diferença não atinge nível de significância de 95%. Para Manan, Islam e Tarefder (2015) misturas com 35% de RAP sem variação no ligante virgem adicionado têm redução na vida de fadiga da mistura, mesmo que quando da análise do estudo de ligantes a vida de fadiga tenha aumentado. É possível que tal comportamento seja explicado pela divergência da mistura entre ligante envelhecido e ligante virgem nos estudos realizados (ligante vs. mistura asfáltica). Islam, Ahmed e Hossain (2018), com RAPs de três fontes diferentes nos teores de 20, 30 e 40%,

determinam que o acréscimo de RAP nas misturas exige aumento da espessura de camada dimensionada para o material, porque apresentam aumento no trincamento por fadiga da camada, enquanto a variação de resultados para deformação permanente não é significativa. No estudo ao serem apresentadas as curvas características de módulo dinâmico das misturas com RAP, percebe-se que o aumento de teor de RAP não acarreta em um padrão de variação de E^* pela frequência, ou seja, não necessariamente o aumento do fresado é proporcional à variação de E^* nas frequências apresentadas. Islam *et al.* (2014) afirmam que 35% de RAP não interferem no dano causado por umidade, e que o potencial de deformação permanente do material realmente é reduzido, assim como a resistência à tração, quando da utilização de RAP nas misturas.

Centofante (2016) e Luzzi (2019) estudaram misturas com teores de 10, 20 e 30% de RAP, e constatam que a utilização do material fresado aumenta a rigidez das misturas, com resultados maiores para resistência à tração e módulo de resiliência. Centofante (2016) aponta maiores valores de módulo dinâmico com menores valores de ângulo de fase, sendo que não necessariamente o aumento de E^* é proporcional ao aumento do teor de RAP utilizado. Enquanto para o ensaio de *Flow Number* o aumento do resultado é relativo ao aumento de RAP. Já para Luzzi (2019) tanto para o ensaio de *Flow Number* quanto para o ensaio de fadiga, o aumento de RAP reduz os valores resultantes, apresentando redução da vida do pavimento quanto às duas características.

Visintine, Khosla e Tayebaldi (2013) através de previsões por software concluem que maiores teores de RAP até 40% nas misturas asfálticas aumentam a vida de fadiga e de deformação permanente, com menores níveis de deformação crítica por fadiga e deformações por compressão menores, enquanto a redução de PG do ligante asfáltico reduz ambos os parâmetros analisados. Já Coffey et al (2013) que, a partir de material coletado de três usinas diferentes com 25% de RAP, buscam avaliar a variação de comportamento através da variação de qualidade dos RAPs utilizados e variação do DOB das misturas, concluem que mesmo com maiores alturas da camada a diferença de resultado prevista para comportamento a deformação permanente é mínima independente das variáveis consideradas. No estudo também é possível perceber que fontes de fresado de diferentes origens tem curvas características de módulo dinâmico com diferentes padrões de comportamento entre *full blending* e o DoB real da mistura.

Quando abordado o uso de teores ainda maiores de RAP (em até 50%) Izaks et al (2015), através dos ensaios de Simulador de Tráfego Hamburgo e fadiga em viga 4 pontos, confirmam o

aumento da resistência a deformação permanente, atendendo as recomendações, e afirmam constância no comportamento a fadiga entre misturas de 30 e 50% de fresado, uma vez que as alterações observadas não foram significativas. Zhang e Muhunthan (2017) também comprovam através dos ensaios de Módulo Dinâmico e *Creep Compliance* o aumento de rigidez das misturas com o aumento do material reciclado.

Bankowski (2018) afirma que as amostras com 50% de RAP mantiveram vida de fadiga no ensaio de fadiga em viga 4 pontos, e que os resultados em relação a mistura de referência foram levemente menores em virtude da diferença de propriedades do ligante envelhecido do RAP sem presença de polímeros e do ligante virgem modificado por polímeros.

Na esfera de utilização de agentes rejuvenescedores nas misturas recicladas a quente, Pradyumna, Mittal e Jain (2013) mesmo com baixa utilização de material fresado (20%) optaram pela aplicação de AR e comprovaram melhor desempenho em todas as propriedades analisadas. Os ensaios aplicados pelos autores consistem em: Dano por umidade pela estabilidade Marshall retida e resistência a tração indireta, *Wheel tracking test*, *Dinamic Creep test*, fadiga em viga 4 pontos e módulo de resiliência. Os autores relatam que a mistura com RAP apresenta menor susceptibilidade à umidade, menor acúmulo de dano no ensaio de *creep* dinâmico, menor altura de deformação no ensaio de deformação permanente, aumento da vida de fadiga em relação à mistura virgem e aumento da rigidez no ensaio de módulo de resiliência.

Lu et al (2018) estudaram misturas de até 50% com utilização de agentes de reciclagem do tipo agente rejuvenescedor (AR) e agente de mistura morna (WMA). Os autores constatam que a resistência a deformação permanente melhora com aumento de RAP e de WMA, e reduz com utilização do AR. Concluem também que o acréscimo do RAP nas misturas aumenta a resistência a tração e reduz vida de fadiga, enquanto o uso dos agentes WMA e AR melhoram a vida de fadiga e as propriedades dos materiais a baixas temperaturas. É possível que tal diferença entre agentes de reciclagem no comportamento a deformação permanente aconteça justamente porque o aditivo de mistura morna ao reduzir a viscosidade do material permite uma melhor mistura a partir de maior ativação do ligante envelhecido, e o ligante envelhecido ao misturar com o ligante virgem resulta em uma mistura entre ligantes com maior rigidez, enquanto que o uso de AR recupera o material, restaurando as propriedades químicas do mesmo, permitindo uma mistura entre ligantes menos rígida.

Suzuki (2019) estudou misturas com até 65% de RAP, sendo que as misturas com até 25% não contaram com pré-aquecimento do fresado, e misturas acima desse teor tiveram pré-aquecimento no processo de moldagem dos materiais. A autora constata que o aumento de fresado nas misturas aumenta a rigidez no ensaio de MR, e o uso de AR reduz esse valor, enquanto que no ensaio de módulo dinâmico nas menores frequências os baixos teores de RAP (que não foram aquecidos) são menos rígidos, enquanto maiores teores de RAP (pré-aquecidos) são mais rígidos e ainda misturas com mais RAP têm maior FN, uso de AR reduz os resultados obtidos. A utilização de maior teor de RAP (50%) na fadiga teve resultado semelhante à referência e o uso de AR ainda melhora o material nessa propriedade.

Ao utilizarem misturas asfálticas produzidas com 100% de RAP, Zaumanis, Cavalli e Poulidakos (2018) definem que o RAP aumenta a rigidez do material, melhorando a resistência à deformação permanente, e o aumento de 0,5% no teor de ligante virgem utilizado não causa variação significativa na rigidez de fratura. Em contraponto Sabhafer e Hossain (2017), que utilizaram materiais de três projetos distintos (100% RAP) com e sem utilização de AR, apontam que a utilização de material fresado reduziu a rigidez das misturas, e que apenas um dos materiais utilizados com AR apresentou melhoria na performance em relação ao mesmo material sem AR, tanto no comportamento à deformação permanente quanto no comportamento à fadiga.

A Tabela 3 lista uma breve síntese, de forma esquematizada, dos resultados e descobertas dos estudos conduzidos com a utilização de RAP em diversos teores (com ou sem utilização de agente de reciclagem) na aplicação em misturas asfálticas recicladas a quente.

É possível perceber que há tempos se estuda a possibilidade de aplicação de teores considerados altos de RAP (>25%) nas misturas asfálticas recicladas a quente. No entanto ainda existem grandes divergências na preparação dos materiais e métodos de ensaios utilizados para determinação das características de desempenho das amostras.

Deve ser também observado que a maneira como os materiais interagem entre si interferem diretamente nas propriedades de mistura e combinação dos componentes da mistura asfáltica final, e dessa maneira têm sua parcela de contribuição nos resultados de desempenho apresentados pelas misturas estudadas.

Tabela 3: Quadro resumo de pesquisas com utilização de RAP

Referência	Teores de RAP (%)	Uso AR	Ensaios	Resultado
Xiao, Amirkhanian & Wu (2010)	0, 15, 25, 30	Não	Fadiga 4 pontos	variação de quantidade do RAP não causa variação significativa, mas mudança do grau PG do LV para 30% causa, mas não a um nível de significância de 5%. Reduzir Grau PG diminui rigidez de fluência.
Visintine, Khosla & Tayebali (2013)	15, 30 e 40	Não	Previsão de comportamento por <i>software</i>	Altos teores de RAP aumentam E*. O aumento de RAP aumenta a resistência à fadiga e aumenta a deformação permanente. Enquanto reduzir o PG do LV reduz a vida de fadiga e a de deformação permanente
Coffey et al. (2013)	25	Não	Estudo da variação de qualidade do RAP, e variação do DoB. Previsão de comportamento através do <i>Pavement ME design</i>	A variação de E* com diferentes condições de DoB não segue padrão entre misturas com diferentes fontes de fresado; Com maiores alturas da camada, diferença entre <i>partial blending</i> e <i>full blending</i> aumenta; variação de resultado previsto pra deformação permanente é mínima
Praduymna, Mittal & Jain (2013)	20	Sim	Dano por Umidade (Estabilidade Marshall retida e RTI), <i>Wheel tracking test</i> , Creep dinâmico Test, Fadiga 4 pontos, MR	Utilização de RAP melhora todas as propriedades das misturas estudadas
Islam et al. (2014)	0 e 35	Não	Módulo dinâmico e Resistência à tração por compressão diametral	E* aumenta em menores frequências; Não interfere no dano por umidade; potencial de deformação permanente diminui; tração indireta diminui, e também reduz a capacidade de deformação.
Manan, Islam & Tarefder (2015)	0 e 35	Não	Fadiga 4 pontos (mistura);; LAS e <i>time sweep test</i> (ligantes)	Na análise de ligantes Nf aumenta, mas na análise das misturas a Nf reduz, possivelmente por causa da má mistura entre componentes. No caso, quando considerado a mistura asfáltica, a vida de fadiga reduz.
Izaks et al. (2015)	30 e 50	Não	Hamburgo, fadiga 4 pontos	Aumento da resistência a deformação permanente, mas todos atendem recomendação, comportamento similar a referência para fadiga; nenhuma alteração foi significativa!

Centofante (2016)	10, 20 e 30	Não	MR, RTCD, MD, <i>Flow Number</i> , Lottmann modificado, desgaste Cântabro	Aumento de RAP aumenta RT e MR, maiores valores de MD, menores valores de ângulo de fase, não necessariamente o aumento da propriedade E^* é diretamente proporcional ao aumento do teor de RAP; Já FN aumenta proporcionalmente ao teor de RAP. Desgaste também aumenta com RAP.
Zhang & Muhunthan (2017)	26 e 50	Não	Módulo Dinamico e <i>Creep Compliance</i> Resistência à tração por compressão diametral	Objetiva analisar diferentes estágios da produção das misturas. RAP aumentou rigidez
Sabhafer & Hossain (2017)	100	Sim, 1,25% no peso da mistura	Reciclagem a quente <i>in situ</i> ; Hamburgo; Módulo Dinâmico; <i>Flow Number</i>	Utilização de RAP diminuiu rigidez no HWT e MD; apenas um dos materiais com ARA melhorou performance no <i>Flow Number</i>
Sabhafer & Hossain (2017)	100	Sim, 1,25% no peso da mistura	Reciclagem a quente <i>in situ</i> ; Texas overlay, Dano por umidade, <i>Thermal stress restrained specimen test</i>	Apenas um dos materiais com ARA melhorou performance nos ensaios de maneira consistente; Ensaios de dano por umidade e temperatura tem o mesmo comportamento em relação às diferentes fontes de material
Bankowski (2018)	50	Não	Fadiga 4 pontos;	Manteve Vida de fadiga
Islam, Ahmed & Hossain (2018)	20, 30 e 40	Não	Projeto no AASHTOWare Pavement ME Design software	As maiores diferenças das cruvas mestres ocorrem nas menores frequências, mas não tem padrão específico com variação do teor de RAP. Aumento de RAP exige maior espessura de camada; porque maiores teores têm aumento no trincamento por fadiga; variação para deformação permanente não é significativa

Zaumanis, Cavali & Poulidakos (2018)	100	Sim	SCB, French wheel tracking, Módulo Complexo na tração indireta; variação da granulometria do RAP	RAP melhora resistência a deformação permanente, não tem variação significativa na resistência ao trincamento; aumentar teor de ligante em 0,5% reduz resistência a def. perm.; aumenta rigidez; E* maior em menores frequências
Lu et al. (2018)	30, 40 e 50	Sim	<i>Wheel tracking; low temperature cracking</i> ; fadiga à tração indireta	Resistência a deformação permanente melhora com aumento do RAP e com aumento de aditivo para misturas mornas, reduz com AR; WMA e AR melhoram propriedades de baixa-temperatura; aumento do RAP aumenta tensão de tração indireta, e reduz vida de fadiga; o uso de aditivos melhora a vida de fadiga
Luzzi (2019)	10, 20 e 30	Não	MR, RTCD, MD, <i>Flow Number</i> , fadiga à tração-compressão, DUI e desgaste Cântabro	MR aumenta, desgaste e DUI não variam muito. Para FN e fadiga, o aumento de RAP reduz os valores resultantes de FN e os parâmetros analisados no ensaio de fadiga, apresentando redução da vida do pavimento quanto às duas características.
Suzuki (2019)	Até 65%	Sim, apenas para 25 e 50%	RTCD, DUI, MR, <i>Flow Number</i> , módulo dinâmico, fadiga 4 pontos	Aumento de RAP aumenta a rigidez no ensaio de MR, uso de AR reduz MR; para menores frequências baixos teores de RAP (que não foram aquecidos) são menos rígidos, enquanto maiores teores de RAP (pré-aquecidos) são mais rígidos; misturas com mais RAP tem maior FN, uso de AR reduz os resultados obtidos; utilização de maior teor de RAP (50%) na fadiga teve resultado semelhante à referência; AR ainda melhora o material.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar as especificidades dos materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa e sua caracterização, assim como definir e explicar os métodos empregados para atingir os objetivos propostos. Para a pesquisa proposta, os materiais utilizados consistem em: duas fontes de material fresado, agregado mineral, ligante asfáltico comumente utilizado na região e agente rejuvenescedor.

Parte dos materiais utilizados na pesquisa foram selecionados por terem sido previamente estudados na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por Luzzi (2019) e Corrêa (2020), com produção em usina, análise de desempenho em laboratório e aplicação em campo. A partir disto se propõe a utilização de teores de RAP de 10%, 20% e 30% para as misturas recicladas com ambas as fontes de fresado utilizadas, para fins de possibilidade de comparação.

3.1. MATRIZ EXPERIMENTAL

A composição da matriz experimental proposta para a pesquisa se dá a partir do estudo de dois materiais fresados distintos: o primeiro com material composto por agregado granítico e ligante do tipo AMP 6085, denominado neste estudo como “RAP 6085”, e o segundo composto originalmente por agregados basálticos e ligante asfáltico com borracha AB8, denominado “RAP AB8”. O estudo tem como proposta a aplicação desses materiais fresados em mistura asfáltica de referência com substituição granulométrica nos teores de 10, 20 e 30%, para análise de desempenho. Complementarmente propõe-se a utilização de agente rejuvenescedor nas misturas com 30% de fresado, por ser o teor mais elevado dentre os teores utilizados, sendo assim, o que ocasionaria melhor proveito do material e deixaria mais evidente sua eficiência. A Figura 9 ilustra a esquematização da matriz experimental planejada, enquanto a Figura 8 especifica as misturas que serão realizadas e a Tabela 4 apresenta a identificação e descreve a formulação das misturas asfálticas estudadas na pesquisa.

Figura 8: Misturas estudadas

<p>Referência</p> <p>↓</p> <p>Mistura 100% virgem com agregado granítico e ligante 50/70</p>	<p>RAP 6085</p> <p>R6085_10_liv5070</p> <p>R6085_20_liv5070</p> <p>R6085_30_liv5070</p> <p>R6085_30_liv5070_AR5</p>	<p>RAP AB8</p> <p>RAB8_10_liv5070</p> <p>RAB8_20_liv5070</p> <p>RAB8_30_liv5070</p> <p>RAB8_30_liv5070_AR5</p>
---	--	---

Figura 9: Matriz experimental

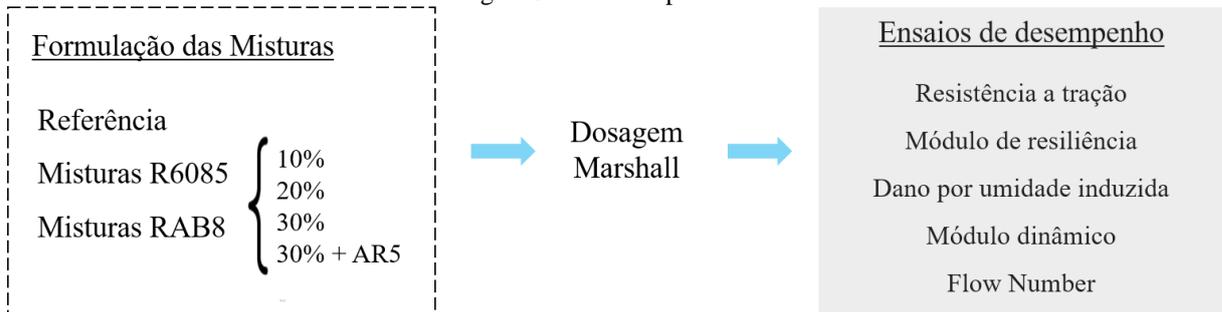


Tabela 4: Descrição das misturas estudadas

Identificação	Formulação da Mistura
REF_liv5070	0% RAP c/ ligante 50/70
R6085_10_liv5070	10% RAP 6085 c/ ligante virgem 50/70
R6085_20_liv5070	20% RAP 6085 c/ ligante virgem 50/70
R6085_30_liv5070	30% RAP 6085 c/ ligante virgem 50/70
R6085_30_liv5070_AR5	30% RAP 6085 c/ ligante virgem 50/70 e utilização de AR5
RAB8_10_liv5070	10% RAP AB8 c/ ligante virgem 50/70
RAB8_20_liv5070	20% RAP AB8 c/ ligante virgem 50/70
RAB8_30_liv5070	30% RAP AB8 c/ ligante virgem 50/70
RAB8_30_liv5070_AR5	30% RAP AB8 c/ ligante virgem 50/70 e utilização de AR5

Os itens a seguir descrevem o programa experimental proposto para a pesquisa:

- a) Caracterização dos materiais fresados e materiais virgens utilizados;
- b) Dosagens das misturas asfálticas a serem estudadas;
- c) Determinação do AR e dosagem a ser aplicada;
- d) Moldagem dos CP's para realização dos ensaios;
- e) Análise laboratorial de desempenho das misturas;

f) Análise dos resultados.

3.2. AGREGADOS

Três tipos de agregados serão utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, sendo eles: o agregado mineral, chamado de agregado virgem e os agregados reciclados provenientes das duas fontes de RAP obtidas, chamados para fins desse estudo de “RAP”. Informações pertinentes a sua caracterização são apresentadas a seguir.

3.2.1. Agregado mineral virgem

O agregado virgem utilizado é granítico proveniente da britagem da Empresa de Mineração Eldorado, localizada no município de Eldorado do Sul. As frações deste utilizadas são: brita 3/4”, brita 3/8” e pó de pedra. A caracterização dos materiais pétreos virgens está apresentada na Tabela 5 e sua granulometria está compreendida na Tabela 6 e Figura 10.

A caracterização deste material é realizada através dos ensaios de desgaste a abrasão (DNER-ME 035/98), índice de forma (DNER-ME 086/94), sanidade (DNER-ME 089/94), equivalente de areia (DNER-ME 054/97), massa específica e absorção (DNER ME 195/97, ABNT NBR NM 30:2001).

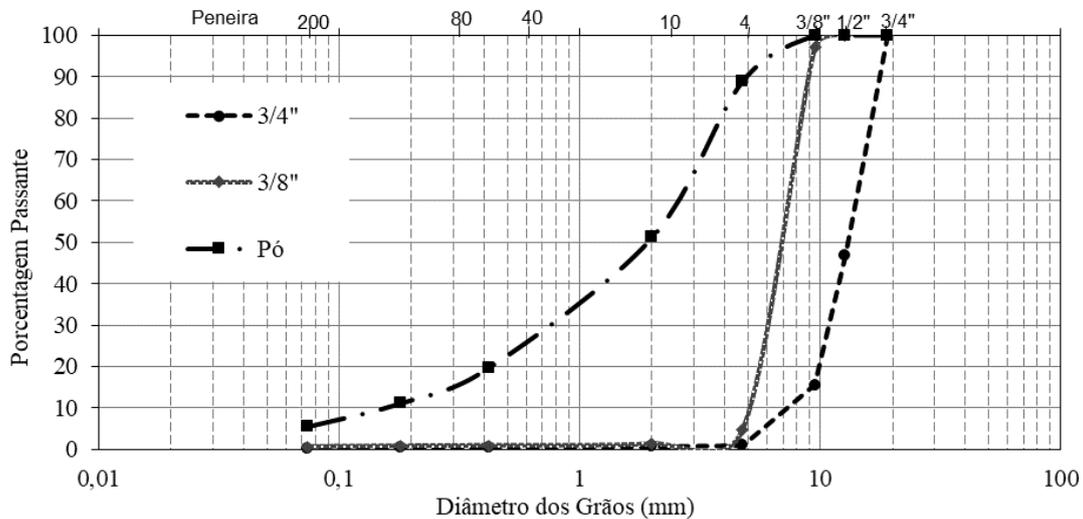
Tabela 5: Caracterização do material pétreo

Propriedade	Método	Especificação	Resultado
Abrasão Los Angeles 3/4”	DNER ME 035/98	≤50%	19,53
Abrasão Los Angeles 3/8”	DNER ME 035/98	≤50%	25,65
Índice de Forma	DNER ME 086/94	>0,5	0,71
Sanidade	DNER ME 089/94	<12%	2,60
Equivalente de Areia	DNER ME 054/97	≥55%	93,73
Massa Específica Real 3/4” (Gse)	DNER ME 195/97	N/A	2,59
Massa Específica Aparente 3/4” (Gsb)	DNER ME 195/97	N/A	2,54
Absorção 3/4”	DNER ME 195/97	N/A	0,72
Massa Específica Real 3/8” (Gse)	DNER ME 195/97	N/A	2,63
Massa Específica Aparente 3/8” (Gsb)	DNER ME 195/97	N/A	2,55
Absorção 3/8”	DNER ME 195/97	N/A	1,17
Massa Específica Ag. Miúdo (Gse)	DNER ME 084/95	N/A	2,63
Absorção Ag. Miúdo	ABNT NBR NM 30:2001	N/A	0,79

Tabela 6: Granulometria do material pétreo

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)		
		3/4"	3/8"	Pó
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	46,83	100,00	100,00
3/8"	9,50	15,55	97,08	100,00
4	4,76	0,98	4,79	88,93
10	2,00	0,70	1,35	51,22
40	0,42	0,52	0,95	19,84
80	0,18	0,44	0,82	11,20
200	0,074	0,35	0,67	5,57

Figura 10: Curva granulométrica material pétreo



3.2.2. Agregados reciclados

Dois fontes de agregado reciclado são utilizadas nesta pesquisa. A primeira, RAP 6085, provém de um revestimento fresado em dois trechos da BR 290 – *Freeway*, utilizado previamente na UFSM, o material coletado se encontrava armazenado sob lonas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM (Figura 11), que após coleta teve parte transportada para o Laboratório de Pavimentação da UFRGS onde se manteve armazenado em bombonas devidamente identificadas. A segunda fonte, RAP AB8, é proveniente da concessão da empresa Ecosul, com material fresado da rodovia BR-392, coletado da pilha de depósito da empresa (Figura 12).

Figura 11: Material armazenado no LMCC – UFSM



Figura 12: Pilha de depósito do material fresado da Ecosul



A granulometria dos materiais fresados utilizados é compreendida pela Figura 13 e pode também ser notada na Figura 14, que evidencia visualmente as diferenças granulométricas entre os materiais. É importante frisar que para formulação das misturas estudadas foram utilizadas apenas as parcelas de material passantes na peneira de abertura $\frac{3}{4}$ ", com tamanho nominal máximo de 19 mm, para utilização da faixa granulométrica selecionada. Enquanto os dados de caracterização das duas fontes de material fresado são apresentados na Tabela 7. Os ensaios para caracterização realizados consistem em: sanidade (DNER-ME 089/94), índice de forma (DNER-ME 086/94), desgaste a abrasão (DNER-ME 035/98), extração de ligante (DAER/RS-EL 213/01), densidade máxima medida (ABNT-NBR 15619/12).

Existem algumas condições para determinação da massa específica aparente do agregado do RAP ($G_{sb(RAP)}$). De acordo com *Asphalt Institute* (2014) a determinação pode ser feita a partir de ensaios realizados com os agregados após extração do ligante asfáltico, separando as frações fina e graúda, e calculando em seguida a combinação destas, ou pode ser determinado $G_{se(RAP)}$ do agregado, descontando da massa específica máxima medida do RAP ($G_{mm(RAP)}$) a parcela referente ao ligante asfáltico do RAP, e utilizar $G_{se(RAP)}$ como substituto da massa específica aparente do RAP, ou ainda pode ser assumido valor para a taxa de absorção para enfim calcular $G_{sb(RAP)}$ para tal, são utilizadas as equações 1 e 2 a seguir:

$$G_{se(RAP)} = \frac{100 - P_{b(RAP)}}{\frac{100}{G_{mm(RAP)}} - \frac{P_{b(RAP)}}{G_{b(RAP)}}} \quad (1)$$

$$G_{sb(RAP)} = \frac{G_{se(RAP)}}{\frac{P_{ba(RAP)} \times G_{se(RAP)}}{100 \times G_{b(RAP)}} + 1} \quad (2)$$

Onde:

$G_{sb(RAP)}$ = massa específica aparente dos agregados pétreos do RAP

$G_{se(RAP)}$ = massa específica efetiva dos agregados pétreos do RAP

$P_{b(RAP)}$ = porcentagem de ligante do total da massa de RAP

$P_{ba(RAP)}$ = ligante absorvido pela massa de agregados pétreos do RAP

G_b = massa específica do ligante asfáltico do RAP

Como não foi possível realizar a recuperação dos ligantes asfálticos do RAP após extração, o valor de densidade dos ligantes AMP 6085 e AB8 dos fresados, para fins de cálculo, foram assumidos como sendo, respectivamente, 1,006 g/cm³ e 1,018 g/cm³, definidos de acordo com valores obtidos por autores de estudos regionais que analisaram materiais similares (MENSCH,

2017; LUZZI 2019; FACCIN, 2018). E segundo o Instituto do Asfalto, se a absorção de água pelo agregado for de 2% ou menos, a absorção de ligante asfáltico pelo mesmo agregado é de 1% ou menos. Entende-se que alguma parcela do ligante é absorvido pela pedra do RAP, por isso é descartada a ideia de utilizar valores de $G_{se(RAP)}$ como $G_{sb(RAP)}$. Como os agregados virgens utilizados na pesquisa têm em média 0,8% de absorção de água, e os agregados de RAP 6085 são compostos por agregados bastante similares, optou-se por assumir uma absorção inferior, de 0,4%, apenas para fins de cálculos e comparações nesta pesquisa.

Figura 13: Curvas granulométricas dos materiais fresados

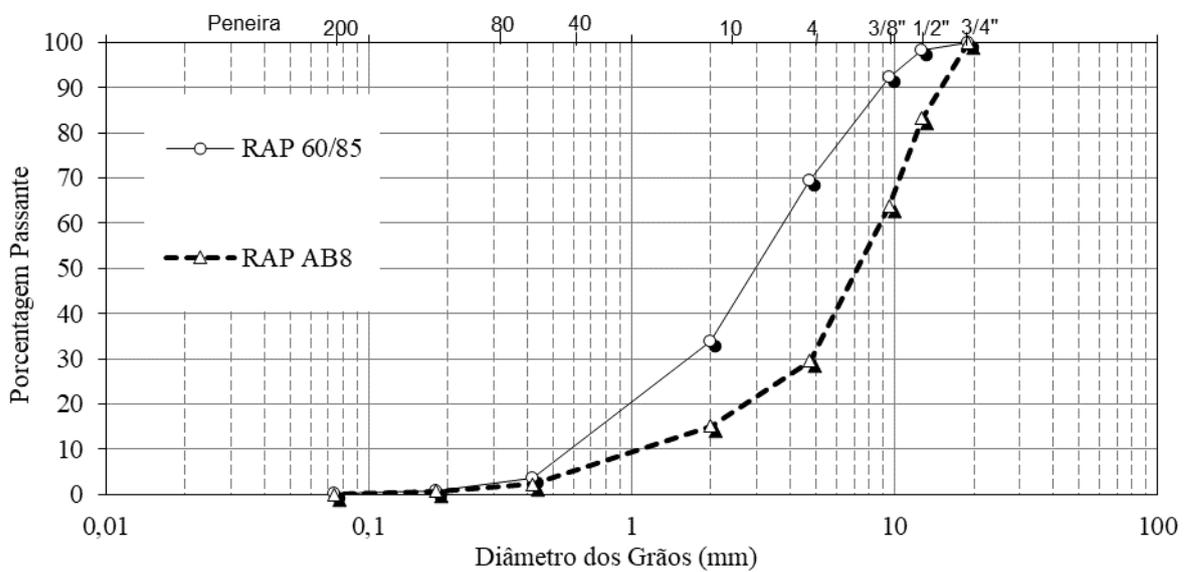


Figura 14: RAP 60/85 (a) e RAP AB8 (b)



(a)

(b)

Tabela 7: Caracterização dos materiais fresados

Propriedade	Método	Especificação	Resultado	
			RAP 6085	RAP AB8
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	$>0,5$	0,76	0,84
Desgaste à Abrasão	DNER-ME 035/98	$\leq 50\%$	21%	28%
Teor de Ligante	DAER/RS-EL 213/01	N/A	4,77%	4,76%
$G_{mm(RAP)}$	ABNT NBR 15619/12	N/A	2,556	2,440
$G_{se(RAP)}$	<i>Asphalt Institute</i> (2014)	N/A	2,77	2,62
$G_{sb(RAP)}$	<i>Asphalt Institute</i> (2014)	N/A	2,74	2,60

3.2.3. Misturas utilizadas

Para a mistura de referência e para cada teor de utilização de RAP foi determinada uma curva granulométrica de forma a enquadrar-se na faixa C do DNIT obedecendo as normas vigentes para aplicação dos materiais DNIT ES 033/2005. Para determinação das composições granulométricas das misturas recicladas estudadas considera-se a teoria *Black Rock*. No entanto, é realizado dosagem específica para cada teor de RAP utilizado, e entende-se que a variação do teor de ligante de projeto para cada mistura em relação a mistura de referência é influenciada pela quantidade de ligante envelhecido de fato ativado no material fresado.

As dosagens foram determinadas no Laboratório de Pavimentação (Lapav) da UFRGS. Para fins de comparação de resultados, visando minimizar a variação que possivelmente poderia ser causada em função da diferença na composição granulométrica das misturas, buscou-se projetar misturas que apresentassem esqueletos pétreos similares entre si, respeitando as variações nas porções substituídas por cada um dos materiais reciclados. A Tabela 8 apresenta as proporções utilizadas para cada uma das frações de materiais das misturas em estudo.

Tabela 8: Proporções das frações em cada mistura

Misturas	Teores de cada fração			
	3/4"	3/8"	Pó de pedra	RAP
REF_LV5070	25%	15%	60%	0%
R6085_10_LV5070	20%	10%	60%	10%
R6085_20_LV5070	15%	10%	55%	20%
R6085_30_LV5070	15%	5%	50%	30%
RAB8_10_LV5070	20%	10%	60%	10%
RAB8_20_LV5070	20%	10%	50%	20%
RAB8_30_LV5070	10%	15%	45%	30%

As composições granulométricas de cada uma das misturas são apresentadas a seguir. A Figura 15 apresenta a curva granulométrica selecionada para a mistura de referência, as composições granulométricas de todas as misturas estudadas para RAP 6085 e RAP AB8 podem ser visualizadas na Figura 16 e Figura 17, respectivamente.

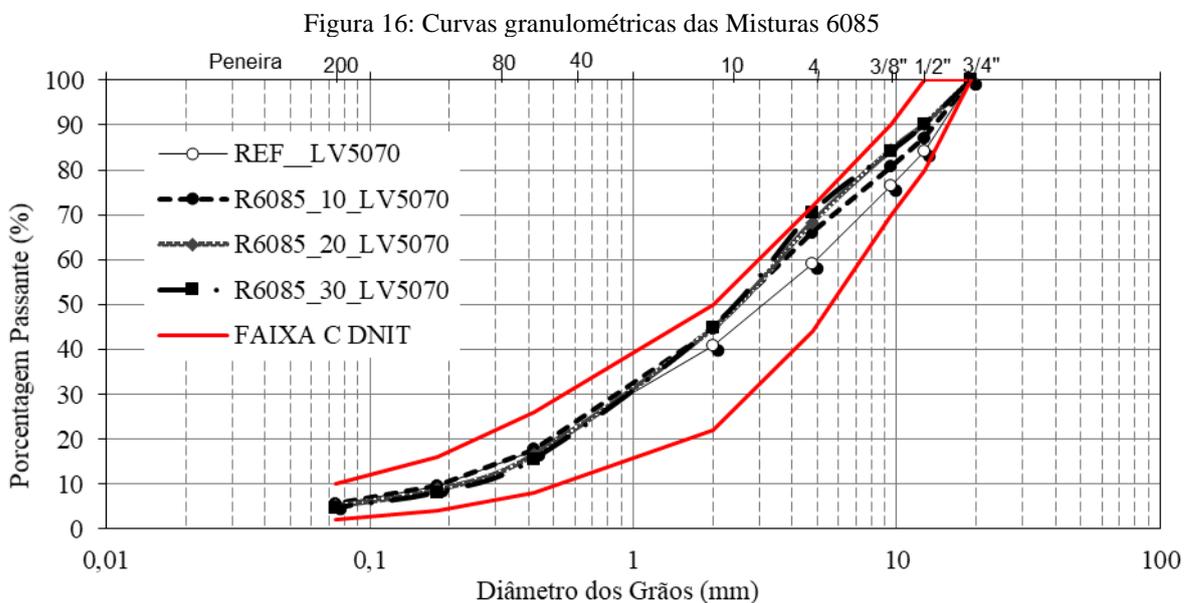
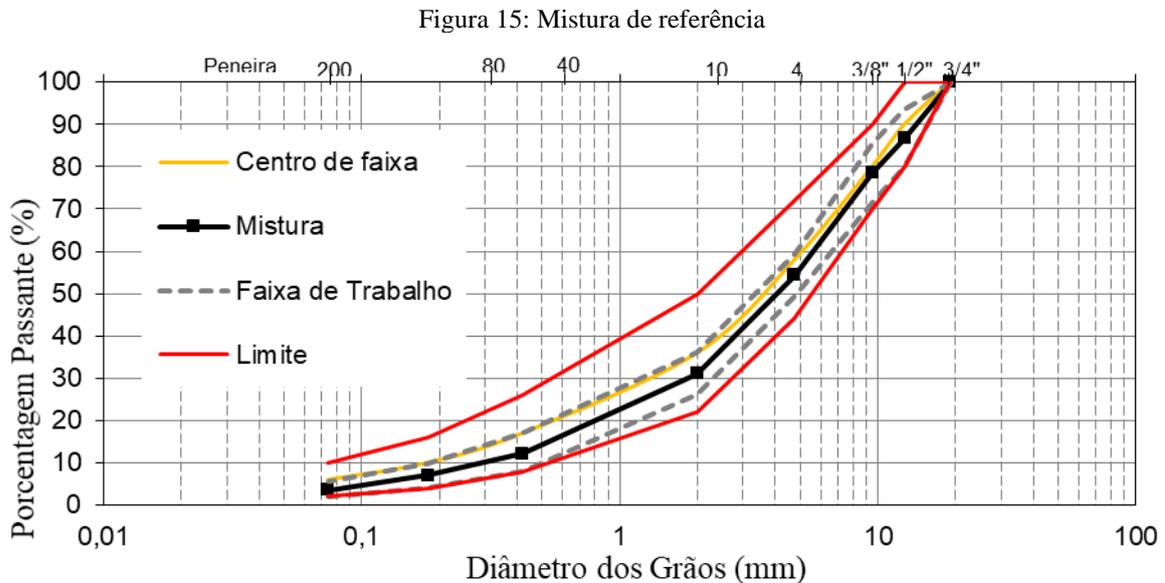
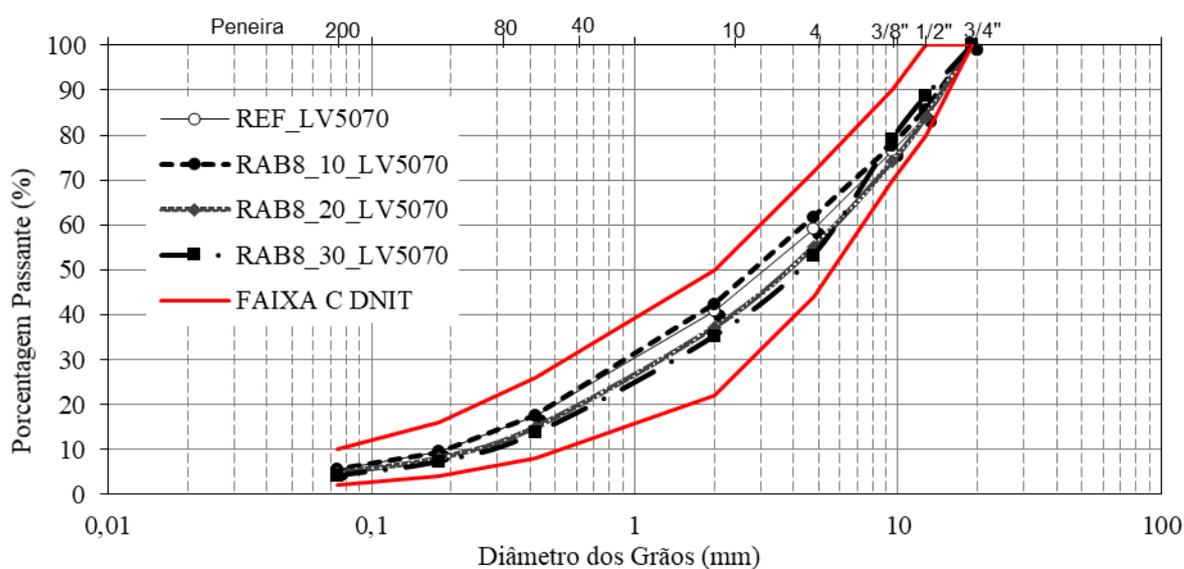


Figura 17: Curvas granulométricas das Misturas AB8



3.3. LIGANTE ASFÁLTICO

Nesta pesquisa as misturas são compostas por ligante virgem do tipo 50/70, escolhido por ser um ligante asfáltico comumente utilizado na região, e para sua caracterização são utilizados os seguintes ensaios: ponto de amolecimento (NBR 6560), penetração (NBR 6576), massa específica (NBR 6296), ductilidade (NBR 1506) e viscosidade Brookfield (NBR 15184). O ligante foi fornecido pela Greca Asfaltos, e os resultados de caracterização são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Caracterização do ligante virgem 50/70

Propriedade	Método	Especificação	Resultado
Ponto de Amolecimento (°C)	NBR 6560	46 min	47,8
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576	40 a 70	52
Massa Específica	NBR 6296	-	1,008
Ductilidade (%)	NBR 1506	mín. 60	>90
Viscosidade Brookfield a 135°C (cP)	NBR 15184	mín. 274	305
Viscosidade Brookfield a 150°C (cP)	NBR 15184	mín. 112	164
Viscosidade Brookfield a 177°C (cP)	NBR 15184	57 a 285	62

A decisão de usar o ligante convencional para composição de ambas as misturas recicladas se deu visando as análises a serem realizadas posteriormente, com intuito de conseguir examinar a influência do fresado ou da origem do material fresado no comportamento das misturas, mantendo assim o tipo de ligante virgem como um fator controlável e comum a todas elas.

3.4. AGENTE REJUVENESCEDOR

na pesquisa foi cedido pela empresa Greca Asfaltos, consiste em um Agente Rejuvenecedor do tipo AR-5. O produto é especificado em regulamento técnico da portaria nº44 do Departamento Nacional de Combustível (ANP, 1997), conforme Tabela 10. Os agentes rejuvenecedores à base de óleo de xisto são: AR-1, AR-5, AR-25 AR-75, AR-250 e AR-500, sendo classificados de acordo com a concentração desse material base, quanto menor o número da classificação, maior a concentração do material, AR-1 apresenta a maior concentração de óleo de xisto, enquanto AR-500 apresenta a menor. Seguindo a lógica, o AR-5 é o segundo AR com maior concentração de óleo de xisto.

Figura 18: Aspecto físico AR-5



Tabela 10: Especificações técnicas do AR-5

Características	Unidade	Especificações	Método	
			ABNT	ASTM
Viscosidade cinemática a 60°C	cSt	mín-máx	14756	D2170
		176-900		
Ponto de Fulgor VAC	°C	218	11341	D92
Teor de Saturados Massa	%	30	-----	D2007
Efeito do Calor e do Ar a 163°C (RTFOT ou TFOT)				
Razão de viscosidade	%	4	15235 ou 14736	D2872 ou D754
Varição de Massa	%	4		
Densidade 20/4°C	----	-	6296	D70

Fonte: ANP, 1997.

3.5. MÉTODOS DE ENSAIO

Este item visa esclarecer de forma mais específica os métodos selecionados para serem empregados na pesquisa. Os possíveis mecanismos de falha de um pavimento que devem ser analisados para determinação de sua performance incluem: deformação permanente, sensibilidade à umidade, fadiga, e trincamento térmico. Como o clima no Brasil não propicia um ambiente para que ocorra falhas por trincamento térmico, essa manifestação não é recorrente, por isso não é abordada no presente trabalho.

Os métodos de ensaios selecionados para avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas foram: resistência a tração por compressão diametral e módulo de resiliência (dois parâmetros comumente aplicados hoje no mercado para previsão de desempenho), módulo dinâmico, *flow number*, e dano por umidade induzida (Lottman modificado). Os dois primeiros foram escolhidos por serem parâmetros comumente utilizados hoje a nível nacional, para previsão de desempenho, e os demais para avaliar as misturas quanto a deformabilidade, danificação e adesividade, respectivamente.

3.5.1. Produção das misturas asfálticas

De acordo com NAPA (2014), a Tabela 11 apresenta algumas vantagens e desvantagens no tipo de processamento utilizado para uso do material fresado. Tendo em vista estas considerações, os materiais utilizados na pesquisa não sofreram nenhum tipo de processamento além da fresagens que os originaram. Apenas o fresado AB8 para sua preparação teve que ser peneirado na peneira $\frac{3}{4}$ " para retirar o material retido afim de se enquadrar na faixa granulométrica da mistura asfáltica proposta.

Uma abordagem bastante utilizada para secar e aquecer o RAP é a utilização de superaquecimento dos agregados virgens a uma temperatura superior a necessária para a realização da mistura afim de que a transferência de calor seque e aqueça o material fresado. No entanto, com a utilização de maiores teores de RAP, acaba por ser necessário a utilização de temperaturas muito altas, o que tem potencial para causar eventuais incêndios no misturador ou tambores das usinas (NAPA, 2014). Tendo em vista as complicações que podem ser geradas pelo uso de maiores quantidades de RAP em misturas recicladas a quente, e que a pesquisa em questão prevê sequência com utilização de maiores teores do material reciclado, afim de tirar maior proveito do material utilizado para a realização das misturas o material fresado utilizado é aquecido previamente à mistura, por um período de duas horas a uma temperatura de 100°C.

Tabela 11: Vantagens e desvantagens das opções de processamento de fresado

Processo	Possíveis Vantagens	Possíveis Desvantagens
Uso de fresagem sem processamento adicional	Evita britagem adicional das partículas de agregados no RAP, o que permite maiores teores de RAP nas misturas Redução de custos com processamento do RAP Fresagens de grandes projetos são propensos a ter graduação e teor de asfalto consistentes	Requer múltiplas pilhas de material na usina Fresagens de projetos individuais são diferentes; assim, quando esgota uma pilha, nova dosagem é necessária para o outro RAP
Peneirar RAP antes de britar	Limita a britagem do material, reduzindo geração de pó	Poucas unidades de britagem e peneiramento são montadas para pré-peneirar
Britar todo material em um mesmo tamanho	Permite que o RAP seja utilizado em diferentes tipos de misturas Geralmente fornece boa uniformidade de materiais de RAP obtidos de diferentes fontes	Aumenta a quantia de pó das pilhas de material fresado, que tendem a limitar quantidade de RAP nas misturas
Fracionamento do RAP	Utilizar pilhas de material de diferentes tamanhos fornece maior flexibilidade no desenvolvimento de misturas Transferência de calor para RAP mais fino pode ser mais eficiente durante a mistura em planta/usina	Necessita mais espaço para múltiplas pilhas menores Opções de processamento mais caras Devido ao maior teor de ligante, pilhas de RAP mais fino tende a ter mais aglomeração, o que pode não ter um bom fluxo dentro da usina

As dosagens das misturas asfálticas são realizadas conforme Metodologia Marshall (DNER ME 043-95), visando alcançar alguns parâmetros de projeto do material conforme normativas disponíveis nacionalmente, apresentadas na Tabela 12. Como pode ser notado, as normativas referentes a capas de revestimento determinam intervalo de volumes de vazios de 3 a 5% para definição do TLP das misturas, enquanto que as especificações para capas com material de reciclagem de misturas asfálticas a quente apresentam sutil diferença, com a norma DER-SP especificando volume de vazios de 4% enquanto a norma DNIT (2005) especifica o mesmo intervalo de 3 a 5%.

Tabela 12: Especificações normativas para parâmetros de projeto

Propriedade	DNIT	DAER-RS	DER-SP	DNIT
Parâmetro	CAPA	CAPA	<i>CAPA - Reciclagem</i>	<i>CAPA - Reciclagem</i>
Normativa	ES 031/2006	ES-P16/91	<i>ET-DE-P00/032</i>	<i>ES 033/2005</i>
Volume de Vazios (%)	3 a 5	3 a 5	4	3 a 5
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	75 a 82	65 a 85	75 a 82
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	> 15	> 13	>15
Estabilidade (kgf)	> 500	> 800	> 800	> 500
Fluência (1/100 in)	8 a 18	8 a 16	8 a 16	-
Resistência a Tração (MPa)	> 0,65	-	> 0,80	> 0,65
Relação Filler/Betume (%)	<i>0,6 a 1,6 (Superpave)</i>			

De maneira geral os corpos de prova a serem ensaiados foram produzidos à luz da normativa DNIT PRO 178/2018 (DNIT, 2018). Sistemáticamente o procedimento de preparação das misturas asfálticas recicladas obedece às seguintes etapas listadas a seguir:

1. Os agregados são preparados e pesados em bandejas com o peso de cada uma das frações baseado na granulometria dos materiais, o agregado virgem (AV) é pesado separadamente do material fresado (RAP), buscando a formulação de amostras representativas dos materiais;
2. O AV é aquecido em estufa por pelo menos 4 horas antes da mistura na temperatura de 161°C;
3. O RAP (tanto para RAP6085 e RAPAB8) é aquecido por 2 horas em estufa a 100°C;
4. O ligante asfáltico (CAP 50/70) é aquecido a 151°C;
5. Os agregados AV e RAP são misturados de 2 a 3 minutos para homogeneização da massa;
 - a. No caso das misturas com AR, o RAP é adicionado ao misturador primeiro, seguido do AR, que é adicionado em temperatura ambiente da maneira mais uniforme possível sobre a massa de RAP, ambos são misturados por 2 minutos para homogeneização e atuação do AR sobre o material asfáltico, por fim é adicionado o AV e misturado por mais 2 a 3 minutos até obter mistura homogênea;
6. O ligante asfáltico é adicionado na massa, e mistura-se por mais 5 minutos para obtenção da massa mais homogenia possível;
7. As misturas asfálticas recicladas são levadas à estufa para o envelhecimento de curto prazo na temperatura de 139°C por um período de 2 horas ± 10 minutos;
8. A massa asfáltica é direcionada ao processo de compactação.

Assim como Bernucci et al (2008) explicam, quando se trabalha com misturas de diferentes frações de materiais pétreos, pode-se determinar um valor para a massa específica da mistura desses materiais através de uma média ponderada, considerando as quantidades de cada uma das frações e suas respectivas massas específicas. Esse valor ponderado pode ser obtido através da equação (3)

$$G_{sb\text{ mix}} = \frac{\sum_n^1 \%G_n}{\frac{\%G_1}{G_{sb1}} + \frac{\%G_2}{G_{sb2}} + \dots + \frac{\%G_n}{G_{sbn}}} \quad (3)$$

Onde:

$G_{sb\text{ mix}}$ = massa específica aparente da mistura de agregados

$\%G_n$ = teor do agregado n na mistura

G_{sbn} = massa específica aparente do agregado n na mistura

Para fins de caracterização e avaliação volumétrica das misturas alguns parâmetros são calculados conforme equações (4), (5) e (6) descritos em seguida, de acordo com *Asphalt Institute* (2014). Após a determinação da massa específica máxima medida (G_{mm}) da mistura asfáltica e sabendo os valores de massa específica aparente dos materiais pétreos (G_{sb}), é possível determinar propriedades como a massa específica efetiva dos agregados pétreos (G_{se}), o teor de ligante absorvido (P_{ba}), para chegar ao teor de ligante efetivo (P_{be}).

$$G_{se} = \frac{P_s}{\frac{100 - P_b}{G_{mm}} - G_b} \quad (4)$$

Onde:

G_{se} = massa específica efetiva dos agregados da mistura asfáltica

P_s = porcentagem de agregados do total da massa da mistura asfáltica

P_b = porcentagem de ligante do total da massa da mistura asfáltica

G_b = massa específica do ligante asfáltico

$$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{se} \times G_{sb})}{(G_{se} - G_{sb})} \times G_b \quad (5)$$

Onde:

P_{ba} = ligante absorvido pela massa de agregados pétreos

G_{se} = massa específica efetiva dos agregados pétreos

G_{sb} = Massa específica aparente dos agregados pétreos

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s \quad (6)$$

Onde:

P_{be} = porcentagem de ligante efetivo

P_b = porcentagem de ligante do total da massa da mistura asfáltica

P_{ba} = ligante absorvido pela massa de agregados pétreos

P_s = porcentagem de agregados do total da massa da mistura asfáltica

3.5.2. Aplicação do agente rejuvenecedor

Devido a impossibilidade técnica de recuperação do ligante asfáltico dos materiais fresados, não foi possível fazer a dosagem do AR em laboratório de maneira ideal. Dadas as limitações, e conhecendo-se o tipo de AR utilizado, foi realizada busca através das literaturas para determinar o teor de AR a ser utilizado e a maneira de aplicação do produto.

Conforme apresentado no item 2.3, a maioria dos estudos apresenta aplicação de AR entre os teores de 5 a 15% da massa de ligante asfáltico, enquanto estudo recente realizado por Silva e De Faria (2018) indicam que o AR-5 no teor de 20% apresenta os melhores resultados de recuperação das propriedades químicas do ligante envelhecido.

Com base nos estudos realizados por Zaumanis, Cavali e Poulidakos (2017), em não se tendo diferença significativa entre os três locais de aplicação de AR estudados, para o caso desta pesquisa desenvolvida julgou-se mais adequado a utilização do AR diretamente sobre o RAP no misturador.

Levando em conta essas considerações, optou-se por utilizar o teor de 10% de AR-5 sobre o peso do ligante asfáltico do RAP, a ser aplicado diretamente sobre o RAP no misturador de maneira mais uniforme possível. A Figura 19 permite visualizar melhor o processo de mistura e resultado da difusão do AR. A mistura do AR-5 no material fresado se deu por processo manual, no misturador, visando melhor homogeneidade.

Figura 19: Aplicação do AR-5 na produção das misturas recicladas



3.5.3. Dano por umidade induzida

O dano por umidade induzida é uma medida indireta da adesividade e coesão do conjunto agregado-ligante asfáltico, através da ação da água, e sua consequência na resistência a tração do material quando comparadas situações com e sem condicionamento do material (DNIT, 2018). O dano causado por umidade, comumente referido como perda de adesão, é um problema bastante importante no que tange a durabilidade das misturas asfálticas. A perda de adesão na mistura asfáltica consiste em água ou vapor que acaba localizado entre o agregado e o filme de ligante que o envolve, dessa maneira, desfazendo a ligação adesiva entre as partes. A análise dessa característica é feita através de ensaios laboratoriais, onde são determinadas propriedades do material condicionado conforme normativa vigente e suas especificações (Pradyumna et al, 2013).

O dano por umidade induzida é a razão de resistência a tração retida (RRT) pelas amostras condicionadas após passarem pelo processo de condicionamento que simula o dano causado pela ação deletéria da água nas misturas asfálticas. O ensaio utilizado para determinação desta propriedade segue a normativa DNIT ME – 180/2018, que determina que as amostras ensaiadas possuam volume de vazios de $7\% \pm 1\%$. De acordo com as especificações para cada mistura analisada são produzidos 6 corpos de prova cilíndricos, que são separados em dois grupos de 3 CP's, sendo o grupo inicial submetido ao condicionamento normatizado. Tal procedimento consiste em induzir saturação do CP através de aplicação de vácuo, com posterior condicionamento a temperaturas extremas de -18°C por 16 horas, em seguida a um banho de 60°C por 24 horas e finalmente outro banho de 25°C por um período de 2 horas para enfim

serem submetidos ao ensaio de resistência a tração indireta e determinação da resistência a tração retida do material (DNIT, 2018).

3.5.4. Ensaio convencionais de resistência a tração e módulo de resiliência

Adotado desde 1972 para caracterizar misturas asfálticas, o ensaio de resistência a tração por compressão diametral (RTCD) consiste em aplicar forças de compressão através de frisos na direção diametral de corpo de prova cilíndrico, o que gera por consequência tensões de tração uniformes, ao longo do diâmetro solicitado, perpendiculares a aplicação da carga, assumindo comportamento estritamente elástico iguala-se a tensão de tração à tensão máxima admissível do material (Bernucci et al, 2008). A RTI é determinada por meio de aplicação de carga monotônica na direção diametral até a ruptura. A tensão de tração é determinada através da equação (6).

$$\sigma_{RTI} = \frac{2F}{\pi DH} \quad (7)$$

Onde: σ_{RTI} é a tensão de resistência a tração indireta (MPa), F corresponde a carga de ruptura (N), D e H são, respectivamente, o diâmetro e altura do corpo de prova (mm).

DNIT 031/2006 ES determina que misturas asfálticas devem ter σ_{RTI} mínima de 0,65 MPa. Bernucci et al (2008) comentam que CAUQ recém fabricadas apresentam resistência média entre 0,5 e 2,0 MPa, e conforme o material envelhece em pista a RTI aumenta. Sendo assim, espera-se que as misturas asfálticas recicladas apresentem RTI superior à mistura de referência pela adição do material oxidado na composição.

O módulo de resiliência das misturas asfálticas é a relação entre tensão e deformação de tração resultantes do ensaio de compressão diametral com cargas repetidas, e pode ser calculado a partir da equação (7).

$$MRi = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (8)$$

Onde: MR é o módulo de resiliência instantâneo (MPa), P é a carga cíclica (N), ΔH corresponde ao deslocamento horizontal (mm) e t é a espessura do CP (mm).

No ensaio de MR são aplicadas cargas de compressão repetidas no plano diametral do corpo de prova, com incremento de carga, em relação a RTI, a cada porção de ciclos de carregamento. Cada aplicação de carga, assim como no ensaio de RTI, gera uma deformação no plano

transversal ao que a carga foi aplicada, dessa forma, é possível medir os deslocamentos diametrais recuperáveis (resilientes) no CP para fins de determinação do MR (Bernucci et al, 2008). A partir deste ensaio o módulo instantâneo é obtido a partir do deslocamento horizontal instantâneo, e o módulo total é obtido a partir do deslocamento horizontal total.

Nesta pesquisa a resistência a tração foi determinada a partir do ensaio de Resistência à Tração Indireta (RTI), ou Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), conforme DNIT 136/2018 ME (DNIT, 2018). E o ensaio de Módulo de Resiliência (MR) das misturas segue a normativa de ensaio DNIT 135/2010 ME (DNIT, 2010), com cálculo realizado de acordo com o protocolo LTPP-P07, onde, segundo Britto (2006), são usadas duas regressões lineares no cálculo, com taxa de amostragem de 500 pontos/s, sendo a primeira regressão entre os pontos 5 e 17 após o pico de deslocamento e a segunda nos últimos 299 pontos.

Os corpos de prova para as determinações foram moldados de acordo com o projeto de dosagem de cada mistura, no compactador giratório Superpave, com volume de vazios de 4% \pm 1%, e ensaiados na temperatura de 25°C \pm 0,5°C, com condicionamento mínimo de 4 horas na temperatura desejada.

O ensaio de MR das misturas asfálticas é realizado com ciclo de carregamentos do tipo *haversine* com duração de 1 s, composto por pulso de carga com duração de 0,1 s e repouso de 0,9 s. Apenas os deslocamentos horizontais são medidos, com sensor do tipo LVDT externo. A aquisição dos dados do ensaio é realizada através do sistema SeePav 8200.

3.5.5. Ensaio de módulo dinâmico

Módulo Complexo (E^*) é uma das muitas maneiras de descrever a relação tensão-deformação no comportamento de materiais viscoelásticos, é o número complexo que define a relação entre tensão e deformação para um material viscoelástico, onde a parte real representa a parcela elástica do material, e a parte imaginária de refere ao amortecimento interno do material (Huang, 2004). Enquanto o módulo dinâmico ($|E^*|$) é o valor absoluto do módulo complexo calculado através da divisão entre a máxima tensão pela deformação axial recuperável de um material solicitado a uma carga senoidal. E o ângulo de fase (ϕ) é o ângulo em graus entre o pico de tensão senoidal aplicada e o pico de deformação resultante desta tensão aplicada, num ensaio com tensão controlada (AASHTO, 2011). O AASHTO *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)* utiliza o módulo complexo como protocolo principal de ensaio para caracterizar a resposta modular de misturas asfálticas a quente (Coffey et al, 2013).
Avaliação de Diferentes Fontes de Material Fresado com Ligantes Não-Convencionais na Reciclagem à Quente

Os valores de módulo dinâmico medidos numa série de temperaturas e frequências de carregamento podem ser transformados numa curva mestre que caracteriza o concreto asfáltico para análise de performance e projeto de espessura do pavimento.

As curvas mestras são construídas a partir do princípio da sobreposição tempo-temperatura, segundo o qual existe um deslocamento paralelo entre curvas de fluência do material a diferentes temperaturas. No caso de se conhecer o *creep compliance* (conformidade de fluência) do material a uma temperatura de referência, é possível, a partir de um fator de deslocamento tempo-temperatura, descobrir o comportamento do material a qualquer temperatura, (Huang, 2004). Esse *shift fator* é definido para cada temperatura, baseado na temperatura de referência, e quando aplicado a frequência de carregamento do ensaio é possível obter os pontos na curva de frequência reduzida. O *shift fator* utilizado nessa pesquisa corresponde ao modelo de Williams, Landel e Ferry (WLF), definido pela equação 39 a seguir.

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \quad (9)$$

Dentre vários modelos utilizados para a construção da curva mestra, nesta pesquisa é utilizado o Modelo Sigmoidal um dos mais populares, utilizado no MEPDG, modelo expresso pela equação 10 a seguir, onde α , β , γ , δ são coeficientes de calibração do modelo.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta+\gamma(\log fr)}} \quad (10)$$

As curvas mestras serão geradas a partir do princípio de superposição tempo-temperatura aplicado as frequências de carregamento para construção das curvas em frequência reduzida, que determina para cada temperatura os deslocamentos que são necessários no domínio da frequência para obter os mesmos valores a uma temperatura de referência, levando em consideração a temperatura de referência de 20°C.

As amostras cilíndricas para realização deste ensaio devem ser produzidas pelo Compactador Giratório Superpave (CGS), com diâmetro de 100 mm e altura entre 147,5 e 152,5 mm e volume de vazios entre 5 e 6%. Para realização das curvas mestre devem ser realizadas a partir dos ensaios nas temperaturas de -10, 4, 21, 37 e 54°C e nas frequências de carregamento de 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 e 25 Hz para cada uma das temperaturas, com as deformações mantidas entre 50 e 150 micro-deformações. De acordo com a normativa a carga aplicada depende da rigidez do material ensaiado, e geralmente varia entre 15 e 2800 kPa, necessitando maiores cargas para

menores temperaturas, seguindo a ordem de ensaios da menor para maior temperatura, e para cada temperatura da maior para a menor frequência (AASHTO, 2011). De acordo com Mensch (2017) a realização do ensaio por tensão controlada “apresenta maior precisão na formação da senoide do carregamento”.

O método selecionado para caracterização da rigidez das misturas em estudo na presente pesquisa segue as normativas da norma norte-americana T 342-11. E para a realização do ensaio será utilizada a prensa hidráulica *Material Testing Sistem – MTS 810* disponibilizada pelo LAPAV da UFRGS.

3.5.6. Ensaio para determinação da resistência à deformação permanente

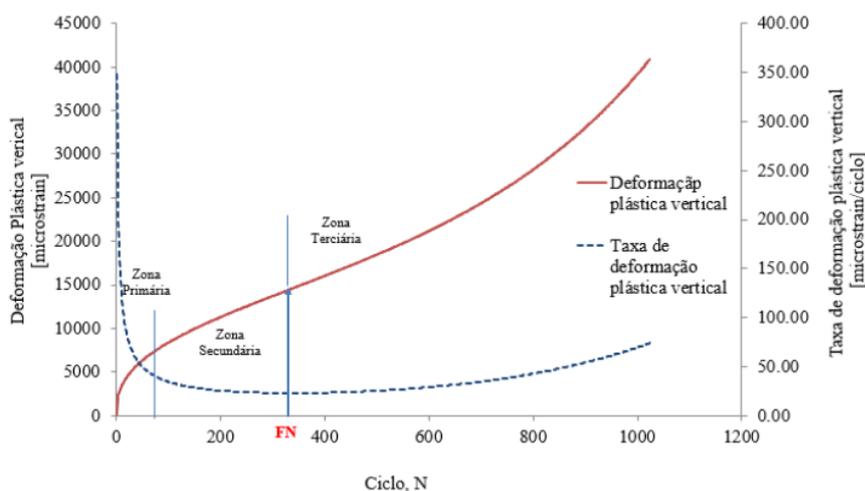
A deformação permanente é definida pelo acúmulo de pequenas parcelas irrecuperáveis de deformação como resultado de cargas repetidas que tenham sido aplicadas sobre o pavimento. A solicitação de um pavimento pela passagem de um único veículo gera deformação muito pequena, no entanto o somatório de passagens consecutivas de veículos eventualmente pode vir a causar deformação permanente considerável no pavimento (Barros, 2017).

O efeito da deformação permanente é fortemente influenciado pelas características dos materiais constituintes das misturas asfálticas, como agregados e ligante asfáltico. O comportamento a esse tipo de deformação é em grande parte dependente do esqueleto pétreo da mistura asfáltica, mas também é diretamente dependente da temperatura, evidenciando o efeito do ligante nesta característica em função do seu comportamento termo-sensível (Bernucci et al, 2008).

A resistência a deformação permanente é determinada em laboratório através do ensaio de uniaxial de cargas repetidas, no Brasil normatizado por ABNT NBR 16505/2016. As amostras são produzidas em corpos-de-prova cilíndricos de $150 \pm 2,5$ mm de altura e $102 \pm 2,0$ mm de diâmetro, com volume de vazios de $7\% \pm 0,5\%$, e ensaiadas a temperatura de $60 \pm 0,5$ °C. O ensaio consiste em aplicar carregamentos de compressão uniaxiais repetidos no CP com frequência de 0,1 s de carregamento, onde cada ciclo é constituído por pulso de carga de 204 ± 4 kPa, seguido por 0,9 s de repouso. O ensaio é realizado até 7200 ciclos ou até que haja fluência da amostra (ABNT, 2016).

A resposta do ensaio é apresentada de maneira gráfica conforme exemplo da Figura 20, com deformação plástica vertical acumulada e taxa de deformação plástica vertical *versus* número de ciclos.

Figura 20: representação do resultado de deformação permanente



O ensaio apresenta três estágios diferentes. O ensaio inicia com a fase de consolidação (zona primária), onde a taxa de deformação reduz com o tempo, com elevado nível inicial de deformação, correlacionado com o início da vida de serviço. Na zona secundária as deformações são crescentes e a taxa de deformação sofre pequenas variações, associada a pequenas variações volumétricas quando os pavimentos apresentam bom desempenho (fase em que o material deve se manter para além da sua vida útil). E a zona terciária caracteriza cisalhamento da amostra onde a taxa passa a aumentar com o tempo, com alto nível de deformação permanente acumulada (ABNT, 2016; Barros, 2017).

O resultado obtido do ensaio é conhecido como *Flow Number* (FN), que corresponde ao ciclo na curva de deformação plástica onde se inicia a zona terciária, onde a taxa de deformação é mínima e se inicia a fase de cisalhamento constante.

O ensaio para determinação da resistência a deformação permanente seguirá as normativas estabelecidas em ABNT 16505/2016 (que também está de acordo com DNIT ME 184/2018) e o equipamento utilizado será o mesmo utilizado para o ensaio de módulo dinâmico, previamente mencionado no item 3.5.5.

3.5.7. Análise estatística

Para os resultados obtidos nos ensaios de DUI, RT, MR e FN, são realizadas análises estatísticas, afim de determinar a real diferença entre os resultados, diferenciando a influência dos fatores controláveis do ruído experimental. Inicialmente é feita análise descritiva com determinação de parâmetros como média, desvio padrão e coeficiente de variação, com o intuito de visualizar como os dados se comportam. Após verifica-se os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade, através dos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Posteriormente aplica-se análise de variância (ANOVA) para avaliar se os resultados entre misturas (são) apresentam diferença significativa ou não. Ao ocorrer diferença entre as misturas, é realizado o Teste de Tukey, para verificar em quais misturas existe a diferença. Tanto a ANOVA como o teste de Tukey são realizados levando em conta nível de significância de 0,05.

Para este trabalho, visando alcançar os objetivos propostos, as análises são feitas em diferentes grupos, sendo eles:

- i. Mistura de referência e amostras com 10, 20 e 30% de RAP 6085;
- ii. Mistura de referência e amostras com 10, 20 e 30% de RAP AB8;
- iii. Mistura de referência, e amostras com 30% de RAP 6085 com e sem AR;
- iv. Mistura de referência, e amostras com 30% de RAP AB8 com e sem AR.

Os resultados das análises estatísticas realizadas podem ser encontrados completos no APÊNDICE I.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após caracterização dos materiais e aplicação dos métodos descritos, os resultados obtidos são apresentados e discutidos a seguir.

4.1. Dosagem das misturas asfálticas

O teor de ligante de projeto (TLP), que diz respeito ao ligante virgem adicionado nas misturas asfálticas foi definido a partir da metodologia de dosagem Marshall, à luz das normativas apresentadas no item 3.5.1. A Tabela 13 e Tabela 14 apresentam os resultados de volume de vazios (Vv) analisados para cada um dos teores de ligante testados. A

Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para cada uma das misturas conforme determinados pelos parâmetros adotados. As dosagens também foram realizadas para as misturas com utilização de AR, porém os resultados foram os mesmo para as misturas sem AR, por este motivo, em questão de dosagens, elas são aqui subtraídas e englobadas como as misturas R6085_30_LV5070 e RAB8_30_LV5070.

Tabela 13: Resultados da dosagem Marshall para determinação de TLP (1)

Mistura	Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Vv (%)
REF_LV5070	4,0%	2,251	2,471	8,9
	4,5%	2,265	2,453	7,7
	5,0%	2,305	2,438	5,5
	5,5%	2,309	2,423	4,7
	6,0%	2,331	2,389	2,4
R6085_10_LV5070	3,5%	2,259	2,478	8,9
	4,0%	2,300	2,458	6,4
	4,5%	2,339	2,443	4,2
	5,0%	2,349	2,418	2,9
	5,5%	2,352	2,397	1,9
R6085_20_LV5070	3,0%	2,288	2,491	8,1
	3,5%	2,320	2,462	5,8
	4,0%	2,348	2,447	4,0
	4,5%	2,358	2,435	3,1
	5,0%	2,361	2,415	2,2
R6085_30_LV5070	2,5%	2,299	2,502	8,1
	3,0%	2,343	2,481	5,5
	3,5%	2,358	2,457	4,0
	4,0%	2,376	2,442	2,7
	4,5%	2,373	2,418	1,9

Tabela 14: Resultados da dosagem Marshall para determinação de TLP (2)

Mistura	Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Vv (%)
RAB8_10_LV5070	4,0%	2,316	2,453	5,6
	4,5%	2,327	2,433	4,3
	5,0%	2,333	2,427	3,9
	5,5%	2,341	2,412	2,9
	6,0%	2,341	2,388	1,9
RAB8_20_LV5070	3,5%	2,275	2,466	7,7
	4,0%	2,328	2,439	4,5
	4,5%	2,347	2,427	3,3
	5,0%	2,347	2,406	2,4
	5,5%	2,342	2,384	1,8
RAB8_30_LV5070	2,5%	2,266	2,478	8,5
	3,0%	2,311	2,453	5,8
	3,5%	2,334	2,430	4,0
	4,0%	2,339	2,415	3,1
	4,5%	2,348	2,388	1,7

Tabela 15: Dosagens das misturas

Mistura	Tipo de Fresado	Teor de fresado	Teor de Ligante de Projeto 50/70	
			4%Vv	Vv e RBV
REF_LV5070	-	0%	5,70%	5,60%
R6085_10_LV5070	RAP 6085	10%	4,75%	4,93%
R6085_20_LV5070	RAP 6085	20%	4,25%	4,50%
R6085_30_LV5070	RAP 6085	30%	3,65%	3,95%
RAB8_10_LV5070	RAP AB8	10%	4,85%	5,15%
RAB8_20_LV5070	RAP AB8	20%	4,50%	4,68%
RAB8_30_LV5070	RAP AB8	30%	3,70%	-

É importante ressaltar que o TLP de misturas asfálticas pela metodologia Marshall é determinado a partir da análise de todas as propriedades volumétricas e os limites estabelecidos para cada uma. Bernucci et al (2008) sugerem a utilização de um gráfico que cruze os resultados de volume de vazios (Vv) e relação betume-vazios (RBV) para que seja possível escolher um TLP que favoreça as duas propriedades na mistura. A

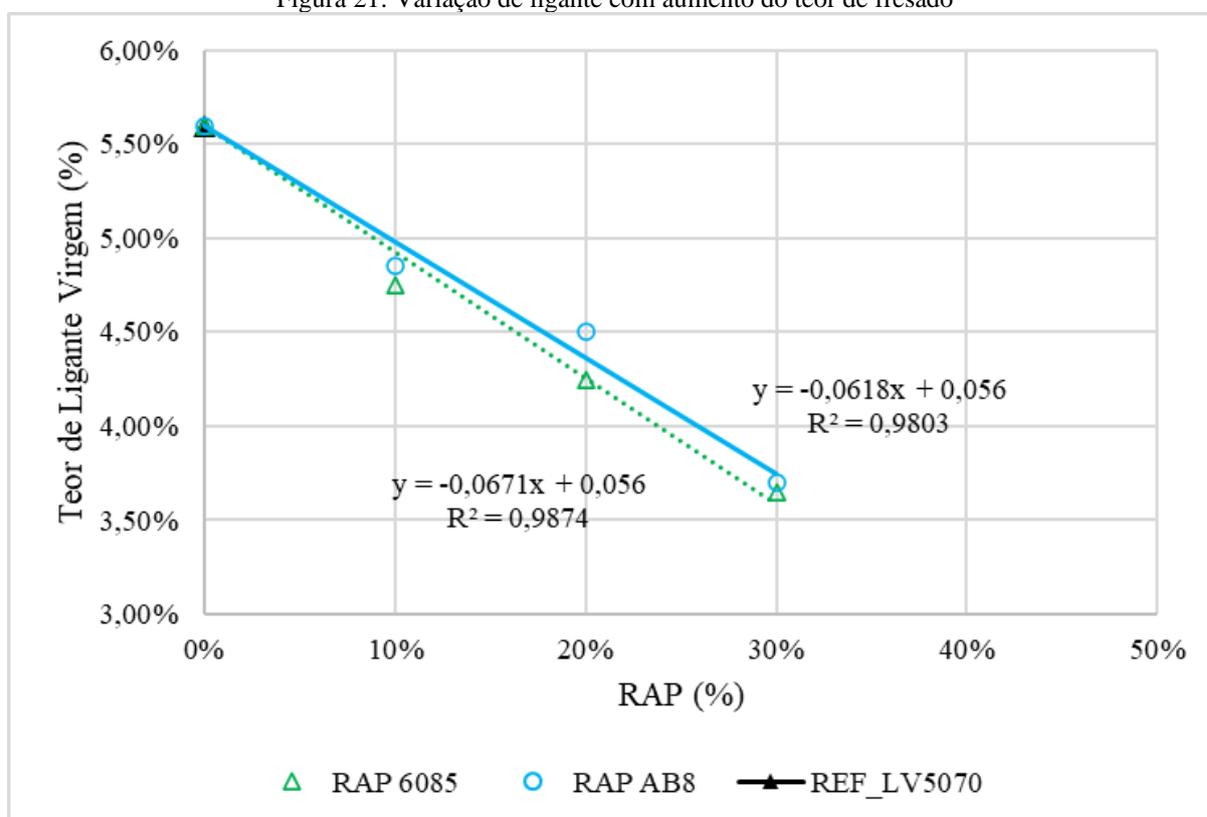
Tabela 15 apresenta a determinação de TLP levando em consideração o gráfico cruzado das propriedades Vv-RBV, na última coluna, e a determinação de TLP para atingir exatamente 4% de Vv, na quarta coluna.

Para a mistura de referência adotou-se o método Vv-RBV, no entanto, para as misturas com aplicação de RAP os resultados de RBV podem estar mascarados pela incerteza do grau de Avaliação de Diferentes Fontes de Material Fresado com Ligantes Não-Convencionais na Reciclagem à Quente

ativação (DoA) do ligante do RAP, sendo imprudente considerar qualquer uma das teorias extremas para sua determinação, sabendo que elas não ocorrem de fato. Também é chamada atenção para o fato de as curvas Vv-RBV não permitirem uma determinação cruzada para a mistura RAB8_30_LV5070. Assim, optou-se por determinar TLP baseado apenas no Vv de 4% para essas misturas, conforme especificações. Os valores em negrito na tabela referida representam os valores escolhidos para cada uma das misturas.

É possível perceber a variação que acontece no TLP necessário para garantir a trabalhabilidade e eficiência das misturas com o aumento de RAP. A Figura 21 permite observar essa variação. Nota-se que com o aumento do teor de fresado adicionado ocorre redução da quantidade de ligante virgem necessário. O que nos permite confirmar, corroborando os dados apresentados na revisão bibliográfica, que a reciclagem a quente do material fresado realmente colaborou para a redução de utilização do ligante virgem, principalmente ao notar a redução de 1,9% para as misturas com 30% de RAP, quase 1/3 da quantidade de ligante necessário para a mistura virgem.

Figura 21: Variação de ligante com aumento do teor de fresado



A Tabela 16 contém os dados de massas específicas e ligante asfáltico absorvido e efetivo nas misturas. Os valores foram obtidos através da aplicação das equações descritas no item 3.5.1.

Tabela 16: Ligante efetivo nas misturas

Mistura	Gmm (g/cm ³)	Gsb (g/cm ³)	Gse (g/cm ³)	Pba (%)	Pbe (%)
REF_LV5070	2,412	2,595	2,629	0,51	5,12
R6085_10_LV5070	2,431	2,613	2,635	0,32	4,90
R6085_20_LV5070	2,438	2,628	2,642	0,21	4,97
R6085_30_LV5070	2,453	2,642	2,655	0,18	4,86
RAB8_10_LV5070	2,430	2,600	2,638	0,55	4,78
RAB8_20_LV5070	2,424	2,597	2,635	0,56	4,88
RAB8_30_LV5070	2,423	2,600	2,619	0,28	4,81

Considerando as quantidades de ligante virgem adicionadas e os teores de fresado nas misturas, foram determinadas também as quantidades totais de ligante em cada uma delas. Os resultados mostram que ocorre uma redução do ligante total para todas as misturas contendo fresado (Tabela 17). Importante lembrar que o teor de ligante envelhecido na mistura é determinado de acordo com o teor de ligante em cada uma das fontes de fresado, e que os teores de 10, 20 e 30% correspondem às porcentagens do esqueleto pétreo, portanto, quando considerada a mistura total, esses valores reduzem em função da presença de ligante virgem que passa a compor o peso da mistura total.

Tabela 17: Quantidades de ligante nas misturas

Mistura	Teor de ligante virgem (%)	Teor de fresado na mistura (%)	Teor de ligante envelhecido na mistura (%)	Teor de ligante total da mistura (%)	Teor de ligante efetivo - Pbe (%)
REF_LV5070	5,60%	0%	0,00%	5,60%	5,12%
R6085_10_LV5070	4,75%	10%	0,45%	5,20%	4,90%
R6085_20_LV5070	4,25%	20%	0,91%	5,16%	4,97%
R6085_30_LV5070	3,65%	30%	1,38%	5,03%	4,86%
RAB8_10_LV5070	4,85%	10%	0,45%	5,30%	4,78%
RAB8_20_LV5070	4,50%	20%	0,91%	5,41%	4,88%
RAB8_30_LV5070	3,70%	30%	1,38%	5,08%	4,81%

As quantidades de ligante virgem adicionadas nas misturas parcialmente recicladas reduzem conforme aumenta-se o teor de RAP. No entanto, quando consideradas as quantidades totais de ligante nas misturas, é possível perceber que o ligante presente no RAP que foi adicionado não é suficiente para ser responsável por toda a redução no ligante virgem em relação à referência, uma vez que as quantidades totais de ligante das misturas recicladas também são menores que TLP da mistura de referência. Ou seja, mesmo que todo o ligante do RAP fosse considerado ativado ($DoA \cong 100\%$) ainda ocorre uma redução adicional de ligante asfáltico virgem necessário.

Tentando mensurar as variações de ligante virgem entre as misturas, foram projetadas linhas de tendência para cada uma das fontes de RAP das quais foram extraídas regressões lineares ($y=ax+b$), na Figura 21. É possível entender que os coeficientes angulares das retas (ex.: $a = 0,0618$ para RAP AB8) sugerem a taxa de redução de ligante virgem adicionado que ocorre com o aumento de RAP nas misturas parcialmente recicladas a partir da mistura de referência, representada pela constante das regressões ($b = 0,056$), uma vez que o eixo das abcissas representa o ligante virgem adicionado nas misturas. No caso, a mistura de referência (0% RAP) tem teor de ligante de projeto 5,60%

Dessa maneira, a cada incremento de 1% de RAP nas misturas ($x=0,01$), de acordo com a regressão linear, ocorre redução de ligante virgem de 0,0671% para RAP 6085 e 0,0618% para RAP AB8, se fosse realizada uma mistura com 100% RAP as reduções seriam de 6,71% e 6,18% que são valores superiores aos teores de ligantes contidos em cada uma das fontes de RAP. Em outras palavras, as reduções que ocorrem são superiores à total contribuição de ligante de cada fonte de RAP, se fosse o caso de ocorrência da teoria de *full blending*, o que inspira cautela na análise, dado a impossibilidade matemática de tal resultado.

Investiga-se a possibilidade de a redução de TLP estar também atrelada à granulometria dos materiais e sua disposição dentro das misturas. O que dificulta a determinação de DoA nas misturas parcialmente recicladas na perspectiva das dosagens, pela complexidade em diferenciar a parte de redução que diz respeito ao DoA da parte que diz respeito aos esqueleto pétreo.

Outra alternativa, seria discutir sobre a precisão dos resultados de extração de ligante obtidos; fosse problema na determinação do teor de ligante (que foi realizada conforme item 3.2.2 através de refluxo duplo), esperar-se-ia que este resultado fosse impactado apenas na extração do RAP com borracha, já que poderia haver material residual de borracha junto ao agregado, desconsiderado no teor de ligante deste. Tivesse ocorrido, o teor de ligante teria (1) sido determinado a menor e não maior e (2) o AMP60/85 não deveria ter sofrido a mesma interferência. Desta forma, é possível refutar esta última hipótese e reforçar a anterior, de uma possível mudança em função do arranjo granulométrico.

Buscando descobrir os fatores que influenciaram a redução de TLP, outra perspectiva que diz respeito à granulometria das misturas são as propriedades de absorção dos materiais pétreos, dessa forma são investigados os dados de ligante efetivo nas misturas. Em uma mistura

asfáltica, uma certa parcela do ligante é absorvida pelos agregados pétreos (P_{ba}), essa parcela é determinada em função da massa total do conjunto de agregados presente na estrutura. Ela é constante para uma mesma mistura e quando descontada do teor de ligante disponível, obtém-se a quantidade de ligante efetiva (P_{be}), que se encontra nos vazios intersticiais do conjunto pétreo, completando-os até que seja alcançado o volume de vazios esperado para a mistura, e, portanto, constitui a parcela que de fato influencia seu desempenho mecânico.

Por essa perspectiva é possível notar que (1) as variações que ocorrem com P_{be} são sutis, e não correspondem às variações dos teores de RAP nas misturas, se mantendo em um certo valor médio para cada uma das fontes de RAP utilizadas, o que pode estar relacionado com o volume de vazios que é constante entre as misturas de acordo com projeto de dosagem realizado; (2) apesar da redução de ligante virgem que precisa ser adicionado nas misturas com o aumento de RAP, o teor de ligante efetivo das misturas recicladas se mantém constante e majoritariamente superior ao TLP, essa diferença é preenchida pelo ligante do RAP, mas não representa a quantidade total de ligante do fresado presente na mistura (que pode ser acompanhado na Tabela 17, coluna 4) e percebe-se então que esse valor pode estar intimamente relacionado com DoA; (3) TLP é definido de acordo com V_v presente na mistura asfáltica final, fator este que é determinado apenas com dados volumétricos da mistura pronta e compactada, ou seja, apesar de variar conforme os diferentes materiais presentes na mistura, não é determinado em função disso.

Sendo assim, entende-se que a variação que ocorre entre TLP (aqui representado também como LV) e P_{be} pode ser determinada como uma função direta da quantidade de ligante do fresado presente no RAP que se dispõe para suprir as necessidades volumétricas dos vazios da mistura (VAM), ou seja, DoA. Dessa forma, propõe-se a equação (11) para determinação do DoA das misturas estudadas, como forma de explicar numérica e volumetricamente seu conceito.

$$DoA = \frac{(P_{be} - P_{LV})}{(1 - P_{LV}) \times RAP \times P_{bRAP}} \quad (11)$$

Onde:

DoA= grau de ativação do ligante do RAP;

P_{be} = teor de ligante efetivo na mistura, em porcentagem da mistura total;

P_{LV} =teor de ligante virgem da mistura, em porcentagem da mistura total;

RAP= teor de RAP utilizado na mistura;

$P_{b\text{RAP}}$ = teor de ligante do RAP determinado pelo ensaio de extração de ligante;

Utilizando as equações 5 e 6 apresentada anteriormente no item 3.5.1, a equação 11 pode ser lida conforme equação 12:

$$DoA = \frac{\left[P_b - P_s \times \frac{(G_{se} \times G_{sb})}{(G_{se} - G_{sb})} \times G_b \right] - P_{LV}}{(1 - P_{LV}) \times RAP \times P_{bRAP}} \quad (12)$$

Os resultados determinados são apresentados pela Tabela 20.

Tabela 18: Grau de ativação do ligante do RAP proposto (DoA)

Mistura	Pbe (%)	PLV (%)	Pbe - PLV	RAP (%)	%ligante RAP	DoA
R6085_10_LV5070	4,90	4,75	0,15	10,00	4,77	0,32
R6085_20_LV5070	4,97	4,25	0,72	20,00	4,77	0,78
R6085_30_LV5070	4,86	3,65	1,21	30,00	4,77	0,88
RAB8_10_LV5070	4,78	4,85	-0,07	10,00	4,76	-0,16
RAB8_20_LV5070	4,88	4,50	0,38	20,00	4,76	0,42
RAB8_30_LV5070	4,81	3,70	1,11	30,00	4,76	0,80

Considerando que as premissas apresentadas são verdadeiras, percebe-se que a utilização de maiores teores de RAP aumentam a colaboração do ligante oxidado na mistura. É possível notar também que as misturas com RAP 6085 desenvolvem melhor DoA com menores teores de RAP quando comparado ao RAP AB8, apontando maior dificuldade de ativação do ligante desse fresado que chega a ter um valor negativo na mistura com 10%. Nesse caso, entende-se que valores negativos de DoA indicariam que o material asfáltico envelhecido não conseguiu ser ativado, ou a ativação aconteceu em parcelas tão pequenas que sua contribuição não pode ser diferenciada do material asfáltico absorvido pelos agregados da mistura.

O RAP AB8 pode ter tido maior dificuldade de ativação de ligante não em função de estar mais ou menos oxidado em relação ao RAP 6085, mas como possível consequência das partículas de borracha presentes no material, fazendo com que o material funcione de maneira distinta de ligantes convencionalmente utilizados, dificultando sua mobilização. Ou ainda, para conseguir ativar melhor ligantes asfálticos desse tipo talvez seja necessário maior temperatura de pré-aquecimento, já que por si só ligantes do tipo AB8 necessitam maiores temperaturas que seja possível sua manipulação.

Outros parâmetros volumétricos também devem ser determinados de acordo com a dosagem Marshall, atendendo limites estabelecidos pelas especificações. Após a escolha dos TLP's, para

estes teores são calculadas e verificadas as propriedades volumétricas das misturas. Dessa forma, a Tabela 19 apresenta os resultados dos diferentes parâmetros de dosagem das misturas.

Tabela 19: Resultados das dosagens

Mistura	Teor de Ligante (%)	Volume de Vazios (%)	Relação Betume Vazios - BR (%)	Vazios do Agregado Mineral - BR (%)	Gmm (kN/m ³)	Gmb (kN/m ³)
REF_LV5070	5,60	3,9	76,8	16,9	2,412	2,316
R6085_10_LV5070	4,75	4,0	75,7	14,6	2,431	2,334
R6085_20_LV5070	4,25	3,9	73,8	13,5	2,438	2,340
R6085_30_LV5070	3,65	4,0	70,8	12,1	2,453	2,355
RAB8_10_LV5070	4,85	4,0	73,9	15,3	2,430	2,333
RAB8_20_LV5070	4,50	4,0	76,6	13,7	2,424	2,327
RAB8_30_LV5070	3,70	4,0	65,3	10,1	2,423	2,326

A Tabela 12 apresenta os limites para cada uma das propriedades de acordo com as normativas vigentes. Nota-se que a mistura de referência REF_LV5070 atende aos limites de 75 a 82 de RBV (se aproximando do limite inferior) e atende ao VAM acima de 15%. Reforça-se que os limites são os mesmos para ambas as exigências, nacional (DNIT ES 02-2006) e estadual (DAER ES P16/91).

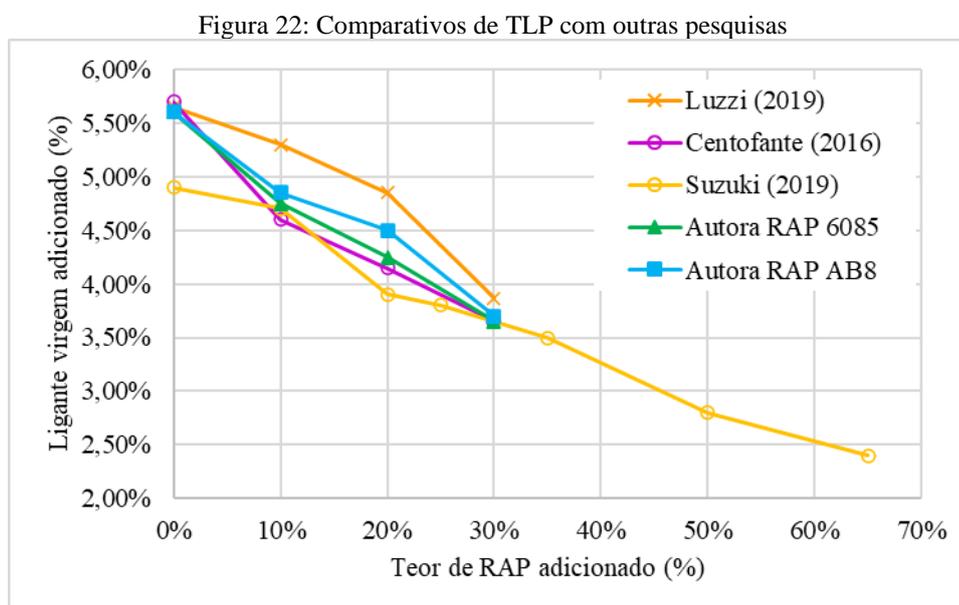
No que diz respeito as misturas com utilização de material fresado, é possível perceber que a maioria não atende as exigências nacionais para capas de revestimento com utilização de reciclagem, que se mantém exatamente as mesmas para materiais sem utilização de reciclagem. Com exceção de R6085_10_LV5070 e RAB8_20_LV5070 para os limites de RBV e RAB8_10_LV5070 para VAM, que se encaixam beirando os limites mínimos, nenhuma das outras misturas atendem a esses limites.

Quando considerada a normativa estadual do estado de São Paulo (DER_SP ET-DE0P00/32) que também trata das exigências para capas de revestimento com uso reciclagem, as misturas com RAP atendem aos limites reduzidos para RBV, de 65 a 85, e apenas as misturas com 30% de RAP não atendem ao limite mínimo de VAM, que passa a ser 13% para a normativa em questão.

Contudo, há a necessidade de ressaltar que conforme discutido anteriormente, a teoria de *Black Rock* (BR), utilizada para realização das dosagens, não é o que realmente acontece em misturas asfálticas recicladas a quente. Considerando que uma parte do ligante oxidado presente no RAP

pode migrar para compor a mistura de ligante disponível no material asfáltico, podem ocorrer alterações no comportamento desses parâmetros de VAM e RBV de acordo com o DoA do RAP, esses parâmetros serão analisados e considerados em seguida.

Luzzi (2019) realizou estudo com a mesma fonte de material fresado RAP 6085 utilizado nesta pesquisa, porém com a utilização de ligante virgem do tipo AMP 6085. Também utilizou os teores de 10, 20 e 30% de RAP. Centofante (2016) estudou os mesmos teores de fresado, porém com fresado de outra fonte e com ligante virgem 50/70. Suzuki (2019) investigou teores de até 65% de RAP com ligante virgem do tipo 30/45. Os autores também apresentaram redução de TLP com aumento da utilização de RAP nas misturas recicladas a quente, conforme apresentado na Figura 22.



As variações observadas entre os materiais com RAP 6085 da presente pesquisa e da pesquisa de Luzzi (2019) revelam consistência nos dados, uma vez que a fonte utilizada de LV difere. Luzzi (2019) utiliza AMP 60/85, que costumeiramente necessita quantidades superiores de ligante para satisfazer as propriedades volumétricas das misturas asfálticas, em relação ao LV 50/70. Ainda os resultados desta pesquisa são bastante próximos aos de Centofante (2016) que utiliza o mesmo tipo de ligante virgem, com a mesma variação de RAP.

Importante notar que as misturas de Suzuki (2019) são as que apresentam os menores teores de ligante virgem adicionados. Seus resultados ainda se aproximam aos resultados de Centofante (2016). No entanto dentre as pesquisas apresentadas a de Suzuki (2019) é a única que não realiza o pré-aquecimento do RAP nos teores até 25%, o que acarretaria em menor quantidade de

mobilização de ligante do RAP, ou seja, menor DoA. Os teores de ligante virgem adicionados por Suzuki (2019) são menores em relação a todas as outras misturas com pré-aquecimento do fresado, que teoricamente teriam maior DoA. Assim, as diferenças entre as pesquisas foram analisadas mais a fundo.

Para conseguir analisar de maneira mais aprofundada as variações de teor de ligante de projeto entre os estudos considerados na comparação, em seguida apresenta-se a Tabela 20, que mostra as diferenças entre materiais presentes em cada um dos estudos. Verifica-se que Centofante (2016) utiliza um RAP com o maior teor de ligante entre os analisados, e mesmo com a utilização do pré-aquecimento, as misturas de Suzuki (2019) têm menor teor de ligante virgem adicionado quando considerado esse fator em conjunto com a falta de pré-aquecimento do RAP.

Tabela 20: Análise comparativa dos materiais dos diferentes estudos

Autor	Materiais utilizados			
	Agregado virgem	Ligante virgem	Ligante RAP	% Ligante do RAP
Zappe (2020)	Granítico	CAP 50/70	AMP 60/85	4,77
			AB8	4,76
Luzzi (2019)	Granítico	AMP 60/85	AMP 60/85	4,95
Suzuki (2019)	Basalto	CAP 30/45	Ligante modificado com borracha	5,89
Centofante (2019)	Não-disponível	CAP 50/70	Não-disponível	6,76

Ainda nesta perspectiva, percebe-se que o tipo de agregado virgem utilizado difere na sua composição mineralógica. A presente pesquisa e Luzzi (2019) utilizam a rocha ígnea plutônica do tipo granito, enquanto Suzuki (2019) utiliza a rocha ígnea vulcânica do tipo basalto, que por ser classificada como básica quanto à carga elétrica superficial do agregado (enquanto a rocha granito é ácida), é conhecida por ter melhor adesividade. Logo são investigadas as propriedades de absorção obtidas pelos autores, que podem ser analisadas na Tabela 21.

Observa-se que os agregados graníticos utilizados por esta pesquisa e Luzzi (2019), têm menor absorção dentre os agregados virgens utilizados. Suzuki (2019) utiliza agregados com maior capacidade de absorção em relação aos agregados graníticos, o que possivelmente acarretaria em uma quantidade maior de ligante necessário para suprir os parâmetros volumétricos das misturas, o que também não coincide com os resultados esperados na comparação entre estudos realizados.

Tabela 21: Análise comparativa de absorção dos agregados utilizados

Autor	Absorção agregado virgem			Classificação mineralógica
	Norma	Fração	Absorção (%)	
Zappe (2020)	DNER ME 195/97	3/4"	0,72	Granito
	DNER ME 195/97	3/8"	1,17	Granito
	ABNT NBR NM 30:2001	Pó-de-pedra	0,79	Granito
Luzzi (2019)	DNER ME 081/98	-	0,95	Granito
Suzuki (2019)	AASHTO T85 e AASHTO T84	B1	1,10	Basalto
	AASHTO T85 e AASHTO T84	Pedrisco	1,70	Basalto
	AASHTO T85 e AASHTO T84	Pó-de-pedra	1,70	Basalto
Centofante (2016)	DNER ME 081/98	3/4"	2,66	Não-disponível
	DNER ME 081/98	3/8"	3,22	Não-disponível

É importante notar que em sua mistura de referência (0% RAP) Suzuki (2019) apresenta teor de LV também inferior às demais misturas de referência, dessa maneira, entende-se que as reduções de LV com aumento de RAP foram maiores para Suzuki (2019) em função da seleção de materiais virgens e porções granulométricas selecionadas, e não apenas por variação de DoA que possa ter ocorrido entre os RAP's das diferentes pesquisas.

4.2. Análises volumétricas

Apesar das dosagens e determinação do TLP terem considerado a teoria de *Black Rock* (BR), entende-se que a situação que ocorre dentro das misturas recicladas não é esta. Por isso único parâmetro volumétrico que foi o utilizado para escolha do TLP foi o Vv que pode de fato ser mensurado. Os demais resultados de VAM e RBV podem sofrer variações dependendo do DoA do material. Dessa maneira foram realizadas análises de algumas propriedades volumétricas que seriam diretamente influenciadas pela variação do (DoA) dos materiais fresados.

Uma vez que a situação real seria de um *Partial Blending* (PB), as propriedades volumétricas em estudo foram projetadas, para os valores de TLP, considerando as duas teorias extremas (FB e BR). Para tanto, os resultados obtidos para as propriedades de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Relação betume-vazios (RBV) são apresentados em Figura 23 e Figura 24, e resumidos pela Tabela 22.

VAM consiste no somatório dos vazios que compõe a mistura asfáltica, são eles vazios com ar (Vv) e vazios com ligante asfáltico (VCB). Como as projeções foram determinadas para os teores de projeto das misturas, ou seja, com Vv de 4%, a parcela que rege as diferenças alcançadas entre FB e BR para o VAM é o VCB, que depende diretamente da quantidade de ligante asfáltico considerado.

Tabela 22: Análises de variação volumétricas das misturas

Mistura	Teor de LV (%)	Vv (%)	RBV - BR (%)	RBV - FB (%)	VAM - BR (%)	VAM - FB (%)
REF_LV5070	5,60	3,9	76,8	76,8	16,9	16,9
R6085_10_LV5070	4,75	4,0	75,7	77,3	14,6	15,7
R6085_20_LV5070	4,25	3,9	73,8	77,4	13,5	15,6
R6085_30_LV5070	3,65	4,0	70,8	77,1	12,1	15,4
RAB8_10_LV5070	4,85	4,0	73,9	75,6	15,3	16,3
RAB8_20_LV5070	4,50	4,0	76,6	79,8	13,7	15,9
RAB8_30_LV5070	3,70	4,0	65,3	77,0	10,1	15,4

Para ambas as fontes de fresado percebe-se redução do VAM com aumento do teor de fresado quando considerada a teoria BR, que se relaciona também à variação de teores ótimos de ligante com aumento de fresado. Já para a situação FB essa diferença tem sua magnitude reduzida, mostrando uma maior estabilização do VAM com as variações de RAP. O aumento dos resultados de BR para FB eram esperados, e o aumento da diferença entre eles com aumento de RAP é em função da quantidade total de ligante presente no material fresado (quanto maior o teor de RAP, mais ligante do RAP tem na mistura).

A linhas pontilhada (15%) e tracejada (13%) presentes no gráfico indicam os limites mínimos para as normativas DNIT e DER-SP, respectivamente. Nota-se que na situação FB as misturas não apenas se encaixam aos requisitos DER-SP, como também atendem aos requisitos nacionais, mais rígidos, determinados pelo DNIT para materiais reciclados.

Como a situação real do que acontece na mistura seria de um PB, entende-se que os resultados realistas estariam dispostos na área entre as linhas BR-FB para cada um dos materiais fresados, convergindo visualmente para atendimento à normativa DER-SP. Entender esses limites entre FB e BR são de suma importância para compreender as possíveis variações do material que podem ocorrer dependendo dos valores de DoA e DoB ocorridos com a presença do material fresado.

O que demonstra a importância de se conhecer melhor os mecanismos envolvidos entre ligantes de misturas recicladas, como o grau de ativação do ligante do fresado (DoA), que permitiria realizar uma avaliação mais apurada das misturas dosadas.

Figura 23: Análise dos vazios de agregado mineral das misturas

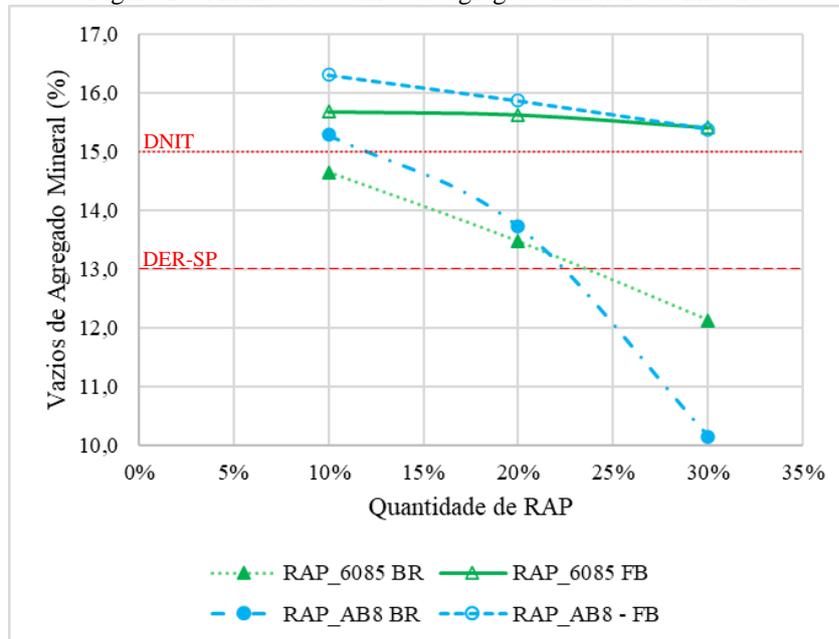
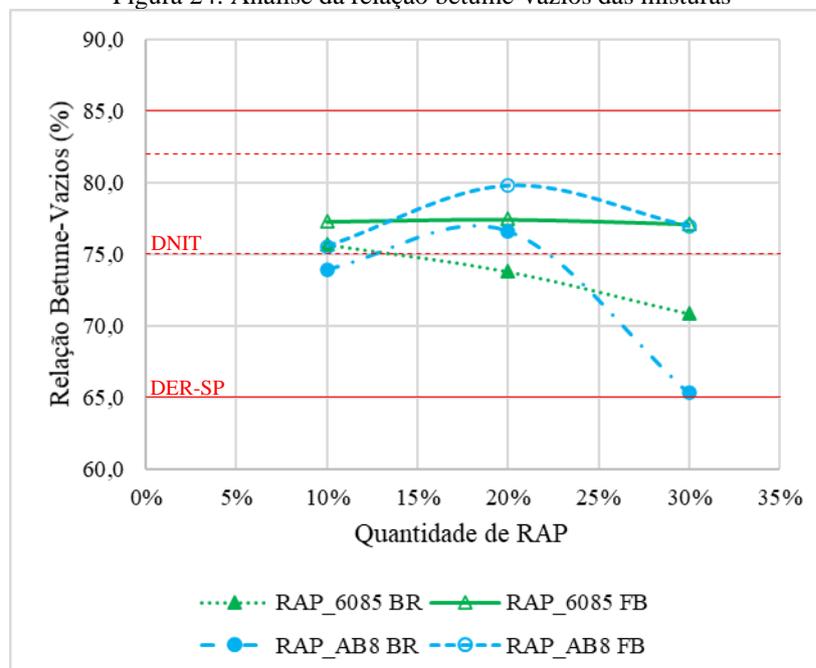


Figura 24: Análise da relação betume-vazios das misturas



A Relação Betume-Vazios (RBV) é a razão entre VCB e VAM, uma relação adequada entre os dois parâmetros garante boa performance da mistura. Para o caso estudado, como Vv de projeto é 4% considerado adequado para o desempenho das misturas, valores de RBV muito altos

indicam excesso de ligante em relação aos vazios disponíveis na mistura, que pode acarretar em problemas funcionais como, por exemplo, exsudação, ou problemas estruturais como deformação da camada asfáltica. Já valores muito baixos de RBV podem indicar problemas de durabilidade na mistura, com quantidades insuficientes de ligante asfáltico para suprir as solicitações do material, podendo ocasionar menor resistência à fadiga.

No caso das misturas com RAP 6085 nota-se uma tendência de redução de RBV com aumento de RAP para situação BR, enquanto que para FB esses valores se mostram mais estáveis, compondo um patamar de resultados. Esse comportamento não é observado para as misturas com RAP_AB8, onde é notável a presença de um pico nas misturas com 20%, a propriedade tem aumento entre 10 e 20% seguido de uma redução para o teor de 30%.

Novamente as diferenças entre BR e FB são crescentes com o aumento do teor de RAP inserido nas misturas, em função do acréscimo em percentual da quantidade de ligante residual do RAP que passa a ser considerado na situação FB.

As linhas contínuas no gráfico representam os limites estabelecidos para a normativa DER-SP (65 a 85%), e as linhas tracejadas delimitam as restrições da normativa nacional DNIT (75 a 82%). As projeções realizadas para FB atendem os limites das duas normativas analisadas, enquanto para BR são necessários os limites mais abertos para o cumprimento. Considerando PB como a situação real, os resultados estariam em algum lugar nas áreas entre BR-FB, para tanto é possível perceber que mesmo nessas situações os possíveis resultados teriam dificuldade de atendimento à normativa nacional, não pelo intervalo reduzido, mas pelo valor rígido do limite inferior, mesmo se tratando de misturas recicladas.

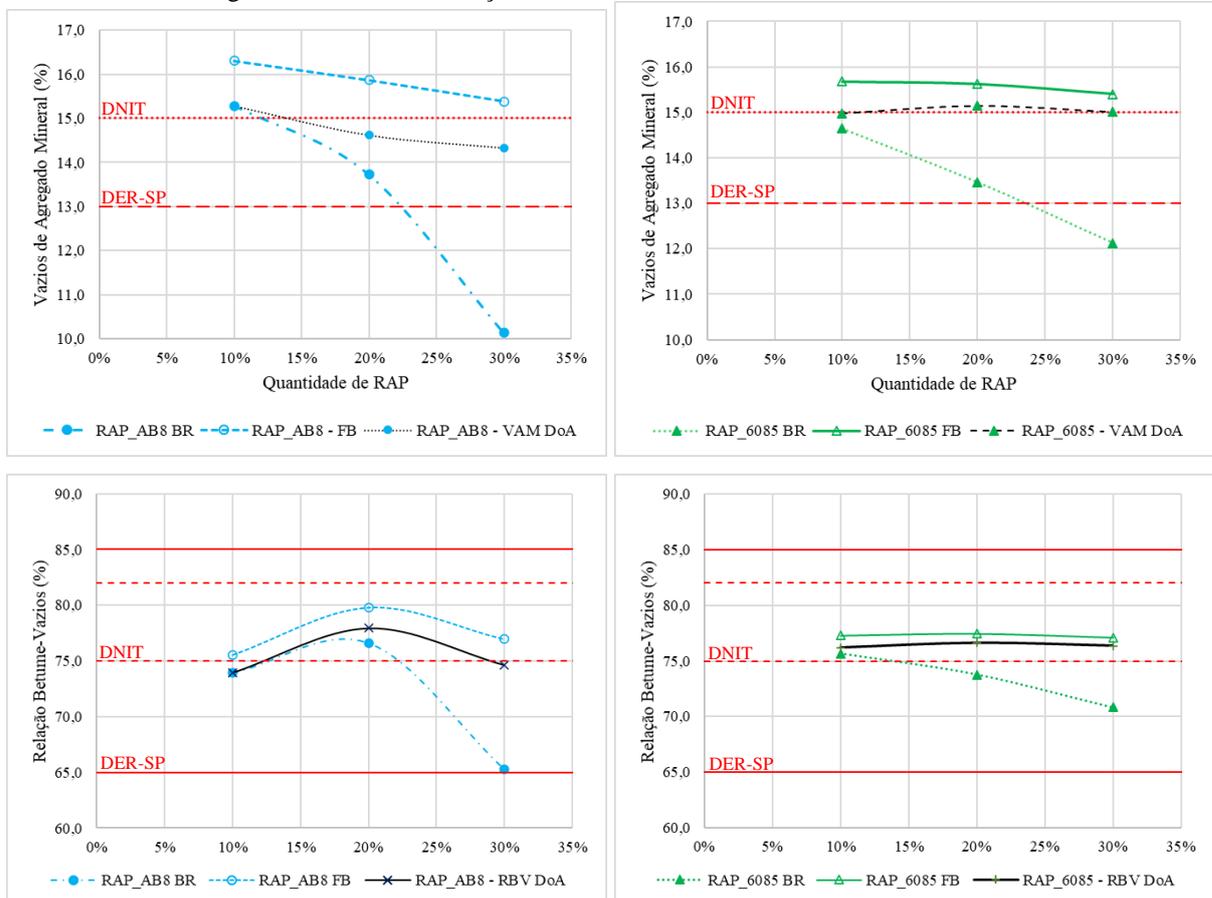
Como possível indicativo de comportamento mecânico, a tendência de redução de RBV com aumento da utilização de fresado indicaria que maiores preocupações deveriam ser em relação a durabilidade dos materiais, já que valores reduzidos de ligante asfáltico em relação aos vazios da mistura, podem aumentar problemas como trincamento e fadiga dos materiais.

Com os valores de DoA calculados anteriormente aos moldes propostos, são determinados os valores de VAM e RBV das misturas estudadas, apresentados a seguir pela Figura 25 e Tabela 23. Mostrando a maior dificuldade das misturas com RAP AB8 de atingirem os limites estabelecidos pelas normativas, em função dos menores graus de ativação alcançados. É também perceptível o atendimento às especificações pelas misturas com RAP 6085.

Tabela 23: Análise da relação volumétrica das misturas com DoA calculado

Mistura	DoA (%)	RBV - BR (%)	RBV - DoA (%)	RBV - FB (%)	VAM - BR (%)	VAM - DoA (%)	VAM - FB (%)
REF_LV5070	N/A	76,8	76,8	76,8	16,9	16,9	16,9
R6085_10_LV5070	32	75,7	76,2	77,3	14,6	15,0	15,7
R6085_20_LV5070	78	73,8	76,6	77,4	13,5	15,1	15,6
R6085_30_LV5070	88	70,8	76,4	77,1	12,1	15,0	15,4
RAB8_10_LV5070	0	73,9	73,9	75,6	15,3	15,3	16,3
RAB8_20_LV5070	42	76,6	77,9	79,8	13,7	14,6	15,9
RAB8_30_LV5070	80	65,3	74,6	77,0	10,1	14,3	15,4

Figura 25: Análise da relação volumétrica das misturas com DoA calculado



4.3. Análises mecânicas

A seguir serão apresentados os resultados da caracterização mecânica das misturas estudadas, de acordo com os ensaios de desempenho realizados, descritos em 3.5.

4.3.1. Dano por umidade induzida

Conforme explanado no item 3.5.3, o dano por umidade induzida (DUI), também conhecido como ensaio Lottmann Modificado, é um ensaio que ajuda medir indiretamente a adesividade e coesão do conjunto agregado-ligante asfáltico. A Tabela 24 resume os resultados encontrados para as misturas, enquanto Figura 26 e Figura 27 apresentam graficamente os resultados. Nas representações são apresentados dados de resistência à tração (RT) sem condicionamento, resistência à tração com condicionamento (RTc), desvio padrão, coeficiente de variação (cv), resistência retida à tração (RRT) e o volume de vazios (Vv) médio para cada conjunto de 6 corpos de prova submetidos aos ensaios conforme explicado no item 3.5.3.

Tabela 24: Análises de DUI das misturas

Mistura	RT	Desvio Padrão	Coeficiente de variação	RTc	Desvio Padrão	Coeficiente de variação	RRT
REF_LV5070	0,83	0,07	8,6%	0,75	0,04	4,9%	91%
R6085_10_LV5070	1,06	0,07	6,6%	0,86	0,01	1,5%	82%
R6085_20_LV5070	1,14	0,03	2,3%	1,05	0,07	6,7%	92%
R6085_30_LV5070	1,35	0,12	8,5%	1,17	0,02	2,1%	87%
RAB8_10_LV5070	1,00	0,06	5,6%	0,98	0,05	5,1%	98%
RAB8_20_LV5070	0,92	0,08	9,1%	0,85	0,06	6,8%	93%
RAB8_30_LV5070	0,99	0,07	7,4%	0,98	0,13	12,8%	99%

A tabela resumo dos resultados apresenta os resultados estatísticos obtidos para cada uma das misturas, com eles é possível perceber o distanciamento da média para cada grupo de amostras, caracterizando a qualidade dos dados apresentados, decorrente da dispersão dos dados em relação à média. Valores reduzidos de desvio padrão apontam a uniformidade dos dados e das amostras produzidas, corroborados pelos relativamente baixos valores de coeficiente de variação.

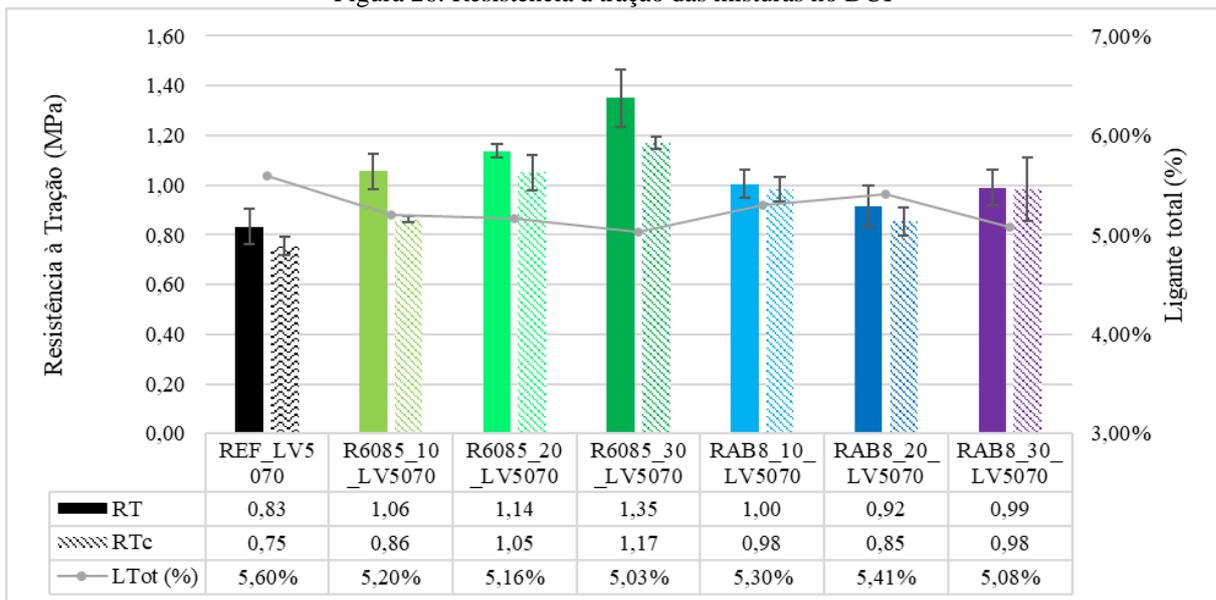
Baseado nos resultados apresentados, alguns padrões podem ser percebidos. Todas as misturas que possuem RAP na composição, independentemente da situação de condicionamento ou do tipo de fresado, apresentaram resultados superiores ao da mistura de referência.

Para as misturas com RAP 6085, em ambas as condições, ocorre aumento da tensão de tração na ruptura conforme aumenta-se o teor de material fresado, indicando que o aumento de material reciclado no concreto asfáltico aumenta sua resistência, necessitando tensão maior para ocasionar a ruptura. A partir de realização de análise de variância (ANOVA) comprova-se que

para RTc realmente os resultados são estatisticamente diferentes, porém para RT sem condicionamento apesar de todas as composições com RAP serem estatisticamente diferentes da mistura de referência, não ocorre diferença significativa entre misturas com 10 e 20% e entre 20 e 30% de RAP 6085.

Ao se tratar do RAP AB8 outro padrão de comportamento é percebido, apesar de todos serem superiores à mistura de referência, o resultado decresce com o incremento de 10% de RAP entre RAB8_10_LV5070 e RAB8_20_LV5070, e aumenta com o incremento de 10% de RAP entre RAB8_20_LV5070 e RAB8_30_LV5070. A ANOVA permite comprovar que não existe diferença significativa entre os resultados dessas misturas, ou seja, os resultados das misturas com RAP AB8 são estatisticamente idênticos, em cada uma das situações analisadas. Sendo assim, para a resistência à tração no ensaio em questão a variação de RAP AB8 não altera o comportamento da mistura.

Figura 26: Resistência à tração das misturas no DUI



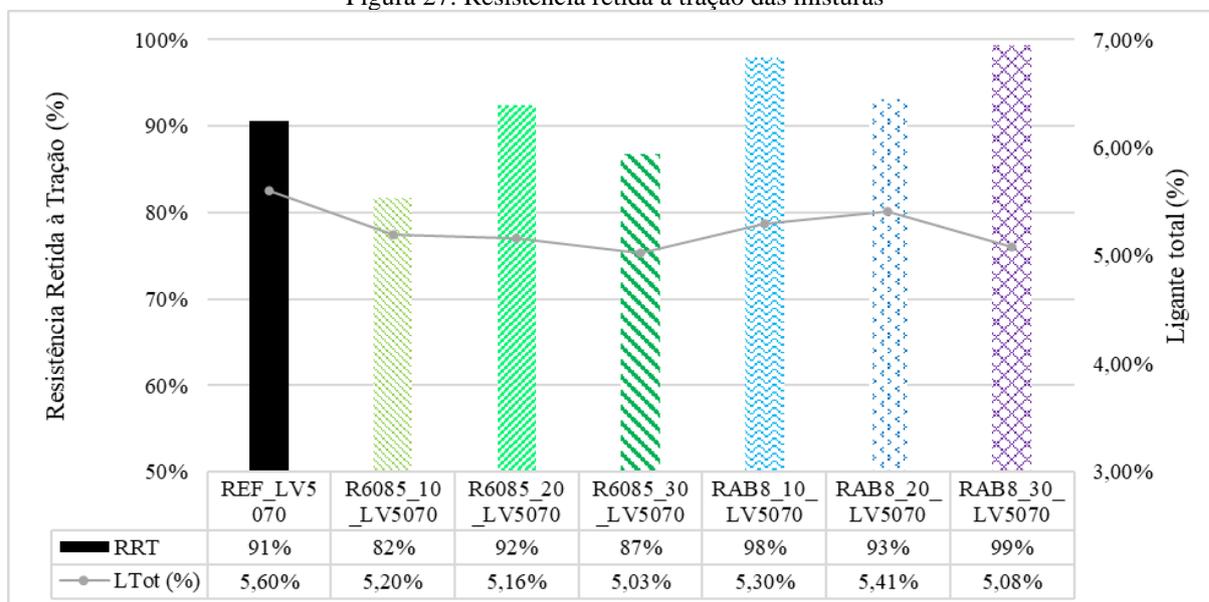
Os Vv's das misturas atendem corretamente os limites definidos para realização do ensaio (de 6 a 8%), permanecendo com variação de 0,6% em relação à média do intervalo proposto.

Dados de RRT representam o quanto o material consegue manter da resistência mecânica após passar pelos ciclos de condicionamento propostos, no caso, com as amostras sendo submetidas ao dano por umidade. Quanto maiores os resultados de RRT menor a influência do dano induzido na mistura, que consegue manter sua propriedade em análise, apresentando boa adesividade entre os materiais.

De acordo com a bibliografia apresentada no item 3.5.3 resultados de RRT superiores a 70% são satisfatórios. No caso em estudo, as misturas atenderam em unanimidade o limite estabelecido, sendo todas superiores inclusive a 80%.

De maneira geral, as misturas com utilização de RAP 6085, apesar de apresentarem valores superiores e crescentes de RT e RTc em relação a REF_LV5070, apresentaram RRT próxima ou inferior a mistura de controle, demonstrando uma interferência do material fresado que reduziria a capacidade da mistura de reter as propriedades após condicionamento, o que poderia indicar uma redução da propriedade de adesividade, mas sem comprometer a mistura, uma vez que todas atendem o limite mínimo recomendado.

Figura 27: Resistência retida à tração das misturas



Enquanto que nas misturas com RAP AB8, mesmo que a resistência à tração das amostras apresentadas anteriormente não tenham sido estatisticamente diferentes, apresentaram resultados de RRT superiores à mistura de controle, com todas as amostras acima de 90% de RRT, mostrando que a presença deste resíduo nas amostras chega a superar o resultado de adesividade do material virgem.

Resultados de adesividade estão diretamente ligados à interação entre o ligante asfáltico e os agregados das misturas. Maiores valores de RRT mostram uma melhor interação entre agregado-ligante, enquanto valores reduzidos indicam uma ligação menos estável entre os materiais.

Os resultados apresentados levam ao entendimento de que as fontes dos fresados influenciam diretamente no resultado de adesividade das misturas, de forma geral com RAP 6085 respondendo de maneira inferior à mistura de referência, e RAP AB8 respondendo de maneira superior à mistura de referência.

4.3.2. Resistência à tração e módulo de resiliência

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR), os ensaios foram realizados na temperatura de 25°C com Vv de projeto (4%) e demais detalhes conforme elucidados no item 3.5.4. Nos resultados são apresentadas as médias de 3 CP's de cada mistura, com variação de um desvio padrão.

A Tabela 25 apresenta o quadro-resumo com as análises do ensaio de RT, enquanto Figura 28 e Figura 29 mostram os resultados gráficos das análises. Em seguida, Tabela 26 apresenta o quadro-resumo com os dados do ensaio MR, ao passo que Figura 30 e Figura 31 permitem observar o comportamento em gráfico desses resultados.

Tabela 25: Análises de RT das misturas

Mistura	RT	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	Vv (médio)
REF_LV5070	1,02	0,05	4,8%	4,2%
R6085_10_LV5070	1,16	0,03	2,5%	4,2%
R6085_20_LV5070	1,41	0,05	3,5%	3,9%
R6085_30_LV5070	1,53	0,11	7,1%	3,9%
R6085_30_LV5070_AR5	1,52	0,08	5,2%	4,3%
RAB8_10_LV5070	1,25	0,04	3,0%	3,9%
RAB8_20_LV5070	1,15	0,03	2,8%	4,1%
RAB8_30_LV5070	1,33	0,03	2,2%	4,3%
RAB8_30_LV5070_AR5	1,32	0,04	3,1%	4,1%

Os valores baixos de desvio padrão e coeficientes de variação bastante reduzidos apontam a qualidade dos dados com baixa dispersão em relação às médias dos resultados para cada mistura. Os valores médios de Vv's também apresentam baixa variação, considerando os 4% de Vv de projeto, as misturas produzidas atendem satisfatoriamente esse requisito, o que pode ser em grande parte responsável pela uniformidade dos resultados.

A Figura 28 apresenta os resultados para a mistura de referência e para os diferentes teores de cada uma das fontes de RAP. A Figura 29 permite comparar as misturas de 30% de RAP com e sem utilização de agente rejuvenescedor (AR) em relação a mistura de referência.

Inicialmente é apontado o cumprimento de requisito normativo, onde todas as misturas atendem, conforme Tabela 12, aos mínimos definidos para RT, sendo 0,65 MPa regulamentado pelas normativas do DNIT para materiais convencionais ou com reciclagem, e 0,80 MPa estabelecido por DER-SP para materiais asfálticos com reciclagem.

Percebe-se que a presença de RAP nas misturas, para todos os teores analisados e independente da fonte, resulta em tensão de ruptura do material superior à mistura de referência. No caso são percebidos os mesmos padrões visíveis ressaltados anteriormente para ambas as fontes de RAP nos resultados dos ensaios RT de DUI. Conforme são aumentados os teores de RAP 6085 nas misturas, aumentam também as cargas necessárias para levar os materiais à ruptura. E pra RAP AB8 é notável uma redução de RT quando se aumenta o teor de RAP de 10 para 20%, e um aumento da propriedade com a variação de RAP entre 20 e 30%, comportamento não esperado, considerando ressalvas já apontadas em 4.3.1.

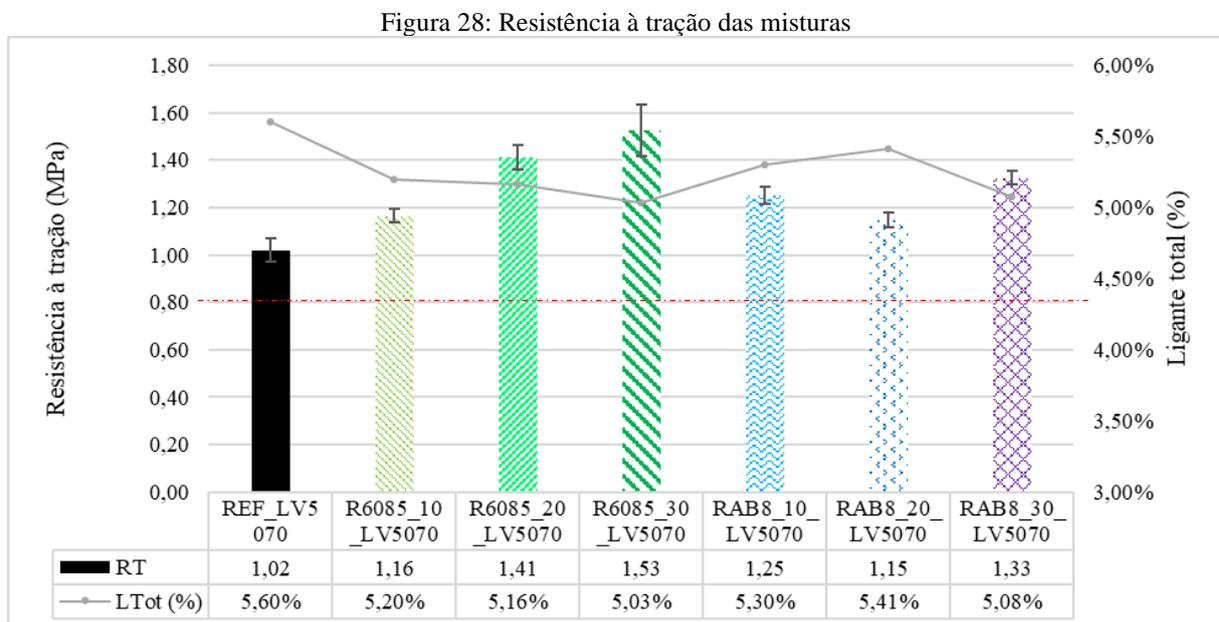
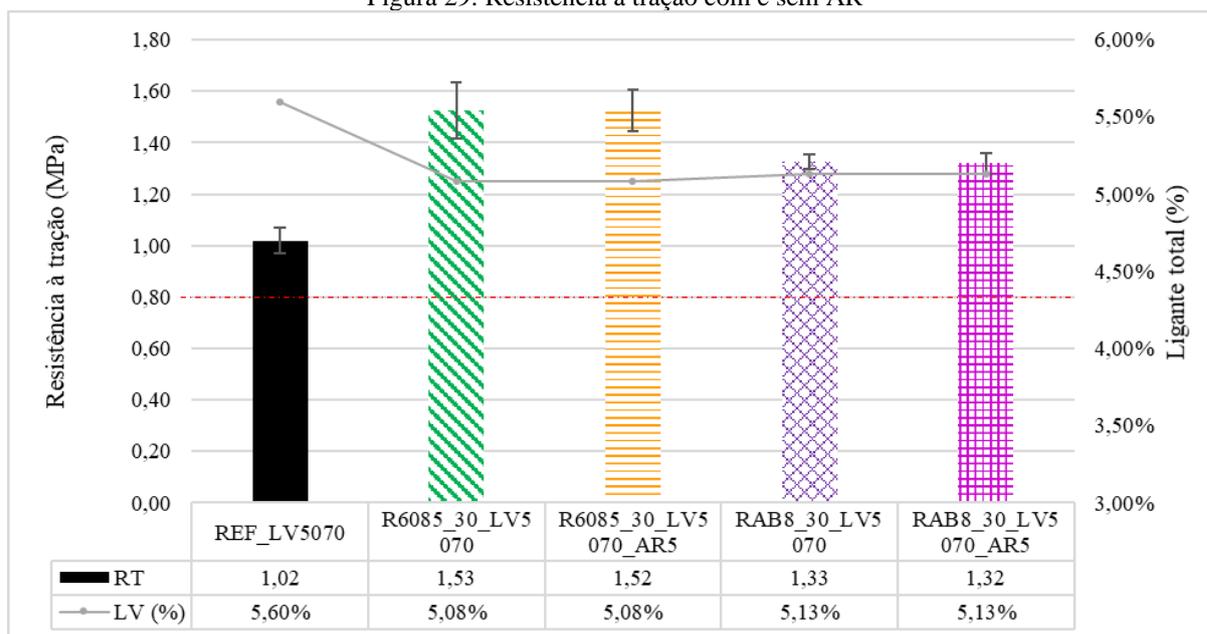


Figura 29: Resistência à tração com e sem AR



Os resultados apresentados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Foi realizado o teste de comparação das médias dentro de dois grupos, entre a mistura de referência e misturas do RAP 6085, e entre a mistura de referência e misturas com RAP AB8. É possível concluir, ao nível de significância de 5%, que existe diferença significativa entre as misturas, pois o p-valor encontrado é menor de 0,05.

Ainda, a partir do teste de comparação de médias de Tukey, com nível de significância de 5%, todas as misturas testadas possuem diferença significativa entre elas. O que permite concluir que as diferenças entre resultados são categoricamente ocasionadas pela utilização dos diferentes teores de fresado.

Os dados apresentados pela Figura 29 mostram que a utilização de AR nas misturas estudadas não alterou os resultados de RT.

Esperava-se que a utilização de AR colaborasse com as misturas restaurando o equilíbrio entre os componentes do ligante asfáltico envelhecido, reduzindo a resistência dele, e transferindo essa modificação para a mistura. Nos casos analisados, conforme a constância de resultados entre misturas com a mesma fonte de RAP, sabendo que a única diferença entre as misturas é a utilização de AR, que tem capacidade de modificar propriedades do ligante final da mistura, os resultados não permitem perceber alteração da carga de ruptura das misturas recicladas com a utilização de AR.

Em um ensaio como o de RTCD algumas propriedades do material se destacam na hora de conferir resistência ao esforço aplicado. A coesão da mistura e o tipo de esqueleto pétreo são elementos que ajudam a ditar o comportamento do material no teste realizado. Essas propriedades são levadas em consideração ao serem englobadas pelo projeto de misturas asfálticas, que considera os diferentes parâmetros volumétricos para aceitação dos materiais. RBV é o parâmetro que leva em consideração tanto o ligante asfáltico quanto o volume de vazios dos agregados minerais.

É possível perceber que os padrões de comportamento para os resultados são exatamente opostos aos padrões descritos no parâmetro de RBV (apresentados anteriormente pela Figura 24) em situação de FB. Analisando dessa perspectiva, conforme RBV é reduzido entre as misturas, o valor de RT aumenta, o que leva a crer que o efeito do material asfáltico total na mistura em relação aos vazios disponíveis influencia os resultados mecânicos de ruptura, como RT, de maneira inversamente proporcional.

Os resultados de RT das misturas em análise foram utilizados para posterior realização do ensaio de MR, cujos resultados estão a seguir. O MR é a propriedade mecânica que define a rigidez do material, correlacionando a tensão aplicada à amostra com a deformação recuperável apresentada pela amostra. Como MR é a razão entre RT e o deslocamento decorrido da aplicação de tensão, maiores valores de MR correspondem a menores deformações, e menores valores de MR são resultado de maiores deformações no material. Os MR apresentados são MR instantâneos obtidos do ensaio.

Tabela 26: Análises de MR das misturas

Mistura	MR (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Vv (médio)
REF_LV5070	3501	307	8,8%	3,8%
6085_10_LV5070	4604	158	3,4%	4,0%
6085_20_LV5070	6105	583	9,5%	3,9%
6085_30_LV5070	5589	694	12,4%	3,9%
6085_30_LV5070_AR5	6251	444	7,1%	4,3%
AB8_10_LV5070	4869	488	10,0%	4,2%
AB8_20_LV5070	4157	468	11,3%	4,2%
AB8_30_LV5070	5564	288	5,2%	3,9%
AB8_30_LV5070_AR5	4618	402	8,7%	4,0%

Mais uma vez nota-se uma boa distribuição dos resultados em relação à média obtida para cada composição, e os coeficientes de variação confirmam fraca dispersão dos dados, garantindo a

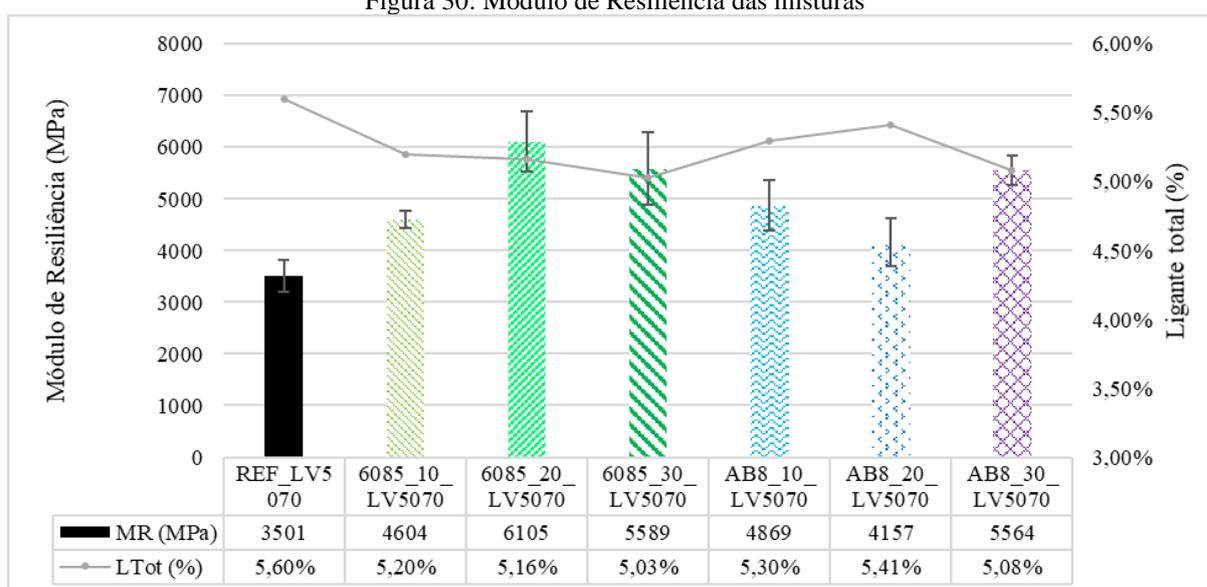
uniformidade na produção das misturas. Novamente os Vv's médios para as amostras estão coerentes com os projetos definidos.

Para ambas as fontes de fresado é possível perceber aumento dos valores de MR com utilização de fresado, porém há ocorrência de oscilação no comportamento com o aumento do resíduo, não acontecendo uma correlação linear entre MR e teor de RAP. Os valores obtidos para todas as misturas são plausíveis com valores encontrados na bibliografia para misturas asfálticas novas produzidas.

Considerando ANOVA realizada existe diferença significativa entre as misturas. A comparação de médias utilizando teste de tukey nos permite notar os comportamentos descritos a seguir para cada uma das fontes de fresado.

Para RAP 6085 a variação não é significativa entre a mistura de referência e com 10% de RAP, não é significativa entre 10 e 30% e também não é significativa entre 20 e 30%, o que significa que estatisticamente os pares indicados apresentam resultados que não podem ser diferenciados em função do ruído experimental. Ou seja, estatisticamente, a adição inicial de 10% não apresenta diferença relevante ao ser comparada com a mistura de referência, o incremento de 10% entre R6085_10_LV5070 e R6085_20_LV5070 já demonstra aumento no resultado de MR para a mistura, enquanto que a mistura final de 30% apenas apresenta diferença de MR em relação a mistura de referência, não podendo ser diferenciada nem de 10% nem de 20%.

Figura 30: Módulo de Resiliência das misturas



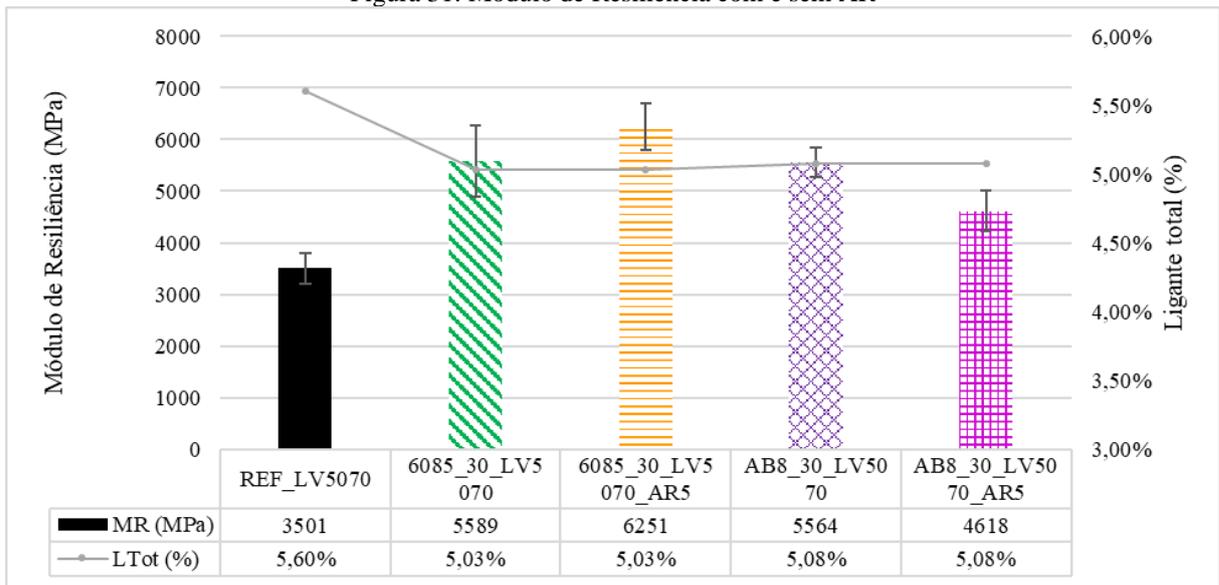
Para RAP AB8 o comportamento é bastante diferente também, diferenças não significativas são percebidas entre os seguintes pares de resultados: referência e com 20% de RAP, 10% e 20%, 10% e 30%. Dessa maneira, o incremento de RAP entre REF_LV50570 e RAB8_10_LV5070 causa aumento do valor de MR para as misturas estudadas, aumentar mais 10% de RAP entre as misturas com 10 e 20% não apresenta diferença notável entre os resultados, mas a mistura RAB8_20_LV5070 também não pode ser diferenciada da mistura de referência. Por fim, a adição de 30% de RAP apresenta acréscimo do valor de MR considerado significativo em relação à mistura de referência e à mistura de 20%, porém, em função do ruído experimental não pode ser diferenciado de RAB8_10_LV5070.

Esses resultados mostram a consistência de MR's das misturas recicladas ao apresentarem resultados coerentes com resultados de misturas virgens comumente utilizadas. Mas também mostram que os teores utilizados são muito baixos para determinar uma tendência de comportamento entre MR e teores de RAP sob as condições de temperatura e carregamento utilizadas no ensaio. O que por sua vez pode indicar a necessidade de complementar as análises realizadas por este ensaio com utilização de outros ensaios em que a atuação do fresado em diferentes teores possa ser melhor caracterizada.

A análise de resultados considerando a utilização de AR (Figura 31) mostra a variação obtida entre as misturas. Nas misturas com RAP 6085 ocorre aumento do MR ao utilizar AR, se distanciando do MR da mistura de referência, e não há diferença significativa entre os resultados. Já na utilização de AB8, a mistura com AR apresenta resultado inferior a mistura sem AR, com possível tendência de restauração da propriedade do material em direção ao comportamento da mistura de referência. No entanto, a análise estatística realizada aponta que não há diferença significativa entre as misturas com e sem AR, e não há diferença significativa entre REF_LV5070 e RAB8_30_LV5070_AR5, Ou seja, apesar da mistura com 30% de RAP AB8 ser mais rígida que a de referência, seu resultado não pode ser diferenciado da mistura com AR, ao mesmo passo que a mistura com AR não pode ser estatisticamente diferenciada da mistura de referência.

Da mesma forma como ocorreu constância de resultados nas misturas com aplicação de AR para a propriedade RT, resultados para o ensaio de MR apontam para um mesmo comportamento, uma vez que não é possível distinguir estatisticamente os resultados com e sem aplicação de AR, para ambos os RAP's, dificultando a percepção da atuação do agente rejuvenescedor nas amostras estudadas nestas condições.

Figura 31: Módulo de Resiliência com e sem AR



A Figura 32 apresenta os resultados de RT para as pesquisas citadas anteriormente, de Luzzi (2019), Centofante (2016), Suzuki (2019) e os resultados da atual pesquisa. Os resultados de maneira geral mostram a tendência de aumento da resistência à tração com o aumento dos teores de material fresado no concreto asfáltico. Estes materiais aplicados em pistas conseguiriam resistir a cargas maiores que a mistura tradicional, necessitando maior esforço para chegar à situação de ruptura frágil.

Figura 32: Comparativo de RT's com outras pesquisas

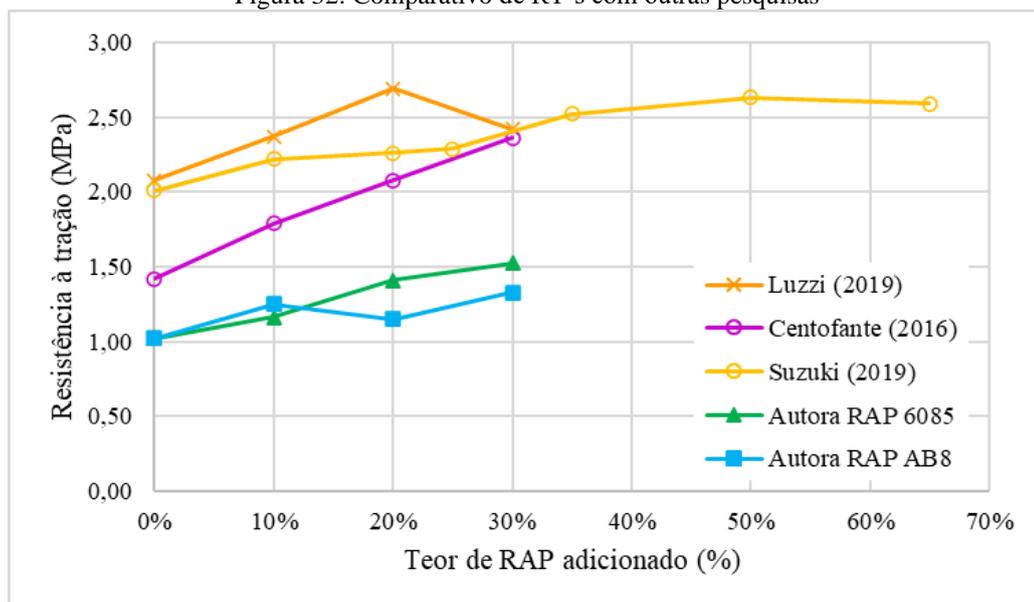
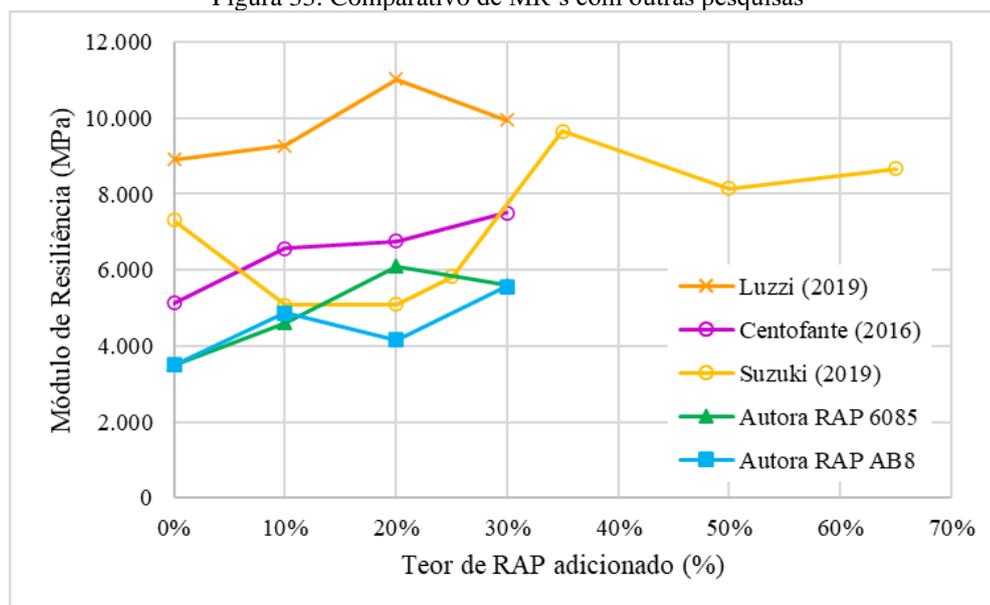


Figura 33: Comparativo de MR's com outras pesquisas



Já a Figura 33 apresenta os resultados de MR para as diferentes pesquisas. É importante ressaltar que Suzuki (2019) não realizou aquecimento prévio do RAP na produção dos CP's com baixos teores de fresado (até 25%), e esses são os únicos valores abaixo da respectiva mistura de referência (0% RAP). Apesar de os demais resultados com utilização de RAP serem superiores às misturas de referência, não é possível perceber qualquer relação linear ou evidente entre os resultados de MR e a variação de teores de RAP ocorrendo quando considerados todos os estudos analisados.

4.3.3. Módulo dinâmico

O ensaio de módulo dinâmico fornece um panorama das características viscoelásticas das misturas asfálticas em análise. Seus resultados são apresentados através das curvas do Espaço de Black, Cole-Cole, Ângulo de fase e Curvas mestras, que podem ser encontradas em seguida.

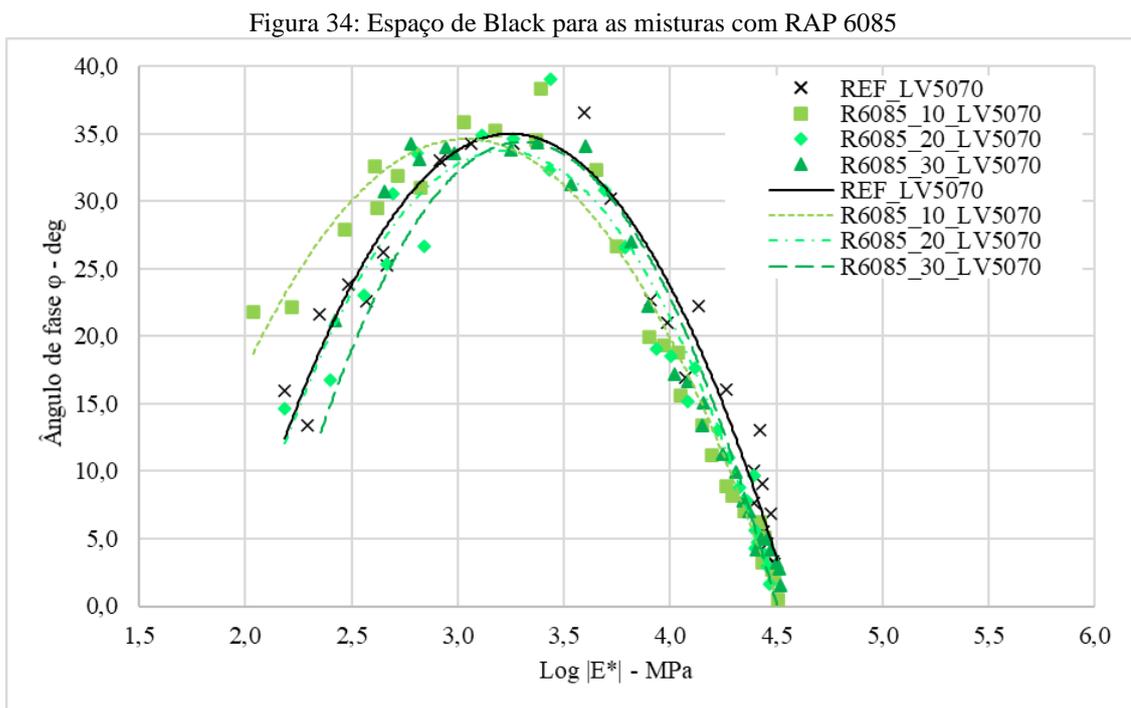
4.3.3.1. Espaço de Black

O Espaço de Black é plotado com os valores aritméticos de ângulo de fase (ϕ) no eixo das ordenadas e com os valores logarítmicos de $|E^*|$ no eixo das abcissas, facilitando análise dos dados em altas temperaturas. As representações gráficas permitem perceber a relação de $|E^*|$ e ϕ independente de frequência e temperatura (KIM, 2009).

Entre Figura 34 e Figura 36 são apresentados os resultados para RAP 6085, RAP AB8 e comparações com e sem AR para as misturas estudadas.

Considerando o conjunto de misturas com RAP 6085 as três curvas de misturas recicladas se apresentam deslocadas horizontalmente entre si, com a mistura de 10% obtendo módulos menores, e as misturas de 30% obtendo módulos maiores, dadas suas características menos e mais rígidas, respectivamente, como consequência do material oxidado presente nelas.

Dessa maneira, para módulos menores obtidos com as maiores temperaturas, a mistura com 10% apresenta maiores ângulos de fase e a mistura de 30% apresenta os menores ϕ . Significando que em momento de menor rigidez misturas com maior quantidade de RAP 6085 tem comportamento mais elástico em relação as outras, podendo ser menos suscetíveis a deformações permanentes, com menor tempo da resposta tensão-deformação. É importante observar que as misturas com menos RAP têm maiores quantidades de ligante asfáltico total, então a variação nessas condições se dá em função da presença do RAP nas misturas em diferentes teores.

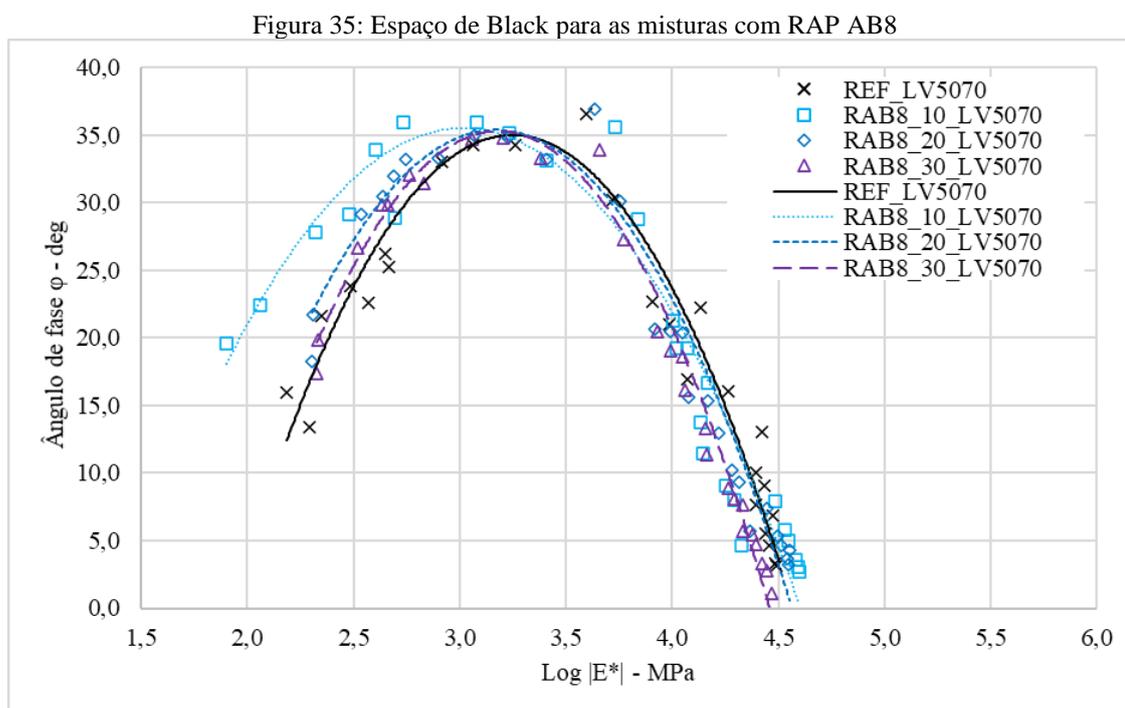


A mistura com 10% de RAP 6085 é a que apresenta comportamento mais distante da mistura de referência, sendo a única que possui maiores ângulos de fase para módulos menores, comportamento mais viscoso. A mistura com 30% de RAP 6085, apresenta menores valores de ângulo de fase em relação à REF_LV5070 para qualquer que seja o módulo apresentado, assim demonstrando caráter mais elástico e menos viscoso da mistura com maiores teores de material fresado.

De maneira geral a baixos módulos a mistura com 20% de resíduo é a que mais se aproxima do comportamento da mistura de referência

As misturas recicladas com RAP AB8 em comparação com a mistura de referência têm maior ângulo de fase com menores módulos. Em geral a mistura com maior quantidade de fresado possui ângulos de fase inferiores às demais misturas recicladas, indicando comportamento menos viscoso.

Assim como acontece com o RAP 6085, para situações de menor rigidez, as misturas com mais material reciclado de RAP AB8 têm menor tempo de resposta tensão-deformação em relação à mistura de referência, com menores ângulos de fase, reduzindo a viscosidade do material e aumentando sua elasticidade conforme aumenta-se a quantidade de RAP.

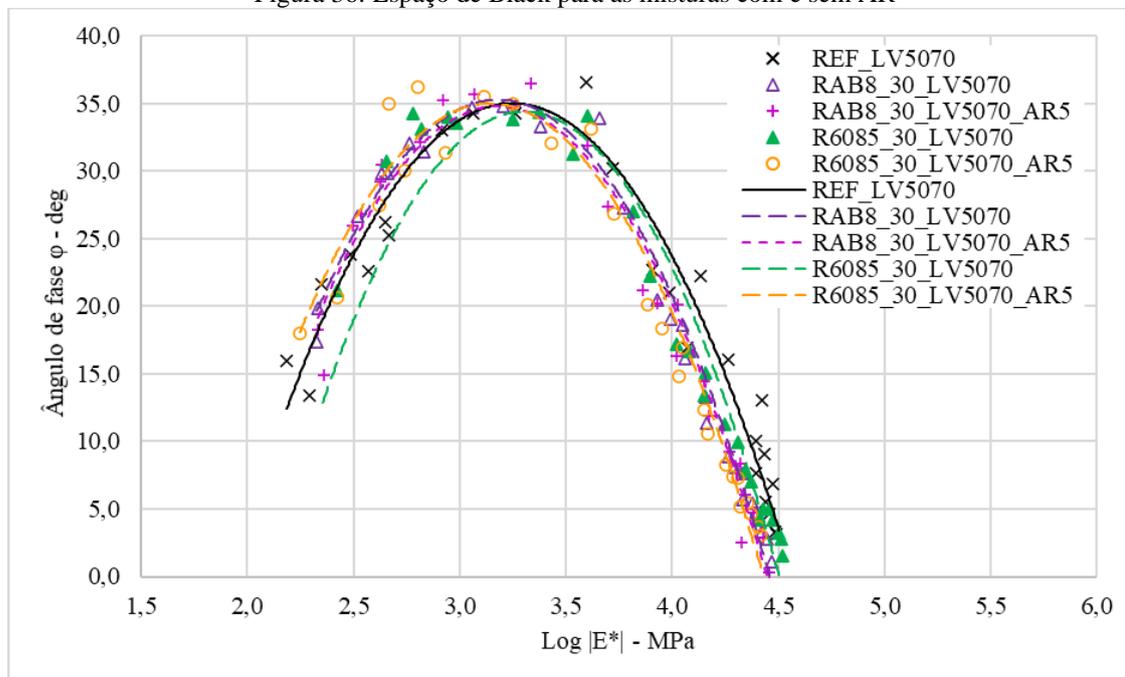


Para esse caso, a mistura que mais se aproxima do comportamento da mistura de referência é a que contém 30% de RAP AB8 na composição. No entanto, a mistura de referência ainda apresenta resultado de menor ângulo de fase para menores valores de $|E^*|$. Podendo possivelmente resistir melhor às solicitações de deformação nas condições de ensaio.

A utilização de AR, conforme Figura 36, gera maior variação dos resultados para RAP 6085, onde é possível perceber a tendência de o comportamento da mistura rejuvenescida se dirigir a

comportamentos próximos às misturas com menores quantidades de fresado, conforme padrão percebido na Figura 34. A aplicação de AR aumentou o ângulo de fase para menores módulos.

Figura 36: Espaço de Black para as misturas com e sem AR



Já no que tange ao RAP AB8, a utilização de AR não apresentou nenhum tipo de variação entre as curvas das misturas, com visível sobreposição dos resultados. O que indica que no âmbito das altas temperaturas, a utilização de AR não interfere na propriedade viscoelástica da mistura. Nesse aspecto, ao AR reagir com o ligante do RAP 6085, reestabelecendo seu equilíbrio entre asfaltenos e maltenos a mistura final de ligantes fez com que a mistura asfáltica aumentasse sua viscosidade em altas temperaturas.

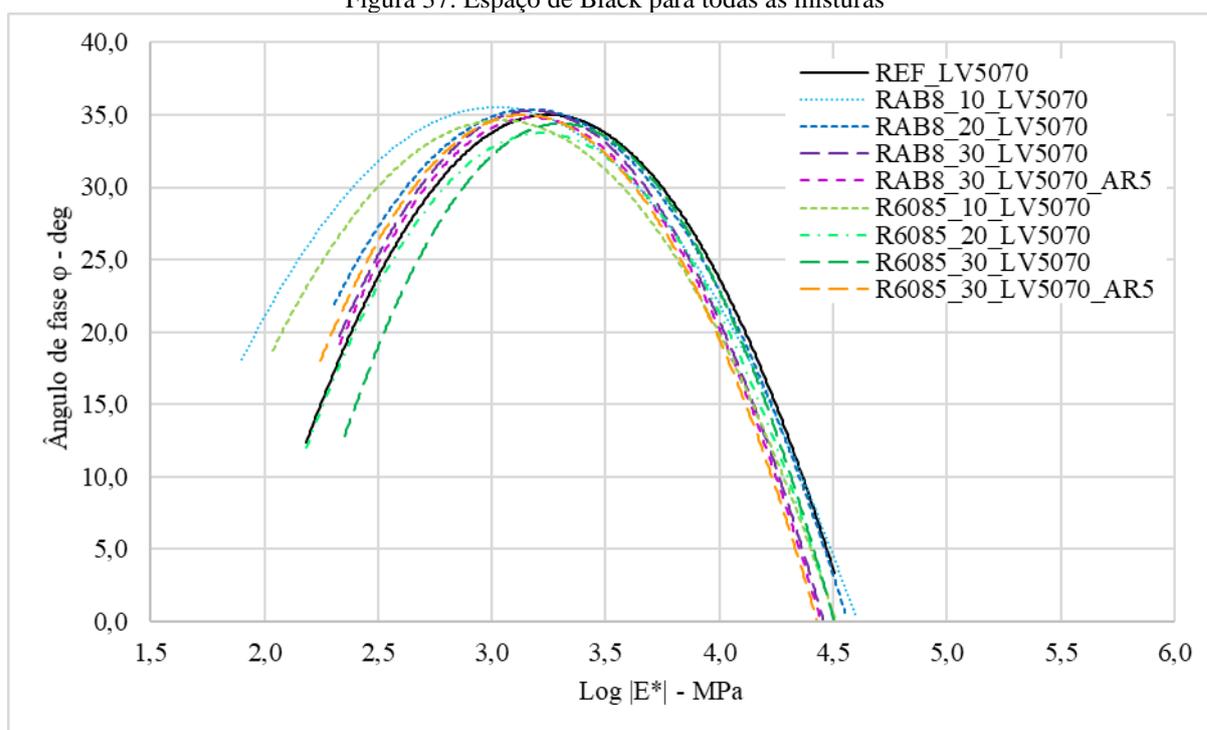
Os gráficos apresentados com os Espaços de Black mostram a baixa dispersão dos resultados em relação às curvas de segunda ordem geradas para sua representação.

A Figura 37 possibilita comparação entre ambas as fontes de RAP, e permite notar que de maneira geral as misturas com RAP AB8 apresentam maiores valores de ângulo de fase quando comparadas com as misturas com RAP 6085. Uma vez que o Espaço de Black permite análise do comportamento dos materiais em altas temperaturas, nos momentos em que os ligantes asfálticos apresentam menor viscosidade, pode-se relacionar esses resultados com um comportamento mais viscoso dos ligantes asfálticos resultantes das misturas com RAP AB8, que também está relacionado com o resultados de DoA obtidos, e certamente são representações

do DoB que ocorreu nas misturas de ligantes, influenciando diretamente esses comportamentos mecânicos em função das propriedades finais dos ligantes.

Almeida Junior (2016), aponta que o tipo de ligante influencia os resultados de ângulo de fase, uma vez que em seu estudo as misturas asfálticas com ligante do tipo 60/85 apresentaram menores valores de ângulo de fase em relação a misturas com ligante convencional 50/70, que seria mais “rígido”. Nos resultados apresentados pela presente pesquisa seria possível inferir essa diferença de ângulo de fase para as diferentes combinações de ligante asfáltico resultantes das misturas recicladas, onde as misturas com RAP AB8 apresentam maiores valores de ϕ quando comparados as misturas com RAP 6085. Sendo assim, misturas com RAP 6085 tenderiam a apresentar menor resistência a deformação permanente em relação as misturas com RAP AB8.

Figura 37: Espaço de Black para todas as misturas



4.3.3.2. Cole-Cole

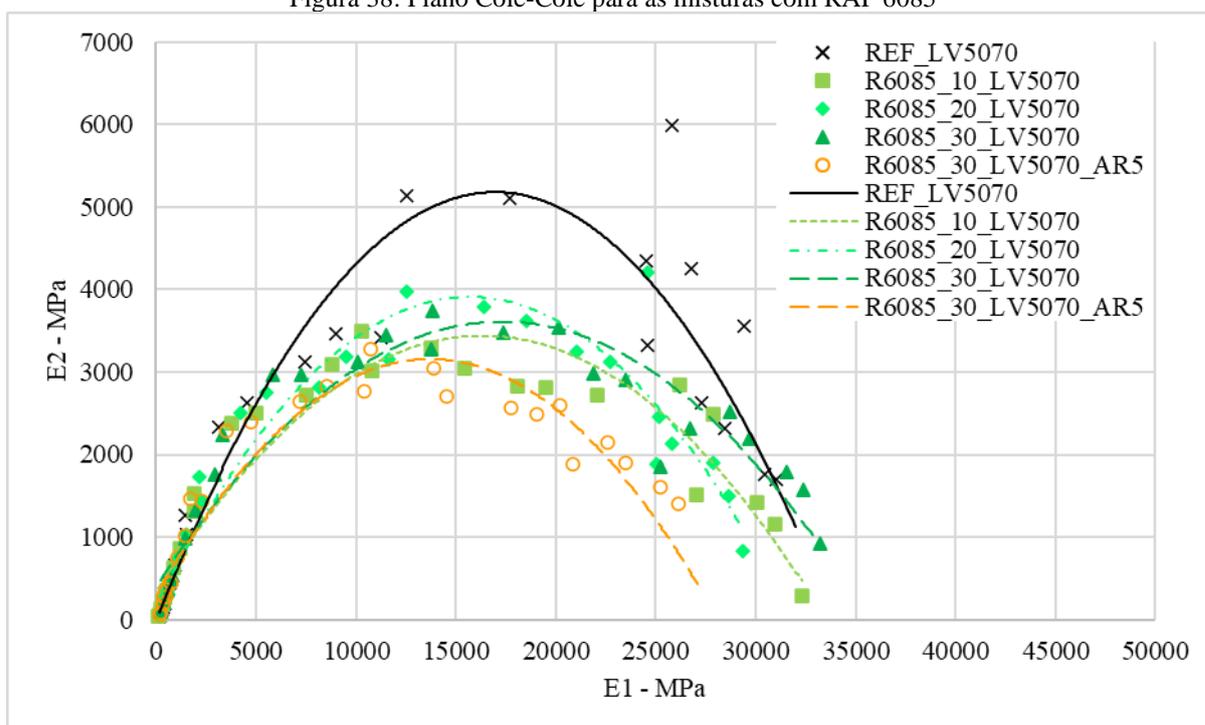
O plano complexo, também conhecido como Cole-Cole, permite análise dos dados a temperaturas intermediárias e baixas (KIM, 2009). Para tal, os gráficos são plotados com E_1 , representando a parte real do módulo, no eixo das abcissas, e E_2 representando a parte imaginária do módulo, definindo comportamento viscoso do material, no eixo das ordenadas.

E1 também é conhecido como módulo de armazenamento, definido pela resposta elástica do material, que caracteriza seu comportamento recuperável. E2, conhecido como módulo de perda, é relacionado à resposta viscosa, caracterizando a parte irreversível da energia dissipada em função dos esforços que solicitam o material. Quanto maior E2, maior a parcela viscosa do material, com maior dissipação de energia.

Os resultados são apresentados com Figura 38 e Figura 39, para as fontes de RAP estudadas.

Todas as misturas recicladas com RAP 6085 apresentam valores bastante reduzidos de E2 em comparação com a mistura de referência. Configurando materiais com menor contribuição da parcela viscosa, tendo menor energia dissipada quando submetidos aos esforços, dessa forma esses materiais tendem a absorver menores parcelas de deformação recuperável.

Figura 38: Plano Cole-Cole para as misturas com RAP 6085



Dentre as misturas com RAP 6085 (sem considerar por enquanto a mistura com AR-5) apesar de todas terem suas curvas bastante próximas, a que contém 20% apresenta maiores valores de E2, com capacidade de acumular mais deformações, quando comparada as demais misturas recicladas. Não é observada tendência clara do comportamento para nenhum dos módulos apresentados que possa ser diretamente relacionado com as variações de teores de fresado nas misturas. A utilização de AR reduz ainda mais a parcela viscosa do material, quando considerada a mistura de referência e R6085_30_LV070. Esses resultados são corroborados

pelos resultados apresentado anteriormente no ensaio de MR, com a mistura com 20% apresentando maior valor, seguido das misturas de 30 e 10%, comparando apenas os resultados das misturas recicladas.

Analisando a parcela elástica das misturas, em geral, a mistura de referência tem resultados maiores de E1 em comparação às misturas recicladas, mostrando que as misturas recicladas também são menos elásticas, e tem menor capacidade de armazenamento de energia em relação à referência. Esses valores maiores de E1 tem ocorrência em menores temperaturas, momentos em que o ligante asfáltico das misturas tem maior viscosidade, as misturas apresentam comportamento mais rígido e acabam por absorver mais energia ocasionada pelas solicitações de tensão.

Percebe-se o efeito da utilização de AR na redução de ambas parcelas, viscosa e elástica, em relação a mistura sem utilização do aditivo. O que comprova a eficiência da aplicação do AR-5 em alterar as propriedades viscoelásticas do material asfáltico do RAP 6085, reduzindo sua viscosidade, e transferindo essa característica pro comportamento mecânico da mistura reciclada. Como resultado tem-se menor dissipação de energia irreversível..

Almeida Junior (2016) aponta que misturas contendo ligante modificado tem menor comportamento viscoso irreversível quando relacionado com misturas com ligante convencional 5070. No mesmo estudo é indicada a influência do teor de ligante no comportamento viscoso, onde materiais com menores quantidades de ligante asfáltico, teriam consequentemente menor espessura de filme do ligante envolvendo os agregados, ocasionando aumento do atrito interno e em decorrência disso maior dissipação de energia ao acionar o esqueleto pétreo na resistência aos esforços aplicados, conferindo maior capacidade viscosa da mistura asfáltica.

Para a presente pesquisa, é possível enxergar essa situação quando relacionados os valores de E2 para as misturas com o teor de ligante total das misturas, apresentado anteriormente pela Tabela 17. Com a mistura de referência tendo teor de ligante total na mistura superior aos teores das misturas recicladas.

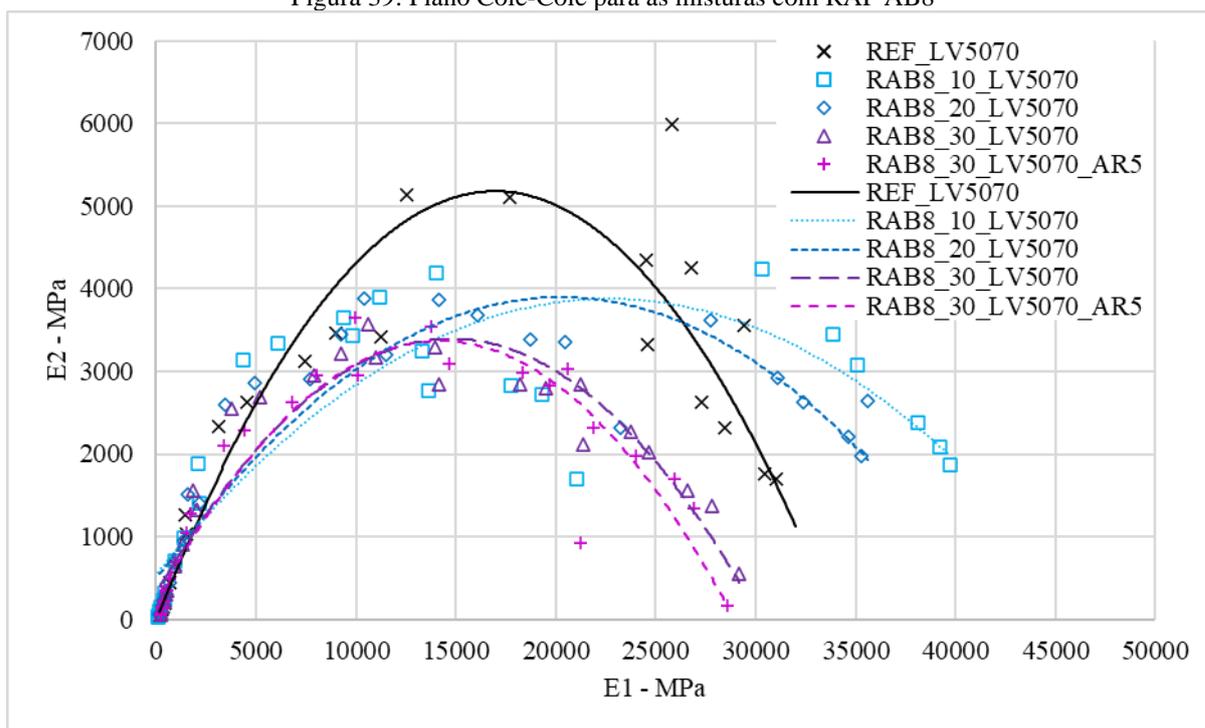
O autor ainda cita a maior capacidade do ligante 60/85 ao atenuar o atrito interno, evitando acionamento elevado do esqueleto pétreo, quando comparado ao ligante convencional 50/70. Logo, a presença maior de ligante do tipo 60/85 proveniente do fresado pode ter também

contribuído para redução da parcela E1 das misturas, o que comprova a interferência do tipo de ligante do RAP no comportamento mecânico das misturas recicladas a quente.

Constata-se que apesar de a mistura de referência ter maior quantidade total de ligante asfáltico, as misturas com fresado tem menor dissipação irreversível de energia em função de o fresado conter ligante asfáltico do tipo modificado por polímero, o que comprova a interferência do tipo de ligante do RAP no comportamento mecânico das misturas recicladas a quente.

Ainda, o material fresado, por ser resíduo de misturas asfálticas envelhecidas, é composto por agregados já envoltos em ligante asfáltico, mesmo que envelhecido, o que colabora para redução da parcela viscosa deles, por reduzir o atrito interno dos materiais no esqueleto pétreo. Maior redução dessa parcela é percebida com utilização de AR, por restaurar as propriedades químicas do ligante envelhecido, reduzindo o atrito interno dos materiais.

Figura 39: Plano Cole-Cole para as misturas com RAP AB8



No que diz respeito às misturas com RAP AB8, todas as misturas recicladas apresentam comportamento menos viscoso em comparação à mistura de controle REF_LV5070, mesmo padrão reconhecido para as misturas com RAP 6085. Dentre as misturas com utilização do fresado RAP AB8, as misturas de 10 e 20% têm comportamento bastante parecido, e percebe-se maior variação para o comportamento da mistura RAB8_30_LV5070, com valores levemente mais reduzidos de E2. Essa redução pode ser justificada pela presença de material

asfáltico entre agregados em maior parcela de ligante proveniente do fresado que é composta por ligante do tipo AB8, que já revestiam previamente os agregados pétreos do fresado.

Essas diferenças, conforme notado para RAP 6085, também se correlacionam aos teores totais de ligante nas misturas asfálticas. Sendo que segundo a Tabela 17 as misturas com 10, 20 e 30% de RAP AB8 contém 5,30%, 5,41% e 5,08% respectivamente, enquanto que a mistura de referência tem 5,60%. Ainda no aspecto das misturas com diferentes teores de RAP AB8, nota-se que as misturas com 10 e 20% de fresado possuem maior elasticidade em relação à mistura de referência, com valores elevados de E1. Enquanto a mistura RAB8_30_LV5070 tem elasticidade bastante inferior.

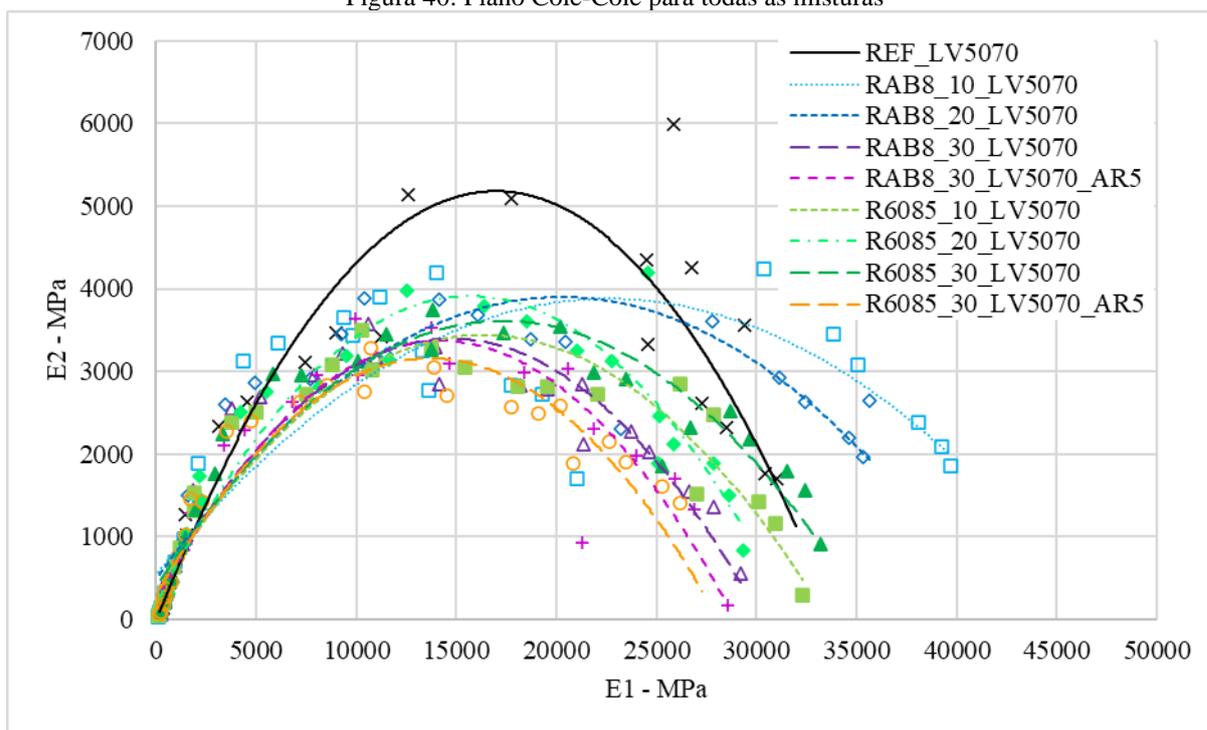
Neste caso a utilização de AR não influenciou muito o comportamento da mistura com 30% de material reciclado, uma vez que os resultados obtidos para as diferentes condições foram bastante próximos dos resultados sem utilização de AR. Dessa maneira, nessas condições, não é verificada maior eficiência do aditivo na dosagem aplicada para o material fresado em questão.

A Figura 40 mostra os resultados de todas as misturas estudadas, garantindo a redução da parcela viscosa das mesmas na utilização da técnica de reciclagem a quente do material asfáltico, com menor dissipação da energia ocasionada pelos esforços das tensões nas misturas asfálticas recicladas, indicando que esses materiais se encontram em situação de menor severidade nesse aspecto. Nota-se, agora tendo uma visão geral, a influência do teor total de ligante asfáltico em cada uma das misturas nos resultados das parcelas viscosas (E2).

Comparando as misturas com diferentes fontes de fresado, quando ocorre utilização de RAP AB8 são visualizados comportamentos com maior parcela elástica E1 em relação à fonte de RAP 6085 para os teores menores. As variações de comportamento são maiores para RAP AB8, e não têm diferença tão sobressalente para RAP 6085, o que indica que a fonte de fresado com presença de asfalto borracha causa maiores interferências nessa propriedade característica das misturas asfálticas.

Já quanto a utilização de AR, esse componente se mostrou mais eficiente para a mistura com RAP 6085, com maiores variações entre as misturas com e sem AR. E não pareceu ter tido eficiência sobre o RAP AB8, que nesse caso, possivelmente precisaria de maiores dosagens do agente para ser efetivamente influente.

Figura 40: Plano Cole-Cole para todas as misturas



4.3.3.3. Curva mestra de ângulo de fase

O ângulo de fase das misturas asfálticas é indicador das propriedades viscosas do material. Para materiais puramente elásticos o ângulo de fase (ϕ) tem valor de 0° , e materiais puramente viscosos têm $\phi=90^\circ$.

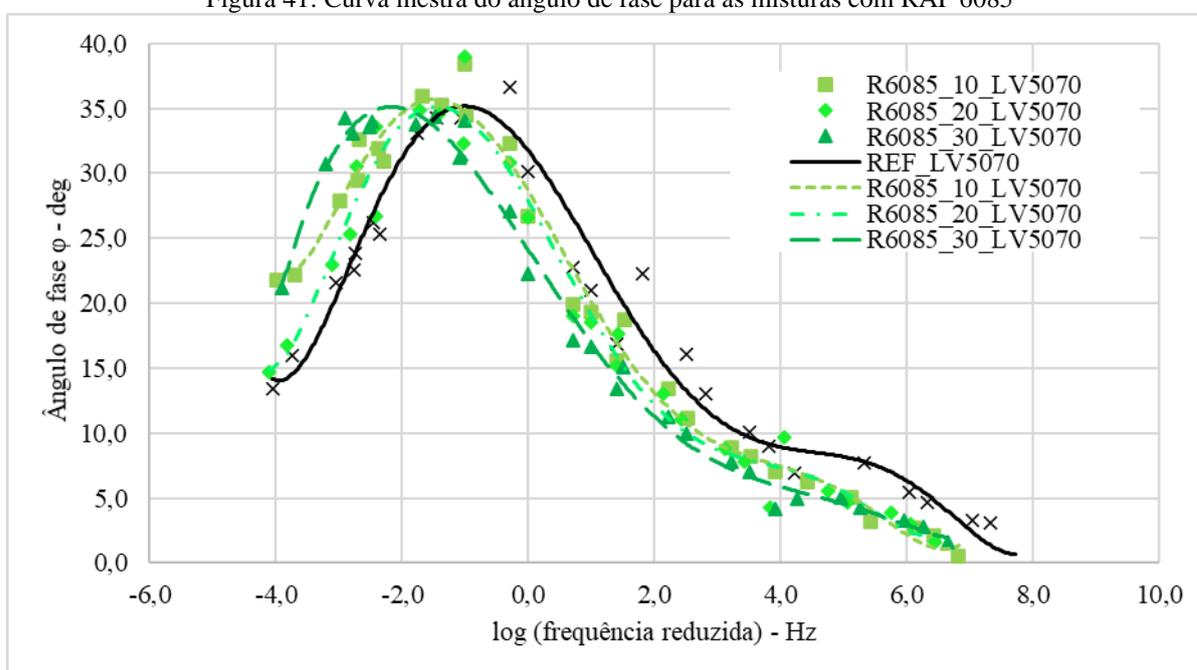
As análises a seguir são realizadas de acordo com os resultados das curvas mestras do ângulo de fase obtidas através do modelo sigmoidal para as misturas. Conforme elucidado no item 3.5.5, a temperatura de referência utilizada para aplicação do fator de correção WLF é de 20°C .

Todas as misturas com RAP 6085 na Figura 41 têm deslocamento horizontal entre si e com REF_LV5070, com maiores valores de ϕ em relação à mistura de referência para menores frequências reduzidas, que correspondem também às maiores temperaturas. Indicando que as misturas recicladas possuem maior viscosidade, e, portanto, são mais suscetíveis às deformações irreversíveis que ocorre nessas situações. Para maiores frequências, ou menores temperaturas, as misturas recicladas têm menores valores de ϕ quando comparados com a referência, tendo menor viscosidade e resistindo melhor às deformações por tensões aplicadas nessas situações.

As variações entre misturas que contém RAP 6085 são menores com o aumento da frequência reduzida, apontando que maiores diferenças entre ângulos de fase das misturas devem ser

notadas nas menores frequências de aplicação de cargas, ou em momentos de maiores temperaturas. As misturas com fresado nos teores de 10 e 20% são bastante similares na propriedade analisada, e a mistura com 30% mostra um salto à esquerda de todas as demais curvas, com maior influência do material envelhecido em maior quantidade. A diferença pode também ser relacionada com as quantidades totais de ligante nas misturas, sendo REF_LV5070 a que possui maior teor de ligante (5,6%), seguida pelas misturas com 10 e 20% quem possuem teores totais bastante próximos, e a mistura de 30% com menor teor, mas ainda próximo das demais misturas recicladas.

Figura 41: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com RAP 6085



A variação de resultados da utilização e AR em relação ao ângulo de fase, Figura 42, comprova sua eficiência quando a curva da mistura reciclada com AR-5 se desloca da curva da mistura reciclada sem AR na direção da curva de referência. Tal efeito indica que houve interferência da aplicação de AR-5 no ligante asfáltico resultante da mistura, no sentido de recuperação das propriedades desse ligante envelhecido, com uma mistura com menor viscosidade após processo de reciclagem com rejuvenescimento.

Na Figura 43 as curvas das misturas com reciclagem do RAP AB8 se deslocam de maneira geral para a esquerda e para cima em relação à mistura de referência. Com maiores ϕ para menores frequências reduzidas, que se traduz em misturas de maior viscosidade e maior suscetibilidade a deformações em maiores temperaturas ou carregamentos de menor frequência. O deslocamento das curvas para cima no gráfico resulta em maior proximidade dos ângulos de

Avaliação de Diferentes Fontes de Material Fresado com Ligantes Não-Convencionais na Reciclagem à Quente

fase encontrados no ramo das maiores frequências reduzidas, com resultados próximos entre todas as misturas, mas leve influência do RAP AB8 na redução de φ para com REF_LV5070.

Figura 42: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas de RAP 6085 com e sem AR

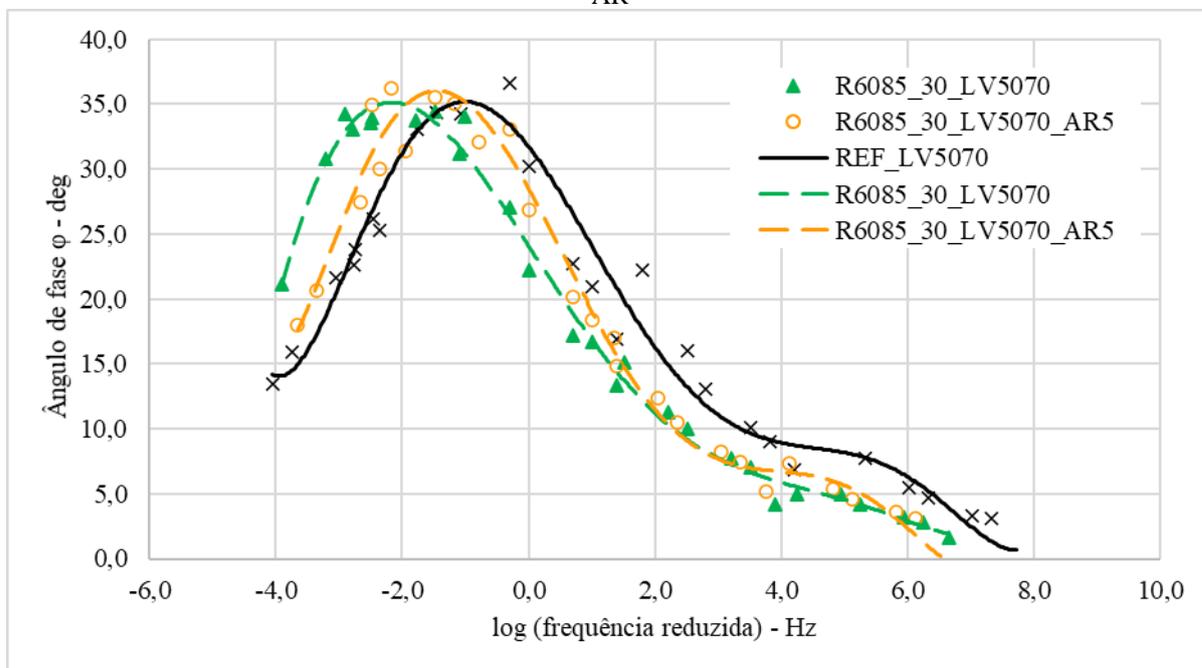
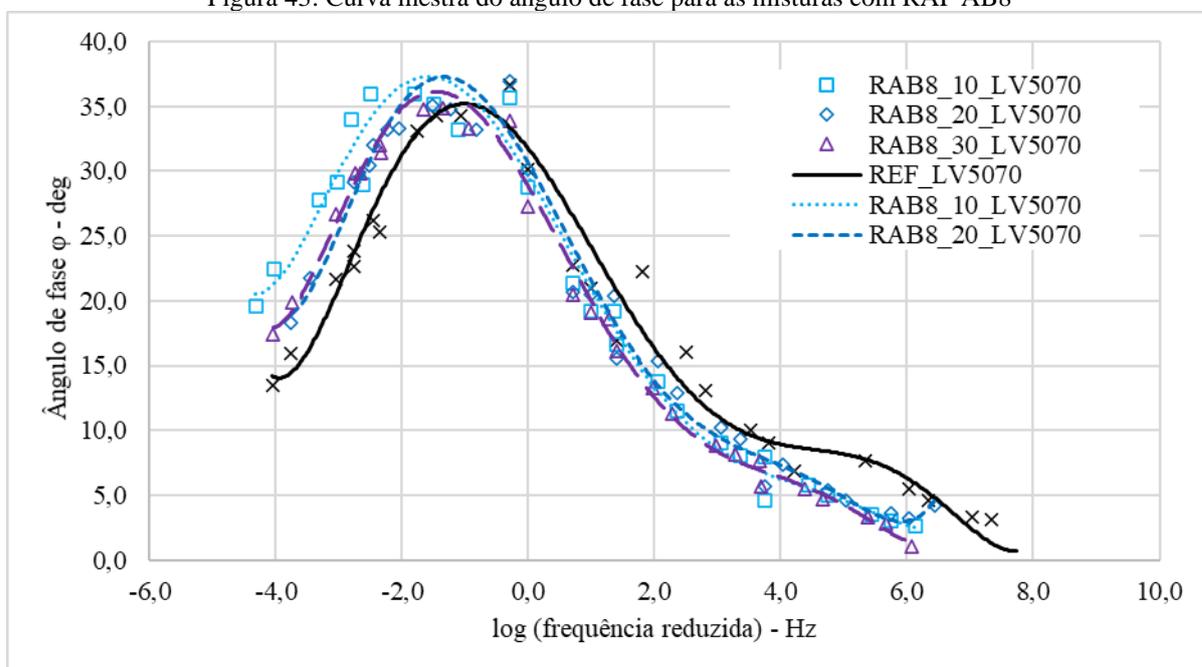


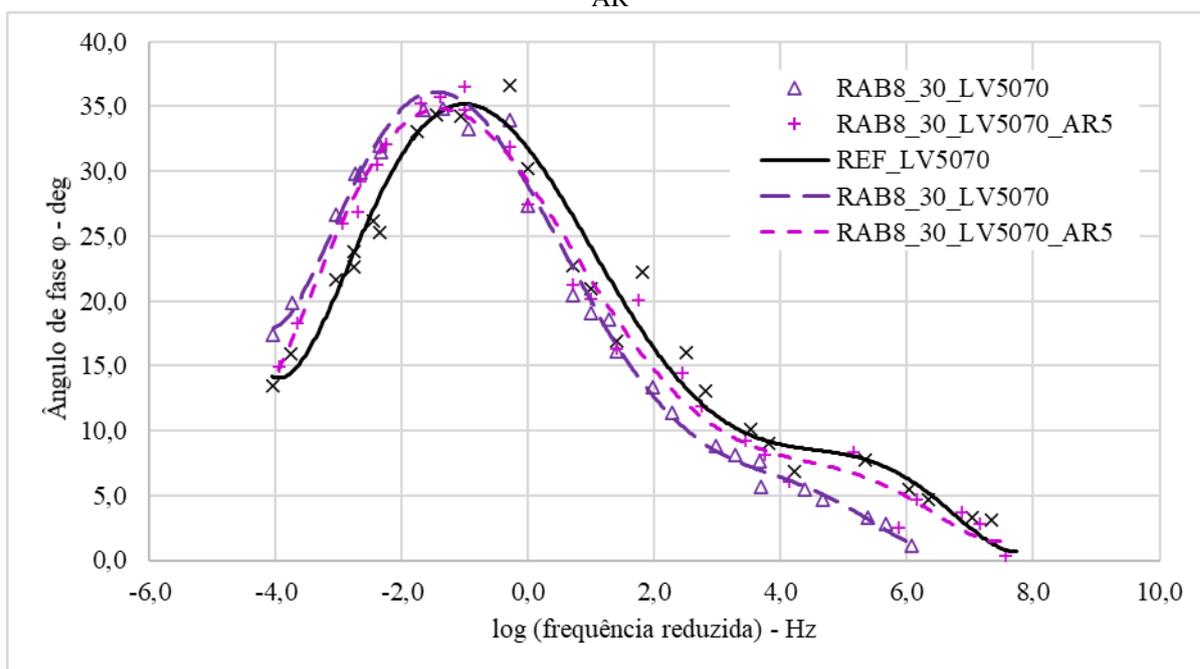
Figura 43: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas com RAP AB8



Em geral as misturas com 20 e 30% de RAP AB8 tem suas curvas sobrepostas, e as dispersões apesar de mínimas são ainda menores para menores frequências reduzidas.

A Figura 44 permite comparação da mistura de RAP AB8 com e sem rejuvenescimento. Em termos da propriedade analisada, pode-se notar pequena variação, com sutil deslocamento para a direita da curva com AR entre as curvas RAB8_30_LV5070 e REF_LV5070. Essa variação ocorre de forma mais acentuada para as maiores frequências reduzidas, mostrando melhor a recuperação das propriedades do ligante asfáltico envelhecido quando se tem maiores frequências ou menores temperaturas.

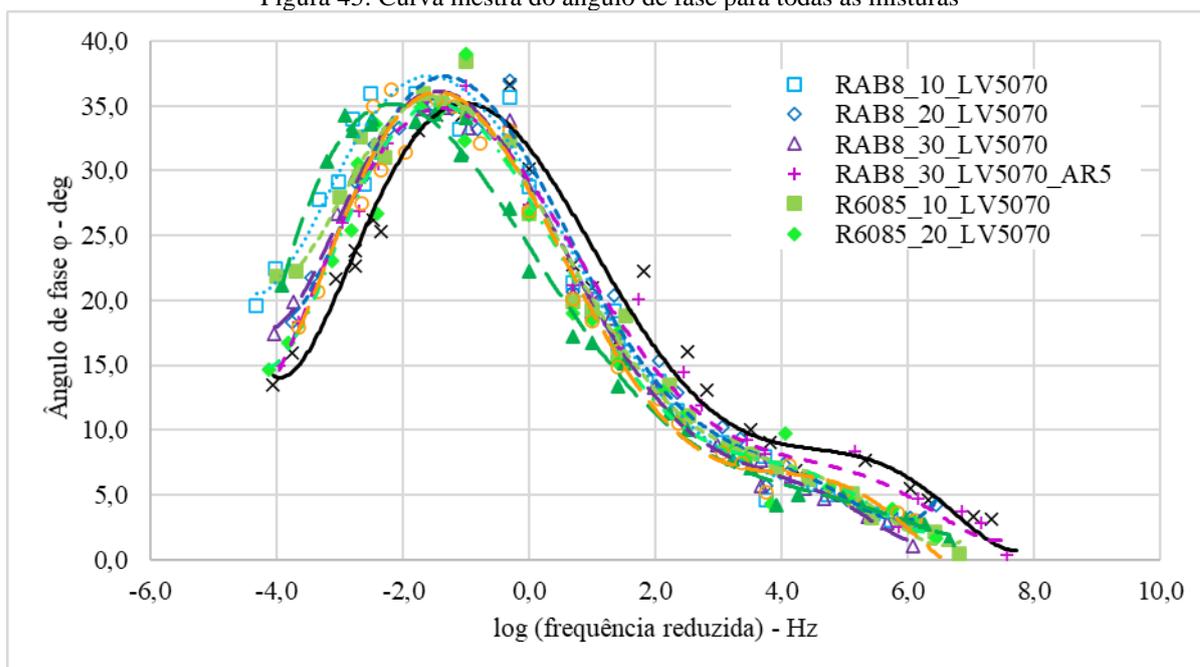
Figura 44: Curva mestra do ângulo de fase para as misturas de RAP AB8 com e sem AR



Ao comparar as diferentes fontes de RAP, Figura 45, percebe-se que a reciclagem de RAP AB8 compõe misturas com maior viscosidade, por apresentarem maior ângulo de fase em relação as misturas com reciclagem do RAP 6085. Indicando que a fonte de fresado RAP AB8 é composta por ligante com maior viscosidade, e conseqüentemente transferindo essa propriedade para a mistura de ligante asfáltico final de cada uma das misturas.

A característica dos materiais reciclados de terem maior ϕ para menores frequências reduzidas, confere a essas misturas uma menor resistência às deformações nas condições de carregamentos de baixa frequência, e de momentos com alta temperatura. Ao terem menor capacidade de resistir a essas solicitações, ter esses materiais como revestimento de uma estrutura de pavimento acarretaria em esforços maiores sendo transferidos para as demais camadas da estrutura.

Figura 45: Curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas



4.3.3.4. Curva mestra de módulo dinâmico

Curvas mestras são construídas para completa caracterização de misturas asfálticas, definindo o comportamento viscoelástico como função do tempo e da temperatura, utilizando o princípio de superposição tempo-temperatura (KIM, 2009). Maiores detalhes a respeito da realização do ensaio e determinação dessas curvas foram descritos no item 3.5.5. A Tabela 27 apresenta os coeficientes definidos para cada uma das misturas para determinação do *shift factor* com o modelo de Williams, Landel e Ferry (WLF), os parâmetros utilizados para o modelo sigmoidal, e os volumes de vazio médios para cada uma das misturas.

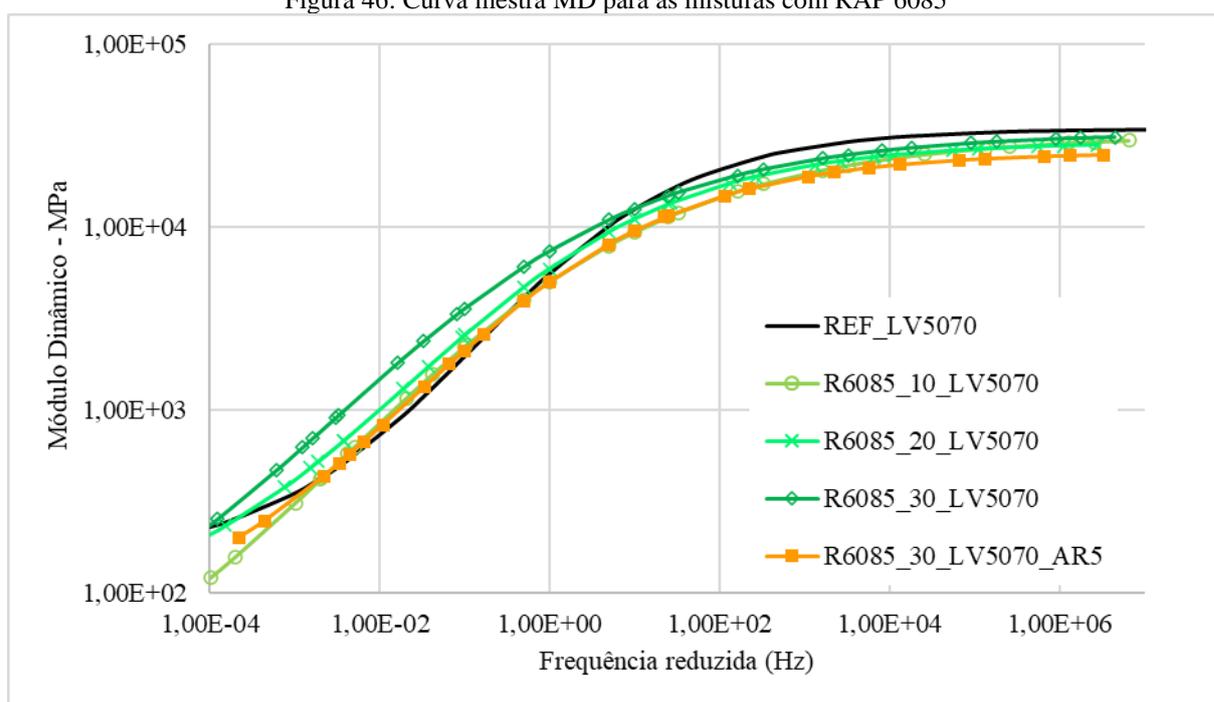
Para análise dos dados é importante apontar algumas características. Altos valores de frequência reduzida correspondem ao comportamento das misturas nas baixas temperaturas, situações em que o material pode sofrer danos por retração, apresentando falha por trincamento térmico. Baixos valores de frequência reduzida mostram o comportamento em altas temperaturas, quando o material asfáltico está mais suscetível às deformações permanentes, com redução da viscosidade do ligante, transferindo para o agregado maior parcela na resistência aos esforços. Frequências reduzidas médias correspondem às temperaturas intermediárias, que se referem ao comportamento à fadiga de misturas asfálticas.

Tabela 27: Dados das misturas para ensaio de MD

Mistura	Parâmetros para modelo Sigmoidal				WLF		Vv médio (%)
	k	β	δ	γ	C1	C2	
REF_LV5070	4.53	-2.35	0.68	0.79	14.78	100.00	5.69%
R6085_10_LV5070	4.50	-3.51	1.21	0.50	17.41	126.36	5.90%
R6085_20_LV5070	4.46	-2.63	1.03	0.63	21.50	157.64	5.81%
R6085_30_LV5070	4.51	-3.12	1.34	0.53	21.38	152.04	5.97%
R6085_30_LV5070_AR5	4.41	-2.68	1.02	0.63	14.94	117.41	5.85%
RAB8_10_LV5070	4.60	-4.26	1.41	0.46	30.00	219.90	5.75%
RAB8_20_LV5070	4.57	-3.36	1.05	0.52	16.41	127.71	5.35%
RAB8_30_LV5070	4.44	-2.71	1.02	0.62	23.92	183.65	5.81%
RAB8_30_LV5070_AR5	4.39	-2.55	0.89	0.66	14.38	100.00	5.79%

Entre Figura 46 e Figura 49 é possível perceber o comportamento das misturas com RAP 6085. De maneira geral as curvas apresentam aumento de módulo com aumento do teor de fresado.

Figura 46: Curva mestra MD para as misturas com RAP 6085



Em altas frequências (Figura 47) as misturas recicladas têm rigidez inferior à mistura de referência, apresentando menores módulos em baixas temperaturas. Em médias frequências (Figura 48), ou temperaturas intermediárias, a rigidez das misturas é bastante próxima com aumento da frequência, já a variação de módulo com aumento da frequência é menor para as misturas recicladas em relação à mistura de controle, implicando em menor variação da

viscosidade com o aumento da frequência de aplicação de cargas, indicando que essas misturas podem ser mais suscetíveis aos efeitos do comportamento à fadiga.

Figura 47: Curva mestra MD em altas frequências com RAP 6085

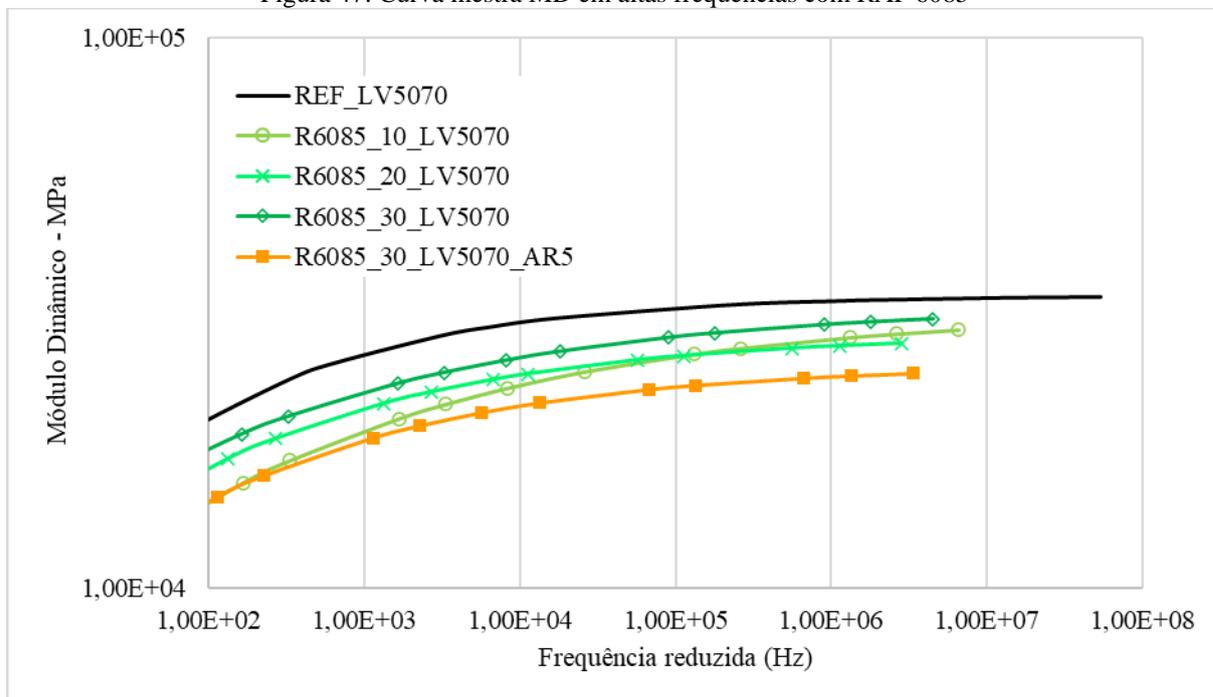
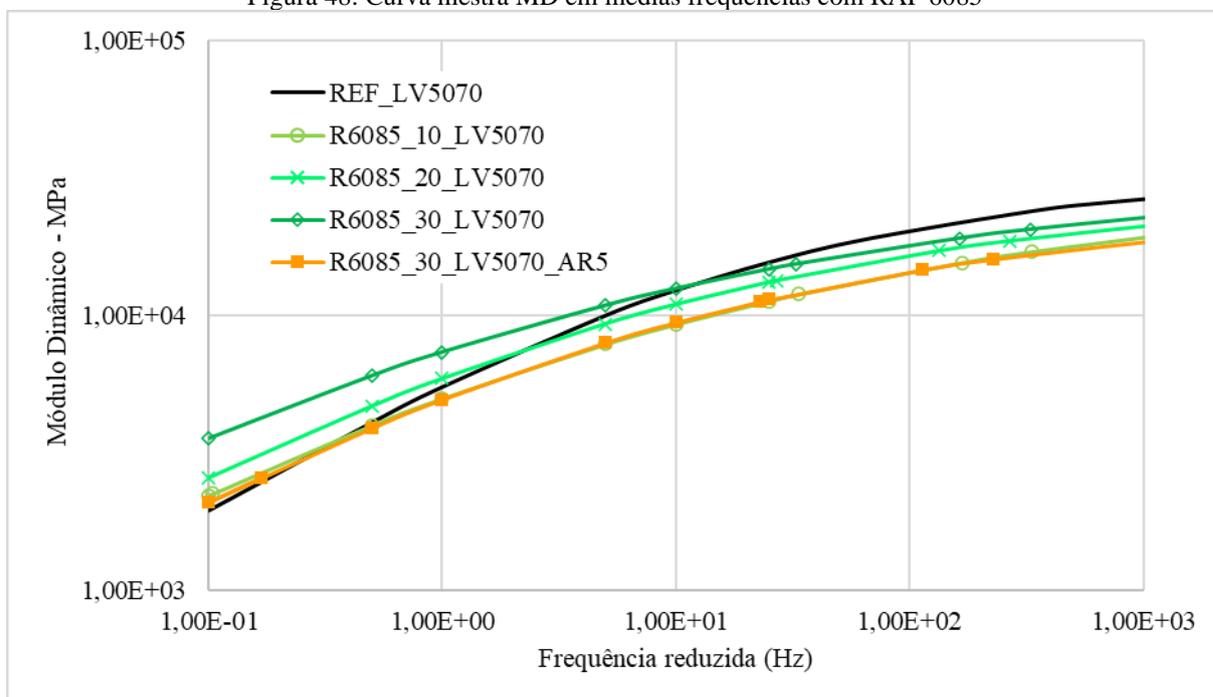


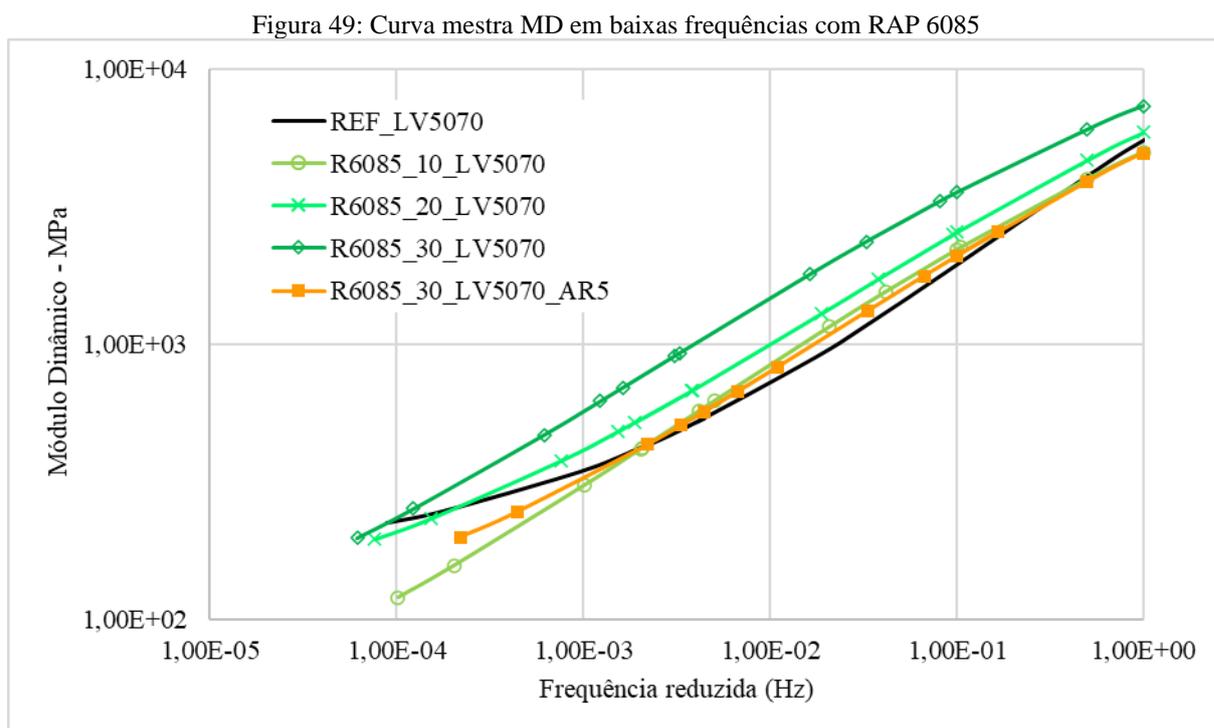
Figura 48: Curva mestra MD em médias frequências com RAP 6085



Quanto ao uso do AR na mistura com 30% de RAP é possível perceber o deslocamento vertical entre elas, com redução da rigidez da mistura rejuvenescida, comprovando recuperação das

propriedades do ligante asfáltico envelhecido. Com comportamento mais próximo da mistura com 10% de material fresado utilizando 1,10% a menos de ligante virgem.

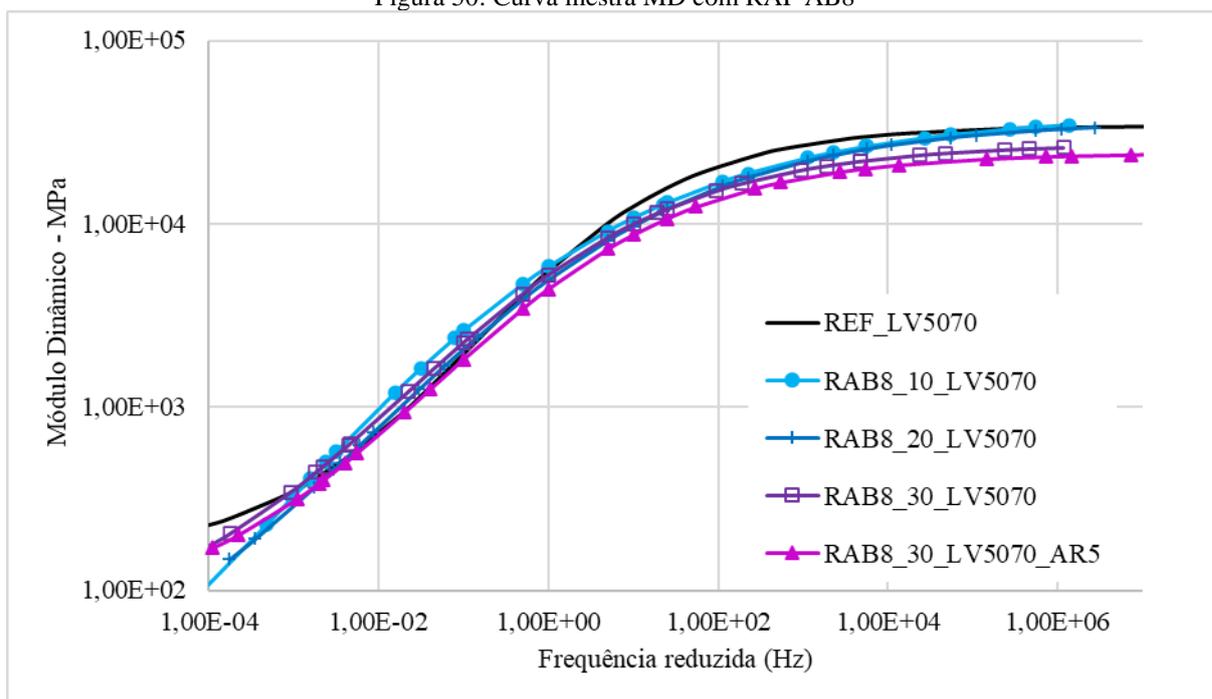
E para baixas frequências (Figura 49), os materiais fresados apresentam $|E^*|$ superior à mistura de referência. Demonstrando maior rigidez em altas temperaturas, o que pode significar um melhor desempenho para solicitações de deformação permanente.



As misturas com RAP AB8 de maneira mais ampla (Figura 50) não apresentam uma tendência linear clara de acordo com a variação de fresado. Quando observado mais pontualmente o gráfico para maiores frequências (Figura 51), ocorre a redução de módulo complexo com o aumento do teor de material reciclado.

Para médias frequências reduzidas (Figura 52), o comportamento das misturas com diferentes teores de RAP é bastante similar, com módulos levemente inferiores à mistura de referência, implicando em possível melhor ou similar comportamento à fadiga dos materiais. Enquanto que em menores frequências, apesar de o comportamento das misturas recicladas não apresentar tendência com a variação de RAP, os valores de $|E^*|$ são maiores na presença de material fresado, apontando melhora na resistência às deformações permanentes em temperaturas mais elevadas.

Figura 50: Curva mestra MD com RAP AB8



O rejuvenescimento aplicado na mistura com 30% de RAP resultou em deslocamento vertical da mistura RAB8_30_LV5070_AR5 em relação a RAB8_30_LV5070_AR5, com redução dos módulos em toda a extensão da curva. Apresentando comportamento mais distante da mistura de referência, é possível perceber a recuperação das propriedades do ligante do RAP composto por asfalto modificado por polímero do tipo AB8, com misturas de menor rigidez.

Figura 51: Curva mestra MD em altas frequências com RAP AB8

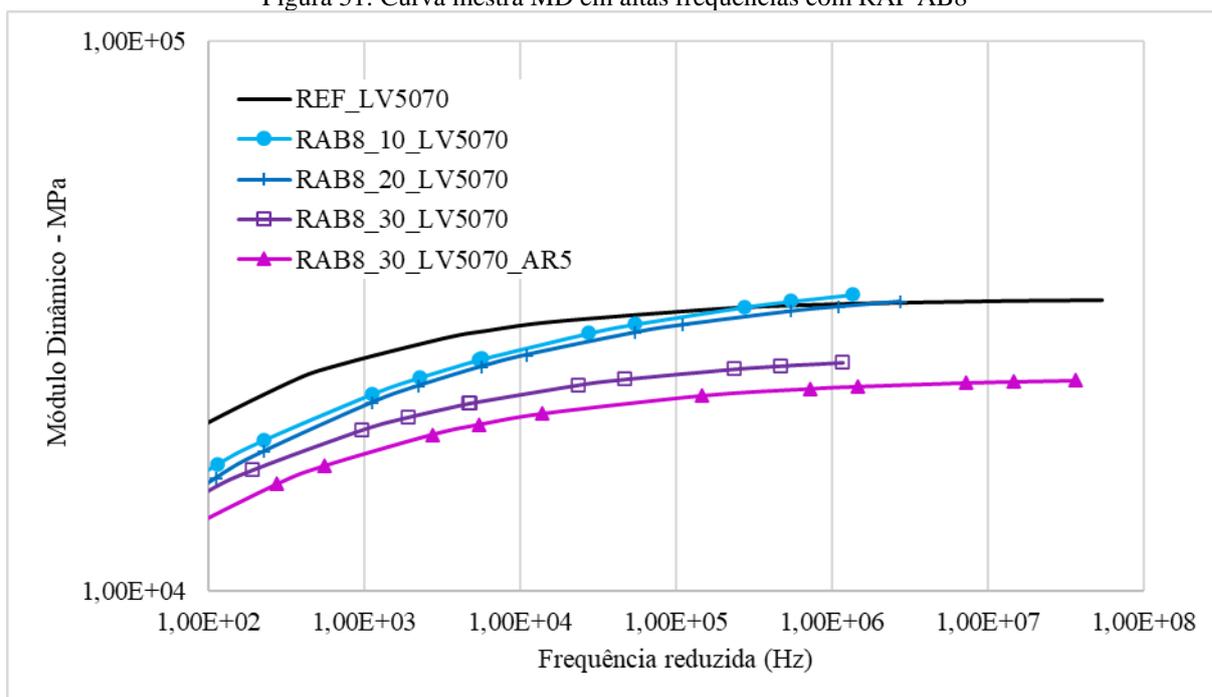


Figura 52: Curva mestra MD em médias frequências com RAP AB8

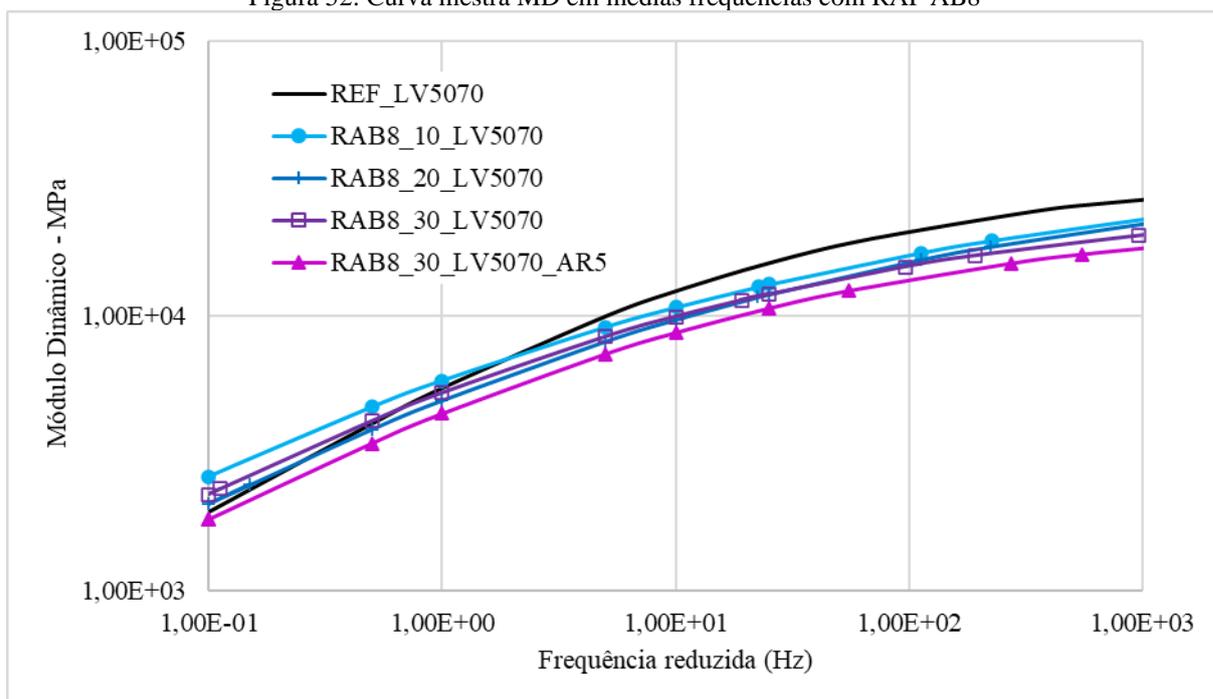
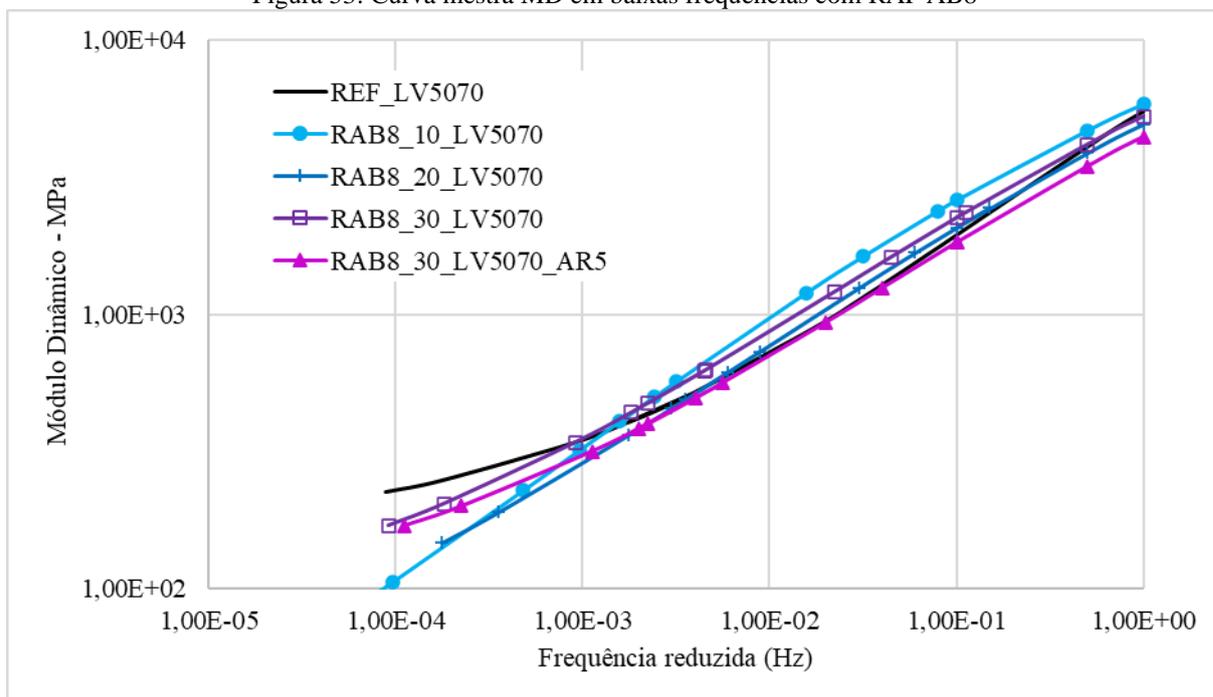
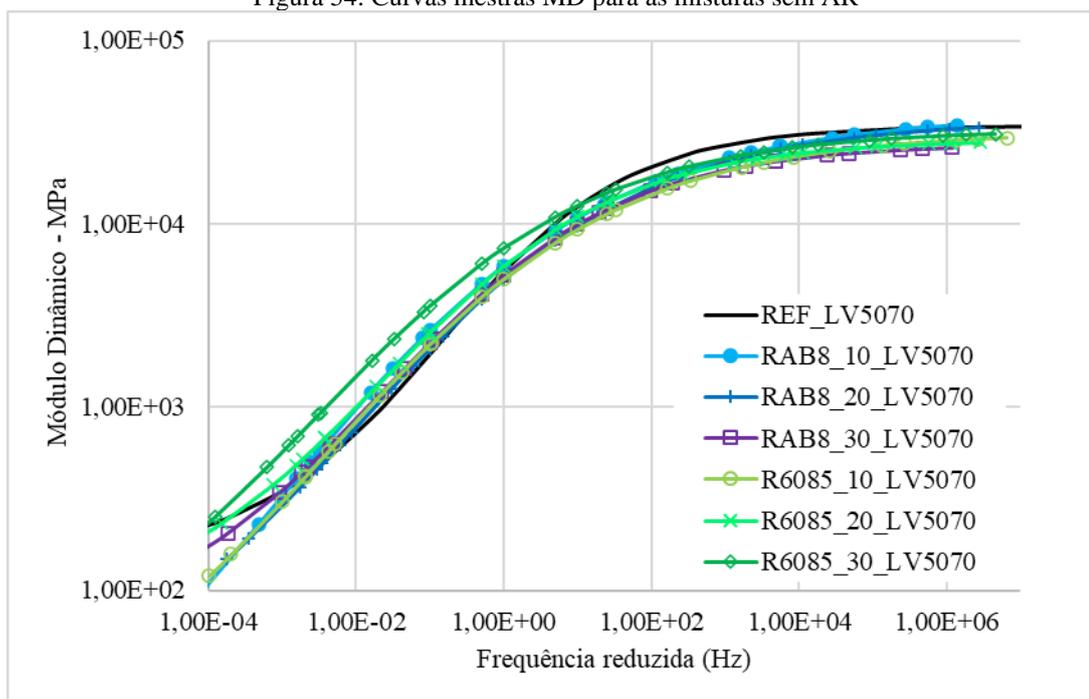


Figura 53: Curva mestra MD em baixas frequências com RAP AB8



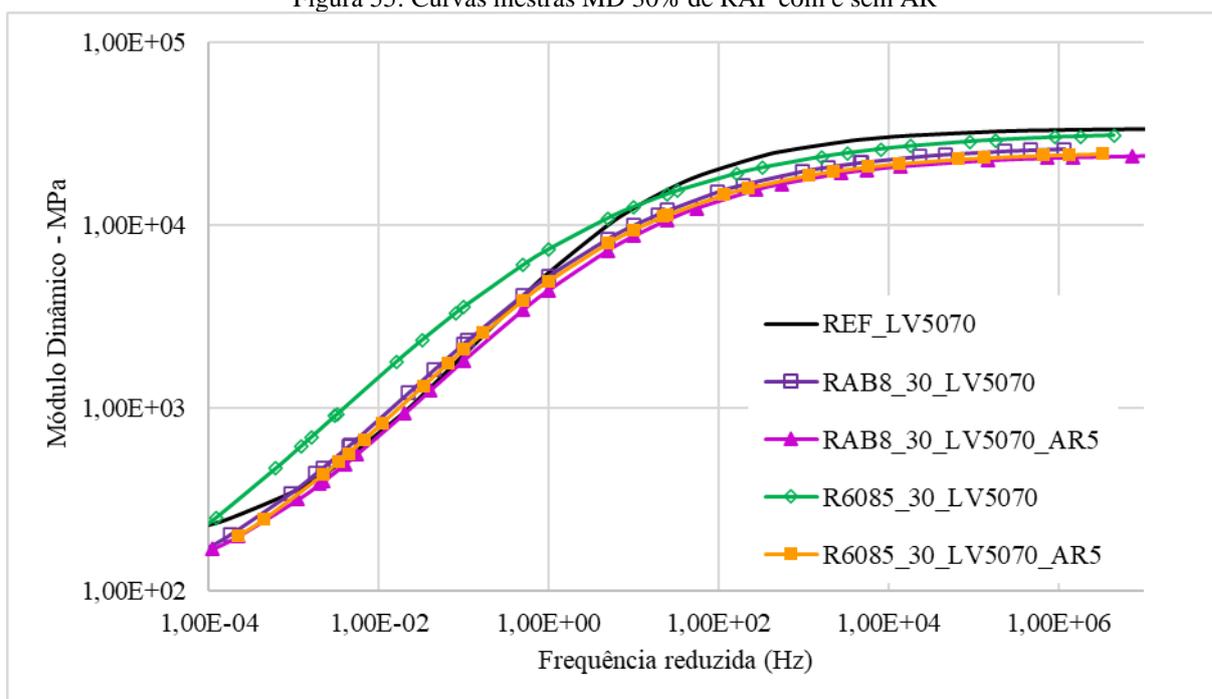
A Figura 54 permite comparar a atuação das diferentes fontes de fresado no comportamento viscoelástico das misturas asfálticas recicladas. Nesse aspecto é possível perceber maior uniformidade nas misturas com RAP AB8, com menor influência do aumento do fresado na rigidez. Os resultados, no geral, com menores $|E^*|$ são obtidos em função da presença de AB8 nas misturas. E percebe-se também que RAB8_30_LV5070 costuma ter menor rigidez.

Figura 54: Curvas mestras MD para as misturas sem AR



Misturas com RAP 6085 têm maior variação dos resultados, com maior distanciamento vertical entre as curvas, indicando maior rigidez e influência do ligante asfáltico envelhecido. Nesse caso o aumento da rigidez se dá em função da presença de ligante asfáltico com polímero (AMP 6085) no RAP, indicando sua ativação nas misturas recicladas.

Figura 55: Curvas mestras MD 30% de RAP com e sem AR



A utilização de AR5 nas misturas recicladas com 30% de RAP apresentaram redução na rigidez em toda a curva (Figura 55), apesar de terem os mesmos teores de ligante virgem. Evidenciando seu funcionamento ao restaurar o equilíbrio químico nos ligantes oxidados dos fresados.

Nota-se que a eficiência do AR foi maior com o RAP 6085, enquanto que as misturas com RAP AB8 apesar de possuírem diferença, têm os resultados ainda muito próximos.

Centofante (2016), a partir dos resultados de MD também não encontra comportamento diretamente proporcional as adições de RAP nas misturas, apenas consegue determinar que misturas com material fresado apresentam módulo elevado, com maior capacidade de resistência.

Luzzi (2019) avalia como positiva a utilização de RAP nas misturas de acordo com seu comportamento no ensaio de MD pela semelhança entre as misturas recicladas e a mistura de referência. Adicionalmente aponta que não é possível definir comportamento referente as parcelas elásticas e viscosas em relação aos teores de RAP, em função de os teores de fresado utilizados serem baixos.

Suzuki (2019) obteve redução dos valores para misturas com baixos teores de RAP (sem aquecimento prévio do fresado), e incremento de $|E^*|$ para misturas com altos teores de RAP (com aquecimento prévio do fresado). A autora avalia que o aumento de rigidez das misturas no ensaio pode ser atribuído ao aquecimento de RAP previamente à produção das misturas, ou pode estar associado à ativação do ligante do fresado utilizado, que no caso era modificado. Ao utilizar AR na mistura em que o RAP passou pelo processo de aquecimento na produção, a autora notou redução dos módulos apresentados, se aproximando da mistura de controle.

Em uma pesquisa realizada especificamente com fresados compostos com ligantes que tinham borracha em sua composição, chamados de R-RAP (*rubberized reclaimed asphalt pavement*), Alavi et al (2016) concluem que ocorre aumento de rigidez das misturas asfálticas com aumento de fresado com borracha, mas que as variações de rigidez ocorrem dependendo do tipo de RAP utilizado. Já que para duas fontes de R-RAP a variação de rigidez com os mesmos teores de fresado foram diferentes.

4.3.3.5. *Correlação com fadiga*

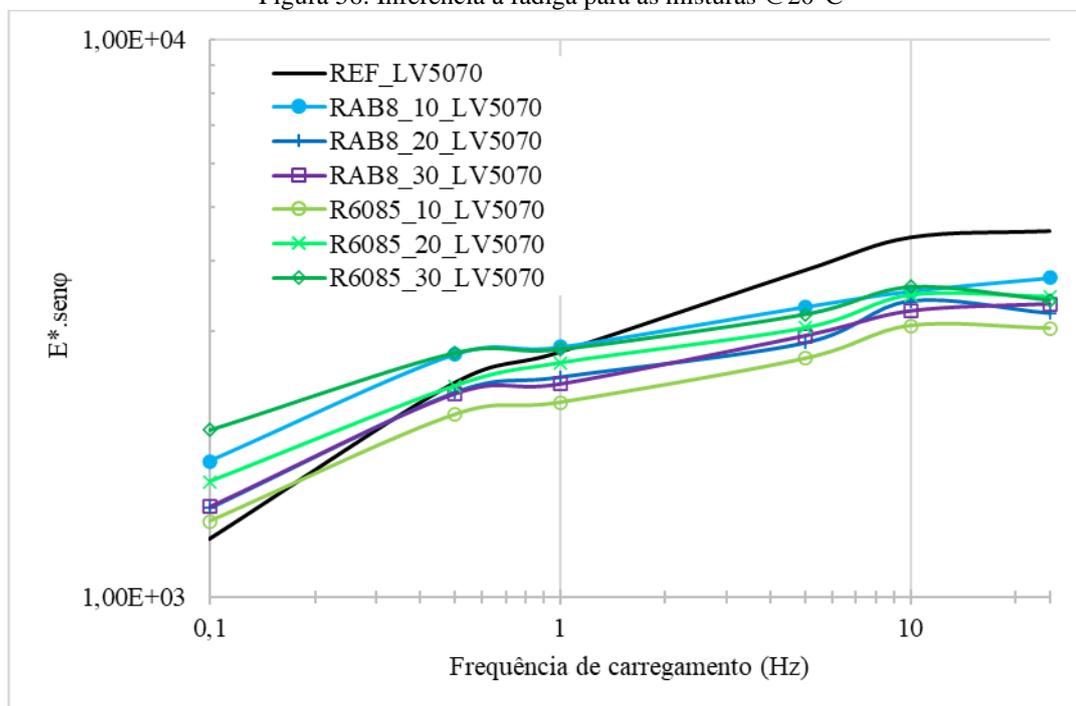
Os ensaios de MD são realizados no âmbito das pequenas deformações, ou seja, com deformações controladas a um nível recuperável, não acumulando deformações permanentes

Avaliação de Diferentes Fontes de Material Fresado com Ligantes Não-Convencionais na Reciclagem à Quente

nas amostras. No entanto, segundo Kim (2009), similarmente aos estudos de ligantes asfálticos realizados pelas especificações Superpave, poderiam ser determinados fatores de deformação permanente para misturas asfálticas (através de $|E^*|/\text{sen}\phi$), e também fatores equivalentes de performance correlacionados ao trincamento por fadiga (através de $|E^*|\cdot\text{sen}\phi$). No entanto a análise para DP nesse formato não é aconselhada em função do ângulo de fase de misturas depender de maneiras diferentes para temperatura e frequência em relação aos ligantes asfálticos. Não sendo assim, segundo o autor, um parâmetro estável de performance para as misturas asfálticas. Portanto foram realizadas nesta pesquisa apenas as correlações com os comportamentos à fadiga, na temperatura de 20°C.

A fadiga das misturas asfálticas é uma das maneiras mais recorrentes do pavimento apresentar falhas e seu entendimento é de suma importância para determinação da vida útil da estrutura. Portanto, estudos a respeito desse mecanismo são necessários para melhor compreensão do desempenho dos materiais analisados. Conforme as limitações de pesquisa para realização de ensaios que determinassem diretamente esta propriedade é adotada a perspectiva de análise de acordo com os resultados dos ensaios de MD.

Figura 56: Inferência à fadiga para as misturas @20°C

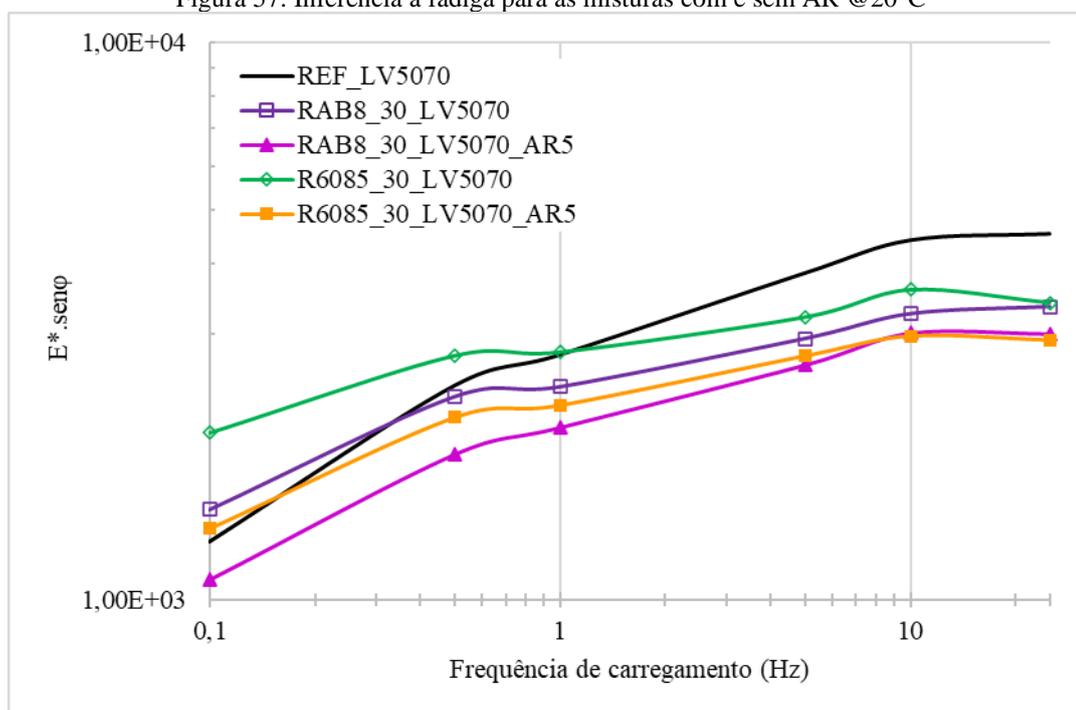


O comportamento gráfico (Figura 56) mostra que as misturas recicladas possuem menores valores de $|E^*|\cdot\text{sen}\phi$ em relação à mistura de referência em todas as frequências maiores. Tendo $|E^*|\cdot\text{sen}\phi$ maiores apenas na menor frequência aplicada (0,1 Hz). Menores valores de fatores

de fadiga definem um melhor comportamento quanto a solicitação dos esforços, indicando que misturas recicladas podem apresentar um comportamento à fadiga superior à mistura de referência em questão.

No caso os materiais fresados apresentam comportamentos inversos, para maiores teores de RAP 6085, mais rígido o material e maior $|E^*|.sen\phi$, já o aumento de teores para RAP AB8 reduz a rigidez das misturas, reduzindo também $|E^*|.sen\phi$. Como o ligante virgem é o mesmo e os teores de ligante virgem são bastante próximos entre as misturas recicladas com os diferentes teores de RAP, entende-se que esse comportamento é devido à fonte de ligante do fresado. AMP 6085 é mais rígido e aumenta os módulos das misturas, e AB8 sendo menos rígido por conter borracha, melhora o comportamento de fadiga com aumento do teor.

Figura 57: Inferência à fadiga para as misturas com e sem AR @20°C



Quanto ao comportamento com adição de AR (Figura 57) percebe-se alteração das misturas com melhor desempenho à fadiga das misturas rejuvenescidas. Como a única diferença entre misturas do mesmo RAP é a presença de AR5, essa variação no comportamento é referente ao processo de recuperação das propriedades do ligante asfáltico oxidado presente no RAP.

Apesar de ser uma artimanha para ter-se noção sobre o possível comportamento dos materiais quando solicitados aos esforços de fadiga, a utilização do fator de correlação como objeto de análise desse comportamento se encontra em uma lacuna de conhecimento, pois é uma

estimativa indireta da propriedade, cuja fórmula provém de estudos originalmente realizados com ligantes asfálticos. Uma vez que o comportamento de ligantes asfálticos é diferente do comportamento de misturas asfálticas, é importante ressaltar a necessidade de cuidado ao realizar análises do tipo multi-escala.

4.3.4. Ensaio para determinação da resistência à deformação permanente

Por fim são apresentados os resultados referentes ao ensaio para determinação da resistência à deformação permanente por compressão uniaxial, também conhecido como *Flow Number* (FN), melhor detalhado no item 3.5.6. A Tabela 28 apresenta todos os resultados obtidos para os 3 CP's de cada mistura analisada, com dados a respeito do volume de vazios, coeficientes do modelo Francken, utilizado para modelagem das curvas de deformação, e resultado final de FN caracterizado em número de ciclos. A Tabela 29 apresenta o quadro resumo dos resultados, com FN médio, desvio padrão, coeficientes de variação e volume de vazios médio entre CP's.

É possível notar os altos coeficientes de variação obtidos para as misturas, principalmente quando consideradas as misturas que tiveram os menores valores de FN. Quanto menor o valor de FN menor proporcionalmente menor é o intervalo de variação que pode ocorrer entre as amostras para atingir valores inferiores de coeficiente de variação.

As misturas com RAP 6085 apresentam aumento do valor de FN com aumento do teor de RAP na mistura. Com base na análise estatística realizada (APÊNDICE I) apenas a misturas de referência e a R6085_10_LV5070 não podem ser diferenciadas entre si (ambas classificadas como grupo c no teste de Tukey), mas as demais quando relacionadas apresentam diferença estatística, comprovando a tendência linear dos resultados.

As misturas recicladas com RAP AB8 também apresentam diferenças significativas entre si, porém RAB8_20_LV5070, com menor valor entre elas, não pôde ser diferenciada da mistura de referência (ambas classificadas como grupo c no teste de Tukey). O padrão percebido para variação desses resultados é o mesmo encontrado para os ensaios de resistência à tração realizados e apresentados anteriormente nos itens 4.3.1 e 4.3.2. Que foi correlacionado como sendo uma relação inversa ao parâmetro de RBV das misturas quando considerada situação FB.

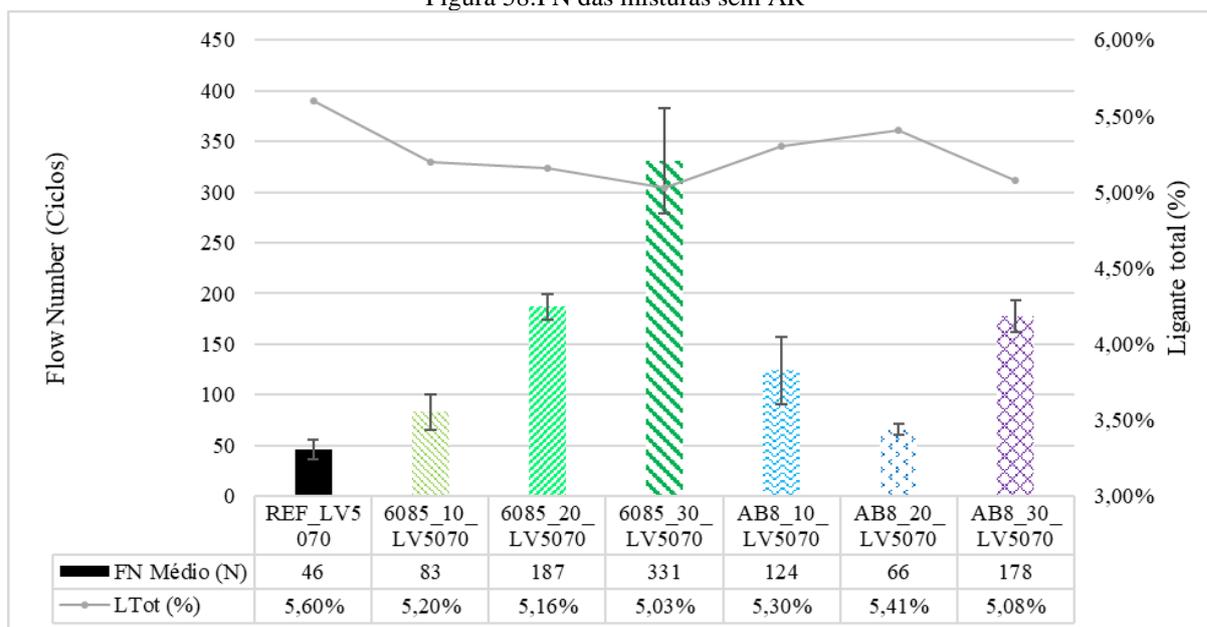
Tabela 28: Resultados de FN

Mistura	CP	Vv	Coeficientes do modelo de Francken				Flow Number, ciclos
		%	A	B	C	D	
REF_LV5070	5	6,90%	518	0,51	5266	0,0089	37
	21	7,31%	1046	0,49	2604	0,0111	56
	17	6,99%	1361	0,44	5308	0,0101	46
R6085_10_LV5070	9	7,41%	1723	0,31	6519	0,0041	98
	11	7,45%	950	0,31	13394	0,0033	64
	12	7,24%	1172	0,43	2186	0,0076	88
R6085_20_LV5070	18	7,36%	882	0,47	1870	0,0045	176
	19	6,92%	864	0,47	12043	0,0020	184
	20	7,20%	637	0,52	1188	0,0046	200
R6085_30_LV5070	8	7,36%	517	0,53	864	0,0037	281
	9	7,08%	647	0,46	1778	0,0021	385
	17	6,93%	699	0,49	694	0,0035	326
R6085_30_LV5070_AR5	7	7,40%	231	0,78	349	0,0129	85
	8	7,24%	988	0,44	4363	0,0049	102
	11	6,99%	845	0,46	3570	0,0121	37
RAB8_10_LV5070	4	7,48%	913	0,49	632	0,0074	157
	24	6,93%	544	0,69	768	0,0119	91
	26	7,46%	831	0,59	790	0,0093	125
RAB8_20_LV5070	9	6,89%	396	0,54	9462	0,0044	62
	24	7,38%	2609	0,16	33055	0,0021	64
	22	7,08%	945	0,42	8601	0,0047	72
RAB8_30_LV5070	7	6,71%	917	0,46	1450	0,0044	195
	1	6,83%	697	0,53	1673	0,0050	164
	9	7,11%	1078	0,40	6847	0,0025	174
RAB8_30_LV5070_AR5	7	7,22%	367	0,64	1227	0,0098	74
	8	6,75%	1159	0,37	7175	0,0041	93
	9	7,32%	572	0,65	731	0,0191	49

Tabela 29: Resumo dos resultados de FN

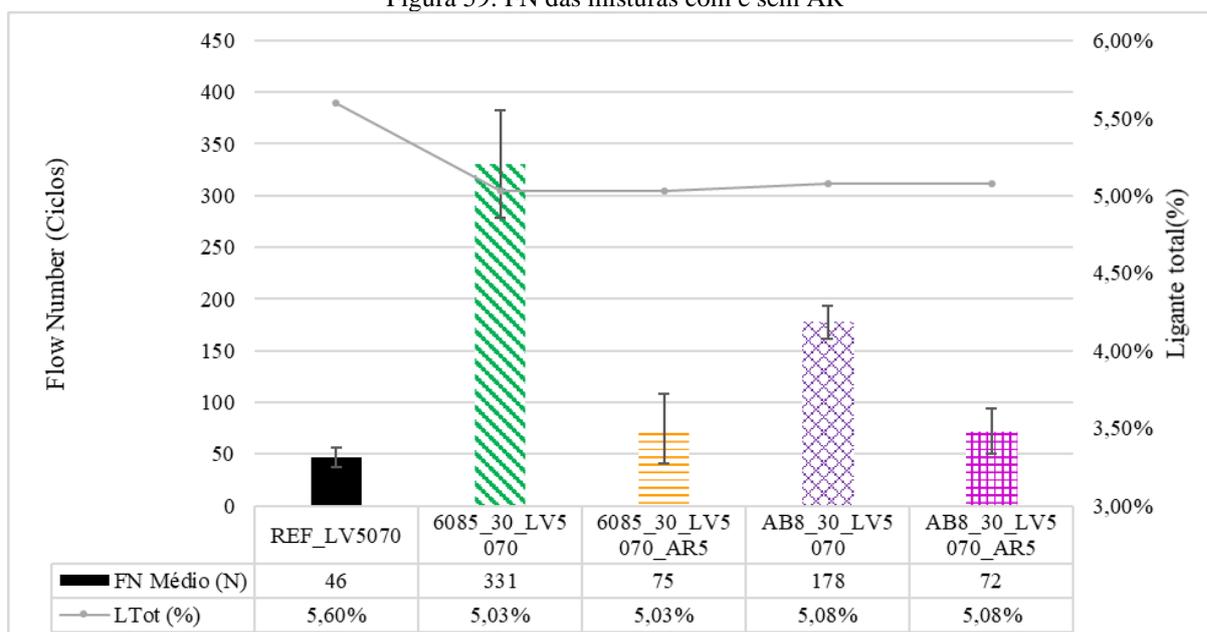
Mistura	FN Médio (N)	DP	CV	Vv (médio)
REF_LV5070	46	10	20,5%	7,1%
R6085_10_LV5070	83	17	21,0%	7,4%
R6085_20_LV5070	187	12	6,5%	7,2%
R6085_30_LV5070	331	52	15,8%	7,1%
R6085_30_LV5070_AR5	75	34	45,1%	7,2%
RAB8_10_LV5070	124	33	26,5%	7,3%
RAB8_20_LV5070	66	5	8,0%	7,1%
RAB8_30_LV5070	178	16	8,9%	6,9%
RAB8_30_LV5070_AR5	72	22	30,7%	7,1%

Figura 58:FN das misturas sem AR



Quando comparados com o comportamento que poderia ser inferido a partir das curvas mestras, as misturas corroboram os resultados. As misturas recicladas com menores FN (R6085_10_LV5070 e RAB8_20_LV5070) são as que possuem curva mais próxima de REF, e inclusive seus resultados de FN não podem ser diferenciados com o da referência. Misturas com RAP 6085 que ficam mais rígidas com aumento de RAP também aumentam o FN com aumento do teor de fresado. E RAP AB8 tendo as misturas com 10 e 30% de RAP mais distantes da referência no FN e MD nas altas temperaturas.

Figura 59: FN das misturas com e sem AR



Misturas com e sem rejuvenescimento do ligante de fresado são apresentadas na Figura 59. O uso de AR-5 nas misturas ocasionou redução dos valores de FN. Tanto o resultado da mistura com RAP 6085 rejuvenescida, quanto a mistura com RAP AB8 não podem ser diferenciadas estatisticamente da mistura de referência. A mistura com RAP 6085 apresentou maior queda do resultado, com 6085_30_LV5070_AR5 caindo 77% em relação ao resultado da mistura sem AR. Entre as misturas com RAP AB8 a queda com uso de AR foi de 59%.

O padrão confirma os resultados apresentados pelas curvas mestres resultantes do ensaio de MD, com redução da rigidez em altas temperaturas de misturas com AR. Ainda entre todas as misturas, também de acordo com os resultados de MD, ocorre maiores variações entre misturas recicladas com o RAP 6085 e menor variação entre os valores das misturas com RAP AB8.

Limites das classes de desempenho das misturas asfálticas em relação à deformação permanente são definidos por DNIT (2018) de acordo com os resultados de *Flow Number*. Sendo recomendado conforme Tabela 30 a seguir.

De acordo com as recomendações nacionais expostas, a maioria das misturas estudadas na presente pesquisa obtiveram desempenho bastante baixo quando considerado o N de serviço (Nser) recomendado para os resultados de FN apresentados. Com cinco das nove misturas com FN abaixo de 100, apenas as misturas com 20 e 30% de RAP 6085 e 10 e 30% de RAP AB8 se enquadrariam em classe superior à classe 1. E ainda, apenas a mistura R6085_30_LV5070 se enquadraria na classe 3.

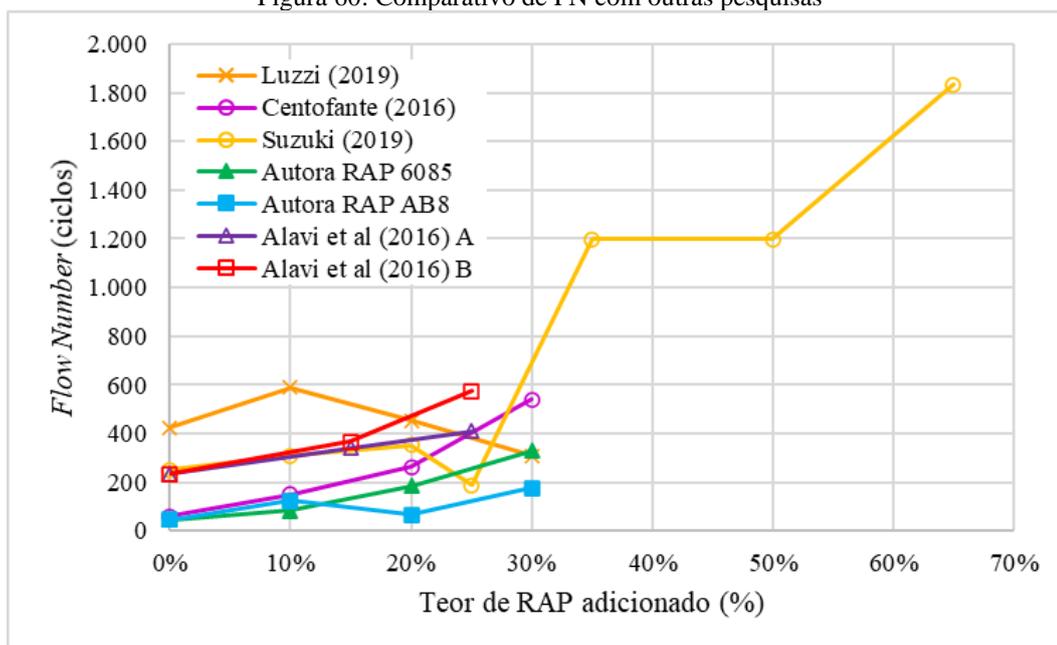
Tabela 30: Recomendações FN

Classe	<i>Flow Number</i> (ciclos)	N recomendado Condições Normais	N recomendado Condições Severas
1	$FN \leq 100$	$N < 1E6$	Não recomendado
2	$100 \leq FN < 300$	$1E6 \leq N < 1E7$	$N < 1E6$
3	$300 \leq FN < 750$	$1E7 \leq N < 1E8$	$1E6 \leq N < 1E7$
4	$750 \leq FN < 2000$	$N \geq 1E8$	$1E7 \leq N < 1E8$
5	$FN \geq 2000$	-	$N_{ser} \geq 1E8$

Fonte: Adaptado de DNIT, 2016.

Na comparação de resultados de outras pesquisas, com apontado para as demais propriedades determinadas neste estudo, a Figura 60 apresenta resultados encontrados por Luzzi (2019), Centofante (2016), Suzuki (209) e Alavi et al (2016).

Figura 60: Comparativo de FN com outras pesquisas



Luzzi (2019) observa que não há padrão definido para o comportamento das misturas com o incremento de material fresado, já que não apresentam tendência linear percebida. E atribui a dificuldade de conclusão com o desconhecimento a respeito da eficiência do material utilizado para as misturas, e outras características que podem ter variado em função da produção dos materiais.

Em contraponto, Centofante (2016) conclui o comportamento linear entre FN e teor de RAP, indicando que suas misturas apresentam aumento de FN conforme aumentam-se os teores de RAP, em função da quantidade de teor oxidado que passa a funcionar nas misturas. Uma vez que o ligante oxidado tem maior rigidez em comparação com o ligante virgem.

Suzuki (2019) encontrou de maneira geral aumento de FN com aumento de RAP, tendo redução de FN apenas para a mistura com 25% de RAP, valores que tiveram concordância com seus resultados de MD, e atribuiu seu comportamento inesperado ao condicionamento e teor de RAP durante a produção da mistura, indicando que deveria ser melhor investigado. Em relação à utilização de AR, Suzuki (2019), encontra redução de rigidez e FN com utilização de AR para misturas com RAP pré-aquecido na produção.

Alavi et al (2016), para suas misturas recicladas com RAP contendo borracha, também encontrou valores crescentes de FN com aumento de RAP, para ambas as fontes de R-RAP utilizadas, apesar da diferença entre suas misturas com 25%, que segundo o autor foram

conferidas em razão da diferença de fonte do material fresado. E seus resultados também foram consistentes com os resultados de rigidez.

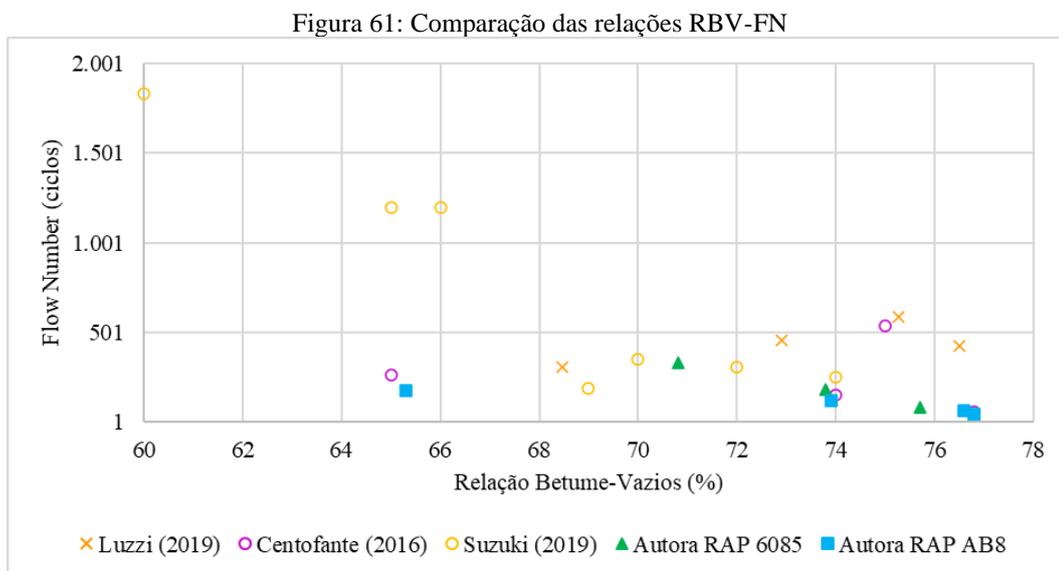
Os componentes das misturas asfálticas são: ligante virgem, vazios com ar e agregados pétreos. O volume de vazios das amostras é constante entre as misturas, e normatizado. Como o ensaio é realizado em alta temperatura, nessas situações, conforme descrito anteriormente nas análises de rigidez (que confirmam o comportamento dos ensaios de FN), o ligante asfáltico tem sua viscosidade reduzida, apresentando menor resistência aos esforços aplicados, e com isso, mobiliza o esqueleto pétreo das misturas, que passa a ter maior parcela de contribuição na resistência às deformações induzidas pelas cargas cíclicas do ensaio. Sendo esta, inclusive, uma das grandes diferenças a serem consideradas em análises do tipo multi-escala, dado o diferente comportamento das curvas de ângulo de fase entre ligantes asfálticos e misturas asfálticas. Segundo Kim (2009), em altas temperaturas o esqueleto pétreo vai de encontro ao efeito viscoso do ligante asfáltico.

Dessa maneira, maior parcela da responsabilidade envolvendo a magnitude dos resultados de FN fica sobre o esqueleto pétreo e o tipo de agregado que compõe as misturas. Como todas as misturas são densas, possuem distribuições granulométricas bastante próximas, com bons valores de adesividade comprovados pelos ensaios de DUI, entende-se que a formação mineralógica dos agregados utilizados é o principal motivo dos baixos valores encontrados.

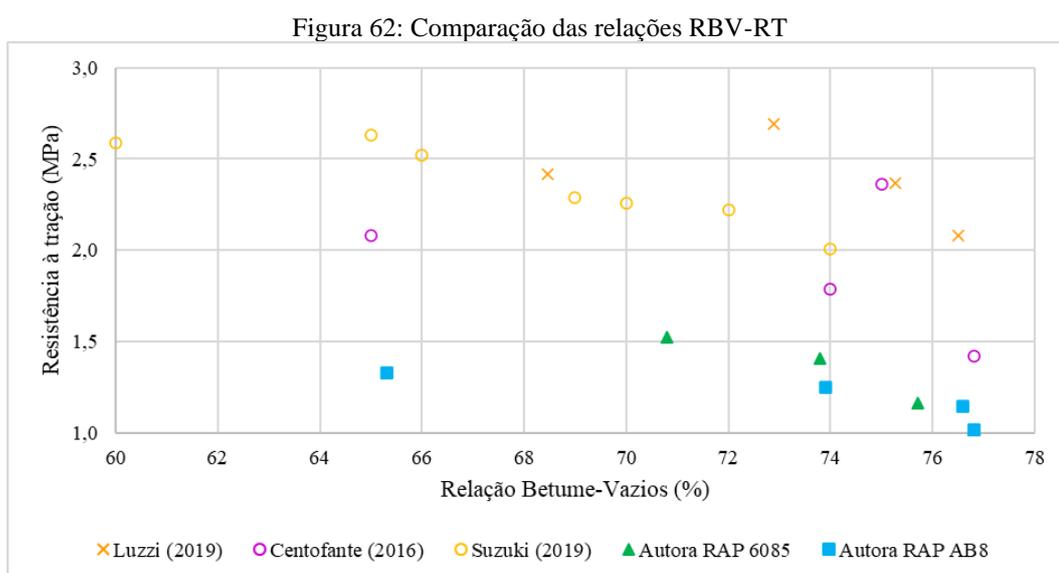
A utilização de AR nas misturas, com significativo efeito sobre o ensaio, ao restabelecer a composição química do RAP, reduz sua rigidez, esse efeito combinado com as altas temperaturas, faz com que maior parcela do esforço, em relação às misturas com 30% de RAP sem AR, seja depositado sobre o esqueleto pétreo, por isso os valores de resistência reduzem bastante nessas situações.

Nesta pesquisa, assim como comentado, os ensaios de RT conduzidos e os ensaios de FN apresentam uma mesma tendência de comportamento para cada uma das fontes de fresado, que se relaciona fortemente de maneira inversa à tendência dos resultados de RBV. Dessa maneira, foram buscados os dados de RBV para as misturas dos autores citados, para tentar entender se a mesma relação pode ser identificada, ainda que ambos os parâmetros (FN e RT) sejam fortemente distintos em seu mecanismo de falha (tração vs compressão/cisalhamento), ambos são fortemente dependentes dos parâmetros volumétricos da mistura. A Figura 61 mostra os dados relacionados de RBV com os resultados de FN para cada um dos autores citados. A

Figura 62 mostra as relações entre RBV e RT, com resultados de RT obtidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral, na temperatura de 25°C e com 4% de Vv. Para ambos os gráficos o eixo de RBV está apresentado em ordem decrescente. De maneira geral é possível perceber a correlação entre os parâmetros analisados.



No entanto, a correlação se limita a ditar a tendência de comportamento. A magnitude dos resultados é influenciada diretamente pelos materiais utilizados. Estabelecido isso, a magnitude dos FN tem resultados extremamente baixos para misturas asfálticas, necessitando maiores investigações a respeito.



4.4. Análise integrada dos resultados

A Tabela 31 apresenta um resumo dos padrões de comportamento observados para cada uma das características avaliadas nesta pesquisa, de acordo com as variações de teor de fresado (colunas 2 e 4), utilização ou não de AR nas misturas com 30% de RAP (colunas 3 e 5) e comparação qualitativa entre as diferentes fontes de RAP utilizadas. Em seguida são resumidos os comportamentos analisados durante a discussão dos resultados.

Resultados que não se aplicam estão sinalizados como “N/A”. Resultados que não obtiveram resultados estatisticamente significativos estão sinalizados como “NS”.

O processo de dosagem das misturas asfálticas recicladas a quente permite os seguintes apontamentos:

- i. A presença de material fresado nas misturas estudadas reduziu a quantidade de ligante virgem necessário para atingir as propriedades volumétricas consideradas adequadas pela metodologia Marshall. Com o aumento do teor de RAP utilizado nas misturas ocorre a redução do teor de ligante de projeto, indicando a capacidade das misturas recicladas a quente de economizar ligante asfáltico virgem, com mobilização de ligante do RAP para a mistura agindo como agente coesivo;
- ii. Além da redução de ligante virgem, os resultados da dosagem indicam que a quantidade total de ligante nas misturas também reduziu. As taxas de redução de ligante virgem calculadas com o aumento do teor de fresado revelam uma redução acima da quantidade de ligante asfáltico disponível no RAP;
- iii. Com os dados referentes ao ligante efetivo das misturas foi possível estabelecer correlações volumétricas que levaram à proposta de equação matemática para definição de DoA nas misturas, que ao ser aplicada mostrou que possivelmente o ligante do RAP AB8 se encontra mais oxidado pela maior dificuldade de atingir maiores níveis de DoA;
- iv. Os resultados de VAM e RBV utilizados na dosagem para determinação do cumprimento às normativas vigentes são calculados em função da situação de *Black Rock*. Nessa condição as misturas com o aumento de RAP têm maior dificuldade de atendimento às normativas nacionais, que são mais rígidas, mas atendem bem à normativa do DER-SP. Já as situações de *Full Blending* projetadas atenderiam de maneira mais tranquila os limites especificados nas normas. É compreendida a importância de melhores técnicas de determinação desses parâmetros quando

considerada teoria PB, permitindo conhecer melhor os mecanismos envolvidos entre ligantes de misturas recicladas, como o grau de ativação do ligante do fresado (DoA), de forma a representar melhor os materiais, sendo mais realista a respeito das relações volumétricas, comprovado pela determinação de RBV e VAM a partir dos dados de DoA obtidos pela equação proposta;

- v. Quanto às tendências de comportamento desses parâmetros, VAM reduz entre misturas com redução de RAP, e RBV tem comportamento bastante específico de acordo com a fonte de fresado, sendo inversamente proporcional a adição de resíduo do tipo RAP 6085, e com RAP AB8 o valor para a mistura com 20% é superior as demais;
- vi. Os resultados de VAM e RBV quando analisados pelas misturas considerando o DoA calculado, apresentam valores praticamente constantes para RAP 6085 e maiores variações para RAP AB8;
- vii. As relações volumétricas como VAM e RBV que ocorrem nas misturas asfálticas são levadas em consideração na aprovação das misturas de acordo com as normas vigentes, mas muitas vezes em estudos elas não são correlacionadas diretamente com os resultados mecânicos, sendo analisadas sempre como fator coadjuvante nas pesquisas.

Resumo considerando o comportamento ao comparar apenas as fontes de RAP:

- i. Apesar dos bons resultados no parâmetro de adesividade das misturas definido indiretamente por RRT no ensaio DUI, RAP 6085 apresentou resultados inferiores ao de referência, e RAP AB8 obteve resultados superiores a referência. A fonte do fresado utilizado nas misturas influencia diretamente a característica de adesividade das misturas, e dentre os fresados analisados, RAP AB8 teve um comportamento superior ao reter melhor a resistência à tração nas misturas;
- ii. No ensaio RTCD de maneira geral, os maiores resultados foram encontrados para as misturas com uso de RAP 6085, enquanto o RAP AB8 teve resultados superiores à referência, mas levemente inferiores aos de RAP 6085. Indício de que o RAP 6085 tenha maior resistência em relação ao RAP AB8, uma vez que RAP 6085 tem polímero em sua composição, versus a borracha contida no RAP AB8;
- iii. Misturas com RAP 6085 apresentaram resultados globais com leve rigidez a mais em relação as misturas com AB8, em concordância com a afirmação de que RAP 6085 tem maior rigidez em relação ao RAP AB8;

- iv. No Diagrama de Black misturas com RAP AB8 apresentam valores maiores de ângulo de fase em relação aos de RAP 6085 que teriam melhor comportamento frente às solicitações de deformação permanente;
- v. Ao analisar o plano Cole-Cole é possível perceber que a todas as misturas recicladas possuem parcela viscosa inferior à mistura de referência, correlacionadas com os teores totais de ligante resultantes das misturas. É perceptível também a influência do ligante presente no fresado na redução da viscosidade nas misturas, ao reduzir atrito interno entre materiais pétreos. Misturas com RAP AB8 também apresentam comportamento mais elástico e com variações maiores, indicando que essa fonte de fresado causa maiores interferências na propriedade;
- vi. RAP AB8 compõe misturas com maior viscosidade com maior ϕ em relação ao RAP 6085, possivelmente por possuir ligante com maior viscosidade e transferindo essa propriedade para a mistura de ligante final;
- vii. Todas as misturas recicladas apresentam valores superiores de módulo complexo em relação à referência em baixas frequências, e valores inferiores de $|E^*|$ em relação à referência em altas frequências. Indicando efeito da utilização de RAP nas misturas. Misturas com RAP 6085 tem maior variação entre teores, com curvas paralelas entre si; RAP AB8 tem maior uniformidade, com valores de $|E^*|$ em geral reduzidos;
- viii. É possível notar melhoria na correlação $|E^*| \cdot \sin\phi$ com uso de RAP. RAP AB8 em geral tem resultados de menor rigidez, com possível melhor comportamento à fadiga;
- ix. Em consonância com os resultados de MD, ocorre maiores variações entre misturas recicladas com o RAP 6085 e menor variação entre os valores das misturas com RAP AB8. Ainda, misturas com RAP 6085 apresentam resultados de FN superiores aos das misturas recicladas com RAP AB8.

Resumo a respeito da variação de RAP nas misturas:

- i. Utilização de RAP enrijece o material, aumentando suas tensões de ruptura com maiores teores de RAP, apesar dar nuances entre as variações dos teores por diferenças não significativas;
- ii. Em situações de maior volume de vazios (7% no DUI), apenas a utilização de RAP 6085 gera diferenças significativas entre os resultados de RT, indicando enrijecimento do material com maior utilização do RAP, misturas com AB8 não tiveram variações nas resistências à tração que pudesse ser notada nessa situação, com constância estatística em relação à mistura de referência.

- iii. Para situações com volume de vazios de projeto, todas as misturas com uso de fresado têm maiores tensão de ruptura em relação à mistura de referência. Misturas com RAP 6085 têm aumento de RT com aumento de teor de fresado, misturas com RAP AB8 têm a mistura de 20% com valor de RT mais baixo entre teores, e a de 30% com maior valor de RT. Esses padrões de variação em relação aos teores utilizados de RAP são inversamente proporcionais aos padrões descritos pelo parâmetro RBV;
- iv. Os teores estudados são muito baixos ou muito próximos para determinação de tendência de comportamento definitiva entre MR e teores de RAP nas condições de temperatura e carregamento utilizadas no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral;
- v. No Diagrama de Black tanto para RAP 6085 quanto para RAP AB8, misturas com maiores teores de fresado têm maior rigidez e menor ângulo de fase, ou seja, o aumento de fresado aumenta a elasticidade das misturas, pela redução do ângulo de fase, podendo fazer as misturas com mais fresado serem menos suscetíveis à deformações permanentes;
- vi. Ao analisar o plano Cole-Cole é possível perceber que para ambas as fontes de fresado a redução da parcela viscosa está relacionada com as quantidades totais de ligante resultantes nas misturas asfálticas.
- vii. Todas as misturas tem maior ϕ em menores frequências e menor ϕ para maiores frequências.
- viii. Quando da análise de rigidez pelo ensaio de MD a partir da análise das curvas mestras, misturas com RAP 6085 tem aumento de $|E^*|$ com aumento do teor de fresado. Misturas com RAP AB8 têm curvas muito próximas, e apenas em altas frequência é possível perceber que $|E^*|$ reduz com aumento de RAP AB8.
- ix. Ao analisar a correlação com o comportamento à fadiga, misturas com RAP 6085 tem $|E^*|.sen\phi$ maior com aumento do teor de RAP, indicando pior comportamento à fadiga para as misturas com maiores teores de reciclagem. Misturas com RAP AB8 tem pior comportamento para a mistura com 10% de resíduo, e os comportamentos são melhores e bastante próximos para as outras misturas recicladas com esse fresado;
- x. Quanto ao FN, parâmetro que correlaciona o comportamento das misturas a capacidade de resistir às deformações permanentes solicitadas pelas condições de carregamento do tráfego, misturas com maiores teores de RAP 6085 tem melhores resultados com maiores valores de FN. Misturas recicladas com RAP AB8 tem seu menor valor ao utilizar 20% de fresado, seguido da mistura com 10 e 30%. Mais uma vez é percebido

o mesmo padrão de comportamento que ocorreu para os ensaios de RT, com a tendência de comportamento dos resultados sendo inverso aos resultados de RBV.

Resumo a respeito da utilização de AR nas misturas com 30% RAP

- i. Na propriedade de ruptura à tração por compressão diametral, a utilização de AR manteve os altos teores de RT das misturas com 30% de RAP;
- ii. No ensaio de MR a utilização de AR não permitiu perceber diferença entre as misturas com e sem AR em nível de significância de 0,05;
- iii. A utilização de AR no Diagrama de Black apresentou maior variação dos resultados para RAP 6085, com o comportamento se dirigindo ao comportamento de misturas com menores teores de RAP, aumentando sua viscosidade em altas temperaturas;
- iv. Misturas com AR tem redução em ambas as parcelas elásticas e viscosas quando comparadas às misturas com 30% de RAP sem AR, com menor dissipação de energia irreversível e menor acúmulo de deformações;
- v. Novamente variações menores foram percebidas para RAP AB8. Também tem é possível perceber a variação dessas misturas quanto à curva mestre do ângulo de fase, com deslocamento para a direita em direção à mistura de referência;
- vi. A ação do AR nas misturas com 30% reduziu os valores de módulo complexo em toda a extensão da curva mestre para ambas as fontes de RAP, evidenciando sua eficiência ao restaurar equilíbrio químico nos ligantes oxidados dos fresados;
- vii. A utilização de AR permite concluir que as misturas tem capacidade de apresentar melhor desempenho à fadiga quando correlacionadas ao fator de comportamento à fadiga $|E^*|.sen\phi$;
- viii. O AR utilizado reduziu expressivamente os valores de FN das misturas recicladas, com redução de 77% e 59% para RAP 6085 e RAP AB8, respectivamente.

Tabela 31: Análise integrada dos resultados quanto à adição de RAP

Ensaio	RAP 6085		RAP AB8		Comparação entre RAP's	
	Aumento %	Uso do AR-5	Aumento %	Uso do AR-5		
Teor de ligante virgem	Reduz	N/A	Reduz	N/A	Pouca diferença	
Teor de ligante total	Menor que referência, não varia tanto entre si	N/A	Menor que referência, 20%>10%>30%	N/A	Pouca diferença	
VAM	Reduz	N/A	Reduz	N/A	N/A	
RBV	Reduz	N/A	Reduz	N/A	N/A	
Dano por umidade induzida	Padrão não linear	N/A	Padrão não linear	N/A	RAP AB8>REF>RAP 6085	
Resistência à tração	Aumenta (padrão RBV)	NS	Aumenta (padrão RBV)	NS	RAP6085>RAP AB8>REF	
Módulo de resiliência	Em geral superiores, mas não linear	NS	Em geral superiores, mas não linear	NS	RAP 6085>RAP AB8>REF	
Módulo Dinâmico	Espaço de Black ($\phi \times \text{Log } E^* $)	Reduz ϕ e aumenta $ E^* $, apenas $\phi 10\% > \phi \text{ REF}$	Aumenta ϕ para menores $ E^* $	Reduz ϕ e aumenta $ E^* $, todas $\phi > \phi \text{ REF}$	Sem variação	$\phi \text{ RAP AB8} > \phi \text{ RAP 6085}$
	Cole-Cole (E1 x E2)	Menor viscosidade de todos em relação à referência, influência do teor total de ligante no E2	Reduz E1 e E2	Menor viscosidade de todos em relação à referência, influência do teor total de ligante no E2	Reduz levemente E1	Variações de RAP AB8 são maiores que as variações de RAP 6085

Ângulo de fase (ϕ x Freq.red.)	Deslocamento para a esquerda da curva	Deslocamento para a direita da curva sem AR	Deslocamento para a esquerda e para cima da curva	Deslocamento menor, mas para a direita da curva sem AR	ϕ RAP AB8 > ϕ RAP 6085
Baixas frequências	Aumenta $ E^* $	Reduz $ E^* $	Curvas muito próximas, superiores à referência	Reduz $ E^* $, em menor magnitude	RAP 6085 tem maior variação entre teores, com curvas paralelas entre si; RAP AB8 tem maior uniformidade, com valores de $ E^* $ em geral reduzidos
Médias frequências	Aumenta $ E^* $	Reduz $ E^* $	Curvas muito próximas, inferiores à referência	Reduz $ E^* $, em menor magnitude	
Altas frequências	Aumenta $ E^* $	Reduz $ E^* $	Reduz $ E^* $	Reduz $ E^* $, em menor magnitude	
Comportamento à fadiga ($E^* \cdot \sin \phi$ x Freq.)	Aumenta $ E^* $	Reduz $ E^* $	Curvas muito próximas, inferiores à referência	Reduz $ E^* $	
Resistencia à deformação permanente (<i>Flow Number</i>)	Valores bastante baixos, padrão RBV	Reduz	Valores bastante baixos, padrão RBV	Reduz	RAP 6085 > RAP AB8 > REF

Resumo da análise da viabilidade técnica das misturas estudadas:

- i. Todas as misturas responderam bem ao ensaio de DUI, com altos valores de RRT superiores à recomendação de mínimo de 70%;
- ii. Todas as misturas atendem às normativas quanto a resistência à tração, de 0,65 MPa mínimo para mistura convencional, e 0,80 MPa mínimo para misturas recicladas. E os valores atingidos para MR se mostraram dentro da literatura de valores encontrados para misturas convencionalmente utilizadas;
- iii. Os valores obtidos para os módulos de resiliência de todas as misturas estão dentro dos valores padrões encontrados na literatura para concretos asfálticos virgens produzidos (2000 a 8000 MPa);
- iv. Os menores valores de fatores de fadiga das misturas recicladas definem um melhor comportamento quanto a solicitação dos esforços, indicando que misturas recicladas podem apresentar um comportamento à fadiga superior à mistura de referência;
Os resultados de FN foram baixos de maneira geral. Com cinco das nove misturas com FN abaixo de 100 ciclos, apenas as misturas com 20 e 30% de RAP 6085 e 10 e 30% de RAP AB8 se enquadrariam em classe superior à classe 1. E apenas a mistura R6085_30_LV5070 se enquadraria na classe 3, determinada em DNIT (2018);
- v. Entende-se que a formação mineralógica dos agregados utilizados é o principal motivo dos baixos valores encontrados para FN.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados apresentados e as discussões realizadas a partir destes, algumas conclusões podem ser apontadas no que se refere às misturas estudadas e suas variações de material fresado em fonte e teores, e também no que diz respeito a utilização do AR aplicado nas misturas com 30%. São elas:

- i. O aumento da utilização de RAP nas misturas reduz a quantidade de ligante virgem necessário para alcançar os parâmetros volumétricos necessários das misturas, ocasionando economia de ligante asfáltico necessário para produção dos materiais;
- ii. Quando os parâmetros volumétricos consideram a absorção de ligante por parte dos agregados minerais é possível perceber a ação do ligante do RAP nas misturas pela diferença entre ligante efetivo e ligante virgem adicionado, já que o teor de ligante efetivo não varia com a variação de RAP e é maior do que o LV adicionado, o que permitiu inferir sobre o DoA das misturas como uma razão entre essa diferença e a quantidade de ligante do RAP que está contida dentro da mistura asfáltica parcialmente reciclada;
- iii. O RAP em sua natureza não é um material constante, é um compósito de diferentes materiais com características e propriedades distintas entre si, e toda sua complexidade deve ser levada em consideração ao realizar as análises volumétricas e sua utilização;
- iv. Misturas com o RAP AB8 apresentam menores variações nos resultados quando comparadas às misturas com RAP 6085, o que indica que a fonte do RAP tem influência sobre os resultados e deve sempre que possível ser levada em conta nas análises. Também é possível indicar que RAP AB8 apresenta menor transferência das suas características para a mistura reciclada e menor DoA nas condições utilizadas, podendo indicar que o ligante envelhecido AB8 têm mecanismos distintos que podem estar associados aos resultados em função da presença de partículas de borracha na sua composição;
- v. O padrão de variação do desempenho das misturas asfálticas parcialmente recicladas pode ocorrer de maneira não-linear em relação às variações dos teores de RAP reciclados, e podem ser correlacionados com as características volumétricas de cada uma das misturas, em especial RBV, como notado nos ensaios de ruptura que têm variação do comportamento de maneira inversa ao comportamento de RBV;

- vi. De maneira geral as misturas com RAP de fato têm rigidez aumentada, e sofrem influência do material fresado utilizado, mesmo em teores baixos de utilização do RAP, quando notados os resultados de desempenho mecânico. A caracterização das misturas através do ensaio de módulo dinâmico, que descreve o comportamento reológico das misturas asfálticas, permite notar de maneira mais evidente as alterações que ocorrem nos materiais parcialmente reciclados quando se dá a mistura de ligantes virgem e envelhecido, e com o uso de AR, percebendo-se de maneira mais clara os efeitos do DoB;
- vii. Em relação ao AR, apesar de não variar as propriedades volumétricas das misturas de maneira relevante, teve sua eficiência comprovada na variação das propriedades viscoelásticas do material, principalmente quando analisada as características reológicas das misturas asfálticas resultantes;
- viii. É possível perceber a atuação do AR nas misturas, com redução da viscosidade final. AR-5 na dosagem de 10% sobre o ligante do RAP para ambas as misturas com 30% apresentou maior eficiência com o uso do RAP 6085, que tem maiores variações dos resultados, do que para o RAP AB8, indicativo de que a quantidade não tenha sido suficiente para conseguir recuperar as características do ligante AB8 envelhecido, e que este possivelmente estivesse em situação de maior oxidação em relação ao ligante do RAP 6085, ou com diferentes fenômenos acontecendo nele em decorrência da borracha presente;
- ix. De maneira geral a utilização de RAP em misturas parcialmente recicladas nos teores estudados manteve-se dentro dos limites estabelecidos pelas normativas;
- x. O ensaio de FN apresentou resultados bastante reduzidos, mas entende-se que o comportamento do agregado virgem contribua bastante para o desempenho à deformação permanente das misturas. E é possível perceber melhora do comportamento quando se utilizam os maiores teores de RAP;
- xi. Pela perspectiva técnica normativa analisada, a utilização de fresado nos teores estudados não prejudica o desempenho das misturas parcialmente recicladas.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

Tendo em vista as análises realizadas a partir de todo o trabalho apresentado, são apontadas algumas sugestões de trabalhos para realização futura:

- i. Análise de maiores teores de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente;
- ii. Estudo com foco nas propriedades volumétricas das misturas, e determinação da influência do esqueleto pétreo e ligante asfáltico resultante das misturas recicladas;
- iii. Avaliação do comportamento à fadiga das misturas e influência do RAP nos resultados;
- iv. Estudo da deformação permanente das misturas através de ensaios que consigam determinar de forma direta a propriedade;
- v. Utilização de outros teores ou outras fontes de AR nas misturas com altos teores de fresado, se possível com dosagem adequada do AR;
- vi. Análise dos aspectos ambientais e econômicos envolvidos com a produção e execução de misturas asfálticas recicladas a quente, para determinação das melhores abordagens a serem adotadas nos projetos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Portaria DNC nº44. Departamento Nacional de Combustíveis 1997.

ALAVI, M. Z., HUNG, S., JONES, D., HARVEY, J. 2016. **Preliminary investigation into the use of reclaimed asphalt pavement in gap-graded asphalt rubber mixes, and use of reclaimed asphalt rubber pavement in conventional asphalt concrete mixes.** Davis and Berkeley, CA. University of California Pavement Research Center (RR-2016-03)

ALMEIDA JUNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T342-11: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. AASHTO T 342-11. Washington, DC, 2011.

ARAFT, S., WASIUDDIN, N. M. A comparative study between the effectiveness of a softer grade binder and a rejuvenating agent in hot mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. Airfield and Highway Pavements, 2019.

ASPHALT INSTITUTE. **Ms-2 Asphalt Mix Design Methods.** Asphalt Institute: 2014. 7 ed. 188 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16505:2016 - Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida.** Rio de Janeiro, 2016. 9p.

BALBO, Jose Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

BANKOWSKI, W. Evaluation of fatigue life of asphalt concrete mixtures with reclaimed asphalt pavement. Applied Sciences. 2018.

BARROS, L. M. de. **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de Flow Number de misturas quentes e mornas.** 2017. 179f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BERNUCCI, Leidi Bariani et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008. 501 p.

BOWERS, B. F. et al. Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency through GPC and FTIR. Construction and building materials. V. 50. 2014. p. 517-523

BRITTO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas.** 2006 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2003.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

CERATTI, J. A. P; BERNUCCI, L. B; SOARES, J. B. Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015. 144 f.

CHEN, J., et al. Laboratory evaluation of asphalt blends of recycling agents mixed with aged binders. Journal of materials in civil engineering. v. 27. n. 4. 2018.

CHEN, J., LEE C. LIN, Y. Characterization of a recycling agent for restoring aged bitumen. Journal of materials in civil engineering. v. 30. n. 8. 2018.

COFFEY, S. et al. Determine the Impact of Degree of Blending between Virgin and Reclaimed Asphalt Binder on Predicted Pavement Performance using Mechanistic-Empirical Design Guide. in: Transportations Research Board 92nd Annual Meeting, Washington D.C., 2013.

COOPER JR, S. B., MOHAMMAD, L. N., ELSEIFI, M. A. Laboratory performance of asphalt mixtures containing recycled asphalt shingles, reclaimed asphalt pavement, and recycling agents. Journal of materials in civil engineering. v. 29. n. 3. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro: 2006. 314 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ES 003/2005: Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico reciclado a quente na usina – especificação de serviço. Rio de Janeiro: 2005. 13 p.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. EAPA's position statement on the use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures. 2017.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. 1997. 301p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice. 2011. 60p.

FORTON, A., et al. Properties of blends of fresh and RAP binders with rejuvenator: Experimental and estimated results. Construction and building materials. V. 236. 2020.

GASPAR, Matheus S. et al. Procedimento de extração em etapas para avaliação da interação entre ligantes na reciclagem a quente e morna, in: XIX CILA – Cong. Iberoam. Fel Asf., Medellín, Colombia. 2017

GASPAR, Matheus S. et al. Evaluation of binder blending on warm mix recycling, in: International Society for Asphalt Pavements. Fortaleza, Brasil. 2018.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. Pearson Education, 2004. 775 p.

HUANG, B. et al. Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. in: Transportations Research Board 84th Annual Meeting, 2005.

HOSSAIN, Z., RASHID, F., ROY, S. Multiscale evaluation of rejuvenated asphalt binders with a high RAP content. Transportation Research Board: Transportations Research Record, 2018.

ISLAM, R. Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Hot-Mix Asphalt. ASTM: Advances in Civil Engineering Materials. V 3. n 1. 2014.

ISLAM, S. AHMED, A; HOSSAIN, M. Flexible pavement design with RAP mixture. International Society of Asphalt Pavement. 2018.

IZAKS, R; HARITONOV, V; ZAUMANIS, M. Hot mix asphalt with high RAP content. Elsevier: Procedia Engineering, 2015. p. 676-684

KASEER, F. et al. Strategies for producing asphalt mixtures with high RAP content. Journal of materials in civil engineering. v. 31. n. 11. 2019.

KARLSSON, R; ISACSSON, U. Material related aspects of asphalt recycling - state of the art. Journal of materials in civil engineering. v. 18. n. 1. 2006.

KIM, Y. R; **Modeling of asphalt Concrete**. McGraw-Hill Copmanies, 2009. 460 p.

LI, C., MA, S. Comparative study on performance of recycled asphalt mixtures with ordinary and high-viscosity rejuvenating agent. 10th Asia Pacific Transportation Development Conference. 2014.

LIU, Y. et al. Effects of preheating on the rheological properties of rejuvenated asphalt binder. Transportation Research Board: Transportations Research Record, 2019.

LO PRESTI, D. et al. On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and Degree of blending with recycling agents. Road Materials and Pevement Design. 2019.

LO PRESTI, Davide et al. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. Journal of Cleaner Production, [s.l.], v. 131, p.43-51, may. 2016. Elsevier BV.

LU, Y. et al. Study on the effect of warm mix additive on the performance of hot mix plant asphalt with high reclaimed asphalt pavement. Transportation Research Boar: Transportation Research Record, 2015.

LUZZI, F. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

LYUBARSKAYA, M. A. et al. Integrated approach to using technology of reclaimed asphalt pavement (RAP). Procedia Engineering, v. 189, p.867-866, may. 2017. Elsevier.

MANAN, U. A; ISLAM, R; TAREFDER, R. A. Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies. *International Journal of Fatigue*. v78. 2015. p. 72-80.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura M. G. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 638p.:il. ISBN 987-85-7193-366-8

MENSCH, N. G. **Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas**. 2017 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MOHAJERI, M. *Hot Mix Asphalt Recycling: practices and principles*. 2015. 336p.

MOHAMMADAFZALI M. et al. Effects of rejuvenator and aging on binder homogeneity of recycled asphalt mixtures. *Journal of transportation engineering*. ASCE: 2018.

NAHAR, S. N. et al. First observation of the blending zone morphology at the interface of reclaimed asphalt binder and virgin bitumen. in: *Transportations Research Board 92nd Annual Meeting*, Washington D.C., 2013.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Best Practices for RAP and RAS Management*. Information Series 138. 2014 28p.

_____. *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage*. Quality improvement series 129. 2015 44p.

_____. *High RAP asphalt pavements: Japan practices – lessons learned*. Information Series 139. 2015 62p. (b)

_____. *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage*. Quality improvement series 138. 2017. 46p.

PRADYUMNA, T. A; MITTAL, A; JAIN, P. K. Characterization of reclaimed asphalt pavement (RAP) for use in bituminous road construction. *Social and Behaviour Sciences*. V. 104. 2013. p. 1149-1157.

PURDY, C. et al. Methodology to determine optimum rejuvenator dosage for 50% high RAP mixture. *Transportation Research Board: Transportations Research Record*, 2017.

HOU, R., HUANG, X., LI, H. Influence of recycling technology on hot-recycled asphalt mixture's low temperature anti-cracking performance. *Journal of highway and transportation research and development*. v. 2. n. 2. 2007.

SABHAFER, N; HOSSAIN, M. Effect of asphalt rejuvenating agent on rutting properties of aged reclaimed asphalt pavement. *Airfield and Highway Pavements*. 2017. p. 50-62

SACHAFER, N; HOSSAIN, M. Effect of asphalt rejuvenating agent on cracking properties of aged reclaimed asphalt pavement. *Airfield and Highway Pavements*. 2017. p. 201-214

SHEN, J., AMIRKHANDIAN, S., MILLER, J. A. Effects of rejuvenating agents on Superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of materials in civil engineering*. v. 19. n. 5. 2007.

SHIRODKAR, Prashant 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*, [s.l.], v. 25, p.150-155, jul. 2010. Elsevier BV.

SILVA, J. P. S., FARIAS, M. M. Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas. *Revista Matéria*. v. 23. n. 3. 2018.

SREERAM, Anand et al. Evaluation of RAP binder mobilization and blending efficiency in bituminous mixtures: An approach using ATR-FTIR and artificial aggregate. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 179, p.245-253, may. 2018. Elsevier BV.

SUZUKI, K. Y. **Evaluation of hot recycled asphalt mixes with different RAP contents**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Brasil, 2019.

TEBALDI, G. et al. Recommendation of RILEM TC237-SIB: Protocol for Characterization of Recycled Asphalt (RA) Materials for Pavement Applications. *Materials and Structures*, 51:117. RILEM, 2018. 6 p.

TRANSPORTATIONS RESEARCH BOARD. Innovations in asphalt mixture design procedures. *Transportation research circular*. 2018.

VISINTINE, B; KHOSLA, N.P; TAYEBALDI, A. Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance. *Road materials and pavement design*. 14:2, 432-437, 2013.

XIAO, F; AMIRKHANIAN, S; WU, B. Fatigue and stiffness evaluations of reclaimed asphalt pavement in hot mix asphalt mixtures. *Journal of testing and evaluation*. v 39. n 1. 2010. p. 50-58

XIAO, F; AMIRKHANIAN, S; JUANG, C.H. Prediction of Fatigue life of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement using artificial neural networks. *Journal of materials in civil engineering*. v 21. n 6. ASCE. Jun, 2009. p. 253-261.

ZAUMANIS, M., CAVALLI, M. C. POULIKAKOS, L. D. Design of 100% RAP hot-mix asphalt to balance rutting and cracking performance. In: *International Society for Asphalt Pavements*. Fortaleza, Brasil. 2018.

ZAUMANIS, M; CAVALLI, M. C; POULIKAKOS, L. D. Design of 100% RAP hot-mix asphalt to balance rutting and cracking performance. *Transportation Research Board: Transportations Research Record*, 2019.

APÊNDICE I – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

RT DUI sem condicionamento						
Mistura	RT Médio	Desvio Padrão	CV	Vv (médio)	p-valor ANOVA	Grupos
REF_LV5070	0,83	0,07	8,6%	7,2%	< 0,05	c
R6085_10_LV5070	1,06	0,07	6,6%	7,0%		b
R6085_20_LV5070	1,18	0,03	2,3%	6,4%		ab
R6085_30_LV5070	1,35	0,12	8,5%	6,9%		a
REF_LV5070	0,83	0,07	8,6%	7,2%	0,06	-
RAB8_10_LV5070	1,00	0,06	5,6%	7,7%		-
RAB8_20_LV5070	0,92	0,08	9,1%	7,2%		-
RAB8_30_LV5070	0,99	0,07	7,4%	6,6%		-
RT DUI com condicionamento						
REF_LV5070	0,75	0,04	4,9%	6,8%	< 0,05	d
R6085_10_LV5070	0,86	0,01	1,5%	7,0%		c
R6085_20_LV5070	1,05	0,07	6,7%	6,6%		b
R6085_30_LV5070	1,17	0,02	2,1%	6,9%		a
REF_LV5070	0,75	0,04	4,9%	6,8%	< 0,05	b
RAB8_10_LV5070	0,98	0,05	5,1%	7,5%		a
RAB8_20_LV5070	0,85	0,06	6,8%	7,4%		ab
RAB8_30_LV5070	0,98	0,13	12,8%	6,6%		a
Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)						
Mistura	RT Médio	Desvio Padrão	CV	Vv (médio)	p-valor ANOVA	Grupos
REF_LV5070	1,04	0,05	4,8%	4,4%	< 0,05	d
R6085_10_LV5070	1,16	0,03	2,5%	4,2%		c
R6085_20_LV5070	1,41	0,05	3,5%	3,9%		b
R6085_30_LV5070	1,53	0,11	7,1%	3,9%		a
REF_LV5070	1,04	0,05	4,8%	4,4%	< 0,05	b
R6085_30_LV5070	1,53	0,11	7,1%	3,9%		a
R6085_30_LV5070_AR5	1,52	0,08	5,2%	4,3%		a
REF_LV5070	1,04	0,05	4,8%	4,4%	< 0,05	d
RAB8_10_LV5070	1,25	0,04	3,0%	3,9%		b
RAB8_20_LV5070	1,15	0,03	2,8%	4,1%		c
RAB8_30_LV5070	1,33	0,03	2,2%	4,3%		a
REF_LV5070	1,04	0,05	4,8%	4,4%	< 0,05	b
RAB8_30_LV5070	1,33	0,03	2,2%	4,3%		a
RAB8_30_LV5070_AR5	1,32	0,04	3,1%	4,1%		a

Módulo de Resiliência (MR)						
Mistura	MR Médio	Desvio Padrão	CV	Vv (médio)	p-valor ANOVA	Grupos
REF_LV5070	3501	307	8,8%	3,8%	< 0,05	c
R6085_10_LV5070	4604	158	3,4%	4,0%		bc
R6085_20_LV5070	6105	583	9,5%	3,9%		a
R6085_30_LV5070	5589	694	12,4%	3,9%		ab
REF_LV5070	3501	307	8,8%	3,8%	< 0,05	b
R6085_30_LV5070	5589	694	12,4%	3,9%		a
R6085_30_LV5070_AR5	6251	444	7,1%	4,3%		a
REF_LV5070	3501	307	8,8%	3,8%	< 0,05	c
RAB8_10_LV5070	4869	488	10,0%	4,2%		ab
RAB8_20_LV5070	4157	468	11,3%	4,2%		bc
RAB8_30_LV5070	5564	288	5,2%	3,9%		a
REF_LV5070	3501	307	8,8%	3,8%	< 0,05	b
RAB8_30_LV5070	5564	288	5,2%	3,9%		a
RAB8_30_LV5070_AR5	4618	402	8,7%	4,0%		ab
Flow Number (FN)						
Mistura	FN Médio	Desvio Padrão	CV	Vv (médio)	p-valor ANOVA	Grupos
REF_LV5070	46	9,5	20,5%	7,1%	< 0,05	c
R6085_10_LV5070	83	17,5	21,0%	7,4%		c
R6085_20_LV5070	187	12,2	6,5%	7,2%		b
R6085_30_LV5070	331	52,2	15,8%	7,1%		a
REF_LV5070	46	9,5	20,5%	7,1%	< 0,05	b
R6085_30_LV5070	331	52,2	15,8%	7,1%		a
R6085_30_LV5070_AR5	75	33,7	45,1%	7,1%		b
REF_LV5070	46	9,5	20,5%	7,1%	< 0,05	c
RAB8_10_LV5070	124	33,0	26,5%	7,1%		b
RAB8_20_LV5070	66	5,3	8,0%	7,1%		c
RAB8_30_LV5070	178	15,8	8,9%	6,9%		a
REF_LV5070	46	9,5	20,5%	7,1%	< 0,05	b
RAB8_30_LV5070	178	15,8	8,9%	6,9%		a
RAB8_30_LV5070_AR5	72	22,1	30,7%	7,1%		b